

Gefaseerd renoveren of totaalrenovatie? De invloed op de milieu-impact van een eengezinswoning

Elke Meiresonne

Studentennummer: 01810747

Promotor: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman

Begeleider: ir.-arch. Yanaika Decorte

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

Academiejaar 2022-2023

Gefaseerd renoveren of totaalrenovatie? De invloed op de milieu-impact van een eengezinswoning

Elke Meiresonne

Studentennummer: 01810747

Promotor: prof. dr. ir. arch. Marijke Steeman

Begeleider: ir.-arch. Yanaika Decorte

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

Academiejaar 2022-2023

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

Voorwoord

De strijd tegen de klimaatopwarming is een zeer actueel thema en zal dat de komende jaren, en zelfs decennia, zeker blijven. Tijdens de opleiding tot ingenieur-architect ben ik mij geleidelijk bewust geworden van de grote invloed die de bouwsector heeft op deze problematiek. Het energiezuinig maken van het gebouwenpark is een noodzaak en als toekomstig ingenieur-architecte zie ik het als mijn taak om hier mijn steentje in bij te dragen. Daarom koos ik er met volle overtuiging voor om deze masterproef te wijden aan de ecologische afweging tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie. De inzichten waartoe ik tijdens het schrijven van deze masterproef kwam, zullen ongetwijfeld nuttig zijn tijdens het verdere verloop van mijn carrière. Ik wil dan ook graag de mensen die mij hierbij geholpen en ondersteund hebben, bedanken.

Allereerst wil ik mijn promotor prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman en begeleider ir.-arch. Yanaika Decorte bedanken om mij gedurende het hele jaar bij te staan met waardevolle inzichten en adviezen. Ik waardeer de balans die ze hebben weten te creëren tussen de vrijheid die ik kreeg om mij te verdiepen in het onderwerp en de sturing die ze boden door mij af en toe terug te brengen naar de hoofdzaak. De begeleidingssessies gaven mij telkens ideeën en enthousiasme om verder te werken.

Verder wil ik ook mijn ouders en mijn vriend bedanken voor hun onvoorwaardelijke steun en oprechte interesse gedurende de afgelopen maanden. Het nalezen van deze masterproef, zonder veel achtergrondkennis, was zeker geen eenvoudige opgave. De inspanningen die jullie telkens deden om mijn ideeën te begrijpen wanneer ik deze weer eens wou uitleggen en om met mij mee te denken, betekenden heel veel voor mij.

Ook wil ik graag alle anderen bedanken die mij het afgelopen jaar hebben gesteund en mij eraan hebben herinnert dat een pauze nemen ook wel eens mag.

Tenslotte wens ik u, beste lezer, veel leesplezier. Hopelijk helpt deze masterproef u bij het verwerven van enkele nieuwe inzichten.

Elke Meiresonne

Toelating tot bruikleen

De auteur(s) geeft (geven) de toelating om 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.

Gent, 8 juni 2023

Elke Meiresonne

Overzicht

Gefaseerd renoveren of totaalrenovatie?

De invloed op de milieu-impact van een eengezinswoning

Auteur: Elke Meiresonne
Promotor: prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman
Begeleiders: ir.-arch. Yanaika Decorte

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir.-arch. Johan Lagae
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent
Academiejaar 2022-2023

Abstract

België kampt met een verouderd gebouwenbestand: momenteel voldoet 95% van de Belgische woningen niet aan de energiedoelstellingen voor 2050. Bijgevolg zal er de komende jaren een aanzienlijk aantal renovaties nodig zijn. Wanneer de milieu-impact van verschillende renovatiescenario's in de literatuur begroot wordt, worden deze telkens gesimuleerd als een eenmalige ingreep. In de praktijk wordt er echter vaak een gefaseerde renovatiemethode toegepast. Daarom wordt in deze masterproef de invloed van de gefaseerde renovatiestrategie op de milieu-impact van een eengezinswoning onderzocht. In het onderzoek wordt een LCA-methodologie opgesteld die een eerlijke vergelijking tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie mogelijk maakt. Deze methodologie wordt toegepast op een casestudy-woning met vier renovatiepakketten, waarbij zowel de doelstellingen voor de lange termijn als de eisen op korte termijn worden meegenomen. In een eerste fase wordt de milieu-impact van beide renovatiestrategieën begroot. Hierbij worden er aannames gemaakt in verband met de planning van de gefaseerde renovatie. De invloed van de renovatieplanning op de milieu-impact van de casestudy wordt onderzocht door af te wijken van deze aannames. Uit de resultaten blijkt dat een gefaseerde renovatie altijd een hogere milieu-impact heeft dan een totaalrenovatie met dezelfde set aan renovatiemaatregelen, indien deze totaalrenovatie aan het begin van de studieperiode uitgevoerd zou worden. Een gefaseerde renovatie met een performant maatregelenpakket kan in sommige gevallen wel verkozen worden boven een totaalrenovatie met een minder performant maatregelenpakket. Ook indien de totaalrenovatie pas later uitgevoerd zou worden, kan een gefaseerde renovatie de voorkeur krijgen.

Trefwoorden

Levenscyclusanalyse, totaalrenovatie, gefaseerde renovatie, milieu-impact

Renovate in One or Multiple Steps? The Influence on the Environmental Impact of a Single Family Dwelling

Elke Meiresonne

Supervisors: prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman, ir.-arch. Yanaika Decorte

Abstract: Belgium struggles with an outdated building stock, as 95% of Belgian homes currently fail to meet the energy targets set for 2050. As a result, a significant number of renovations will be needed in the coming years. Renovations can be approached either as a single-step process or as a stepwise progression. However, within the ongoing ecological discourse, the latter approach is insufficiently considered, even though it is most common in practice. Hence, this work aims to investigate the impact of phased renovation strategies on the environmental footprint of single-family homes. In this research, a Life Cycle Assessment methodology that facilitates the comparison between single-step and stepwise renovation is developed. This methodology is applied to a specific case study. Four distinct sets of renovation measures, that meet both short-term and long-term requirements in Flanders, are assessed. Initially, certain assumptions are made regarding the timeline of the stepwise renovation and the environmental impact of both renovation strategies is estimated. Furthermore, the influence of the planning strategy the total environmental impact is investigated. The findings demonstrate that a single-step renovation, implemented at the outset of the study period, consistently results in a lower environmental impact compared to a stepwise renovation with the same set of renovation measures. However, a stepwise renovation with a high-performance set of renovation measures may be preferable over a single-step renovation employing less high-performance measures. Additionally, if the single-step renovation would be delayed until later in the study period, a stepwise renovation may also be preferred.

Keywords: Environmental Impact, Life cycle assessment, Single step renovation, Stepwise renovation

I. INTRODUCTION

The building sector stands as the largest contributor to global CO₂ emissions, accounting for a staggering 38% of total emissions [1]. In Belgium, residential heating alone contributes to 14,9% of the country's greenhouse gas emissions, which is more than both the global and European averages [2]. This can be attributed to Belgium's inefficient building stock and the prevalence of houses in relation to apartments.

Efforts to reduce the building sector's emissions and to address its impact on climate change focus on enhancing energy efficiency. Two strategies, namely renovation and demolition followed by reconstruction, can and will be used to achieve this objective. However, in the ongoing ecological debate surrounding these two approaches, renovation is primarily considered as a single-step renovation, while the common practice of stepwise renovation remains unexplored.

Therefore, this work aims to compare single-step and stepwise renovation from an environmental point of view.

The remainder of this paper is structured as follows. In Section II, the topic is contextualized by considering relevant literature. Section III discusses proposed methodology to facilitate consistent comparison of single-step and stepwise renovation strategies. In Section IV, the case study, to which the methodology is applied, is introduced and the research results are presented in Section V. Finally, Section VI draws a conclusion and proposes future research directions.

II. LITERATURE REVIEW

The first part of the literature review is conducted to enhance understanding of stepwise renovation, as no Life Cycle Assessment (LCA) studies examining this approach currently exist, to the best of the author's knowledge. In the second part, an analysis of several LCA-studies focusing on renovations is conducted. This provides insight into the state-of-the-art of LCA for renovations and offers valuable information on the most effective renovation measures to reduce environmental impact.

A. Renovation in Practice

Accurately measuring renovation activities remains a challenge due to limited available data [3]. Nonetheless, a large-scale European survey reveals that most renovations in the European Union result in minor decreases in energy use, with deep renovation being a less common practice [4]. Stepwise renovation thus appears to be more prevalent. This can be partially explained because of the financial barrier, which is one of the three identified barriers for energy renovation in [5]. A stepwise renovation approach allows for smaller initial investments and spreads disruption over time. However, energy use reduction is achieved gradually and there are some risks associated with this renovation approach: the potential lock-in effect and the risk that some of the renovation measures might be postponed, sometimes indefinitely, due to a lack of motivation. To mitigate these risks, a well-designed masterplan is essential [6], [7]. Another barrier for energy renovations is the information barrier [5]. Efforts towards addressing this barrier include institutes providing renovation advice. Common advice includes undertaking renovation steps in a logical order, considering the principles of the Trias Energetica [6], [8]. However, it is important to emphasize that the ideal planning for stepwise renovation is highly project

dependent, with a multitude of factors and considerations that might influence the decision outcome [6].

B. Renovation in LCA-Studies

The insights gained from the analysis of five independent LCA studies, addressing building renovation and evaluating the impact of individual measures, are discussed below..

The effectiveness of renovation measures varies depending on the condition of the building. For poorly insulated buildings, for example, insulation of the building envelope emerges as a highly effective measure [9], [10]. The additional CO₂-emissions resulting from material production for insulation are minimal compared to the significant reduction in energy use achieved. However, in buildings that are already reasonably well insulated, the positive influence of additional insulation is less pronounced [10], [11]. In such cases, alternative renovation measures become more interesting and worthy of consideration. A similar conclusion can be drawn for buildings that are heated with a polluting fuel. In that case, the transition to a heating installation based on greener fuels will be imperative [10], [11].

Furthermore, a heat pump offers a higher reduction in energy usage than a gas condensing boiler, which more than compensates for the larger embedded impact of the heat pump [9], [10].

III. METHODOLOGY

To research the difference in environmental impact between a single-step and a stepwise renovation and the point where one approach is preferred over the other from an ecological perspective, a methodology for LCA is drawn up.

Following the framework outlined in NBN EN 15978, a gradle-to-grave LCA will be performed [12]. The functional unit considered is the entire single-family house, excluding interior elements such as stairs, interior doors, and walls, over a 60-year period. The life cycle stages incorporated in the study are depicted in Figure 1.

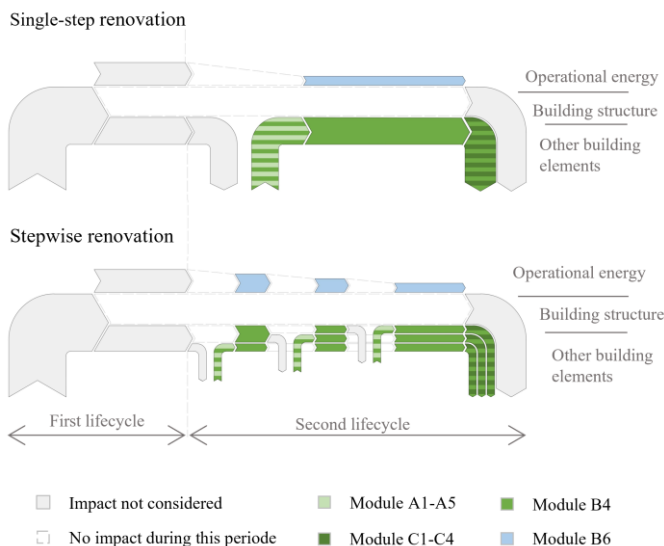


Figure 1: System boundaries

The environmental impact is calculated for the entire life cycle of all the materials that are added during the study period. This includes both the materials used for replacement purposes, as well as newly added materials. The impact of the materials that are already present at the study's outset is attributed to the previous study period and will not be evaluated.

Module A encompasses the production and construction phase, accounting for the impact of material production, installation, and transportation. A material loss of 5% is assumed during construction. Transportation distances and means of transportation are determined using OVAM assumptions [13]. The operational stage considers energy use and material replacement. The end-of-life stage involves the demolition of newly added materials in both the single-step and stepwise renovation scenarios.

The impact of demolishing the building structure is not included, as it is possible that it can endure another life cycle. Moreover, this impact is identical in the two scenarios, so the absolute difference between them remains unchanged.

The environmental impact is calculated in SimaPro (v.9.1.1.1) using the ecoinvent database (v.3.6). The impact is expressed in environmental points (Pt) with the Single Score indicator from the ReCiPe 2016 (Hierarchist) impact assessment method. The EPB-software 3G (v.13.5.1) is used to estimate the operational energy use.

IV. THE CASE STUDY

In this study, the environmental impact of single-step and stepwise renovation is determined for a specific case study of a typical single-family terraced house in Flanders. The house comprises three floors with a ground-level extension and is constructed using common building techniques. It is assumed that no insulation is present and that heating is provided by a gas boiler with a temperature regime of 90/70°C.

Four sets of renovation measures, that meet both long-term goals and short-term legislative requirements in Flanders, will be examined. Each set involves insulation of the building envelope in accordance with EPB-standards, as presented in Table 1. Additionally, two types of heating systems (air/water heat pump and gas condensing boiler, both with a temperature regime of 40/30°C) and two types of ventilation systems (type C+, mechanical exhaust ventilation with demand control and type D, fully mechanical ventilation with heat recovery) will be considered. By combining those technical installations, the four considered renovation sets are determined. Each set of renovation measures is abbreviated using 'Set' followed by a number, as presented in Table 2.

Table 1: Composition of the case study building envelope

Part of building envelope	Surface [m ²]	U-value [W/m ² K]	
		Before renovation	After renovation
Pitched roof	46,8	2,20	0,24
External wall	67,2	1,65	0,24
Flat roof	12,0	3,45	0,23
Slab on grade	47,0	0,70	0,24
Window	12,6	4,87	1,38
External door	4,2	2,00	2,00
Party wall	133,2	1,04	1,04

Table 2: Abbreviation of the different sets of renovation measures

Renovation measures			Abbreviation
Insulation according to Table 1	Gas condensing boiler	Ventilation C+	Set1
		Ventilation D	Set2
	Air/water heat pump	Ventilation C+	Set3
		Ventilation D	Set4

In this paper, the stepwise renovation process is determined by three key variables: the order of renovation, the number of renovation steps and the timeframe between the implementation of successive renovation measures.

V. RESULTS

A. Single-step vs. stepwise renovation using basic assumptions for the planning of stepwise renovation

In the first part of the LCA study, some basic assumptions to determine the planning of the stepwise renovation are established. The order of renovation is determined based on the recommendations provided by *BENOveren*, an initiative of the Flemish Government [8]. The proposed sequence begins with roof renovation (pitched roof followed by flat roof), followed by a renovation of the façade, the windows, and the floor. Subsequently, the ventilation system is installed and the heating system is renewed. Each renovation measure is assumed to be carried out as an individual step, with alternating periods of 4 and 5 years between each step. As such, the final renovation step is carried out in 2050. Just in time to conform with the aforementioned long-term goals in Flanders.

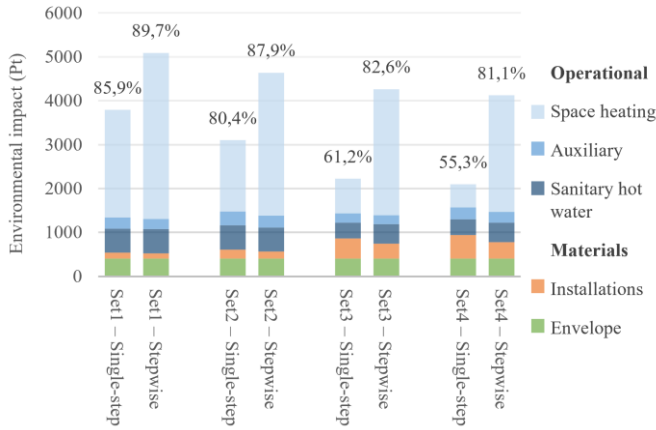


Figure 2: Total environmental impact of single-step and stepwise renovation following the assumptions for renovation planning

Figure 2 presents the total environmental impact of stepwise and single-step renovation with the different renovation packages over a period of 60 years. Several insights can be gathered from these results.

First, it becomes clear that the material impact of the building envelope remains the same for all considered renovation scenarios. The impact of the technical installations however is lower in the stepwise renovation scenarios. In those scenarios, the installations, which have a short life expectancy, need to be replaced less often. This is because they are only installed at a later stage in the study period. The environmental impact of the operational energy use is significantly higher in the stepwise renovation scenarios and it more than compensates for the lower impact of technical installations. The reason for this can be seen in Figure 3, which presents the cumulative environmental impact of different scenarios for single-step and stepwise renovation and of the reference scenario, in which only necessary replacements are carried out.

The discontinuities observed in the graphs represent the singular environmental impacts resulting from renovations, replacements, or demolition. The slope of each line reflects the environmental impact due to operational energy use. The reference scenario exhibits the steepest slope, while the single-step renovation scenarios demonstrate the lowest. In the stepwise renovation scenarios, the slope gradually decreases after each renovation step until it is equal to the slope of the corresponding single-step renovation scenario. This pattern is inherent to stepwise renovation. Therefore, it can be concluded that a stepwise renovation always leads to a higher

environmental impact compared to a single-step renovation in case identical renovation measures and the single-step renovation is executed the beginning of the study period.

Furthermore, the analysis indicates that if a specific renovation approach (single-step or stepwise) is chosen, the scenarios with a heat pump yield a lower total environmental impact than those utilizing a gas condensing boiler. Additionally, the scenarios incorporating a fully mechanical ventilation system exhibit a lower environmental impact compared to those with mechanical exhaust ventilation, given a fixed choice of heating system.

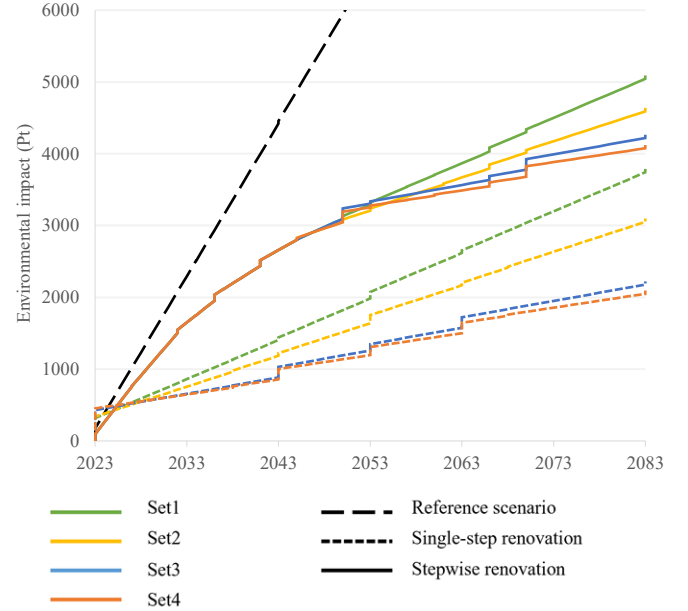


Figure 3: Cumulative environmental impact of single-step and stepwise renovation following the assumptions for renovation planning

Another insight is the fact that the total difference in environmental impact between single-step and corresponding stepwise renovations proves to be greater when more efficient technical installations are installed. Stepwise renovations with condensing gas boilers and ventilation systems C+ and D have environmental impacts that are, respectively, 34.4% and 49.9% higher than their single-step counterparts. For stepwise renovations with heat pumps and ventilation systems C+ and D, this difference is 93.3% and 98.5%, respectively.

Both Figure 2 and Figure 3 show that the difference in environmental impact between different stepwise renovation scenarios is generally smaller than the difference observed between single-step renovation scenarios.

Based on the findings, it could be concluded that single-step renovation is preferred over stepwise renovation, but that is not always the case. Stepwise renovation may be favored if the single-step renovation would occur later in the study period.

B. Single-step vs. stepwise renovation with deviations in the planning of stepwise renovation

In the second phase of the LCA study, different options for the planning of the stepwise renovation are considered and their effect on the environmental impact of the stepwise renovation is determined. Each variable is individually tested by deviating from the assumptions made in Subsection A and recalculating the environmental impact of the building.

To determine the influence of the order of the renovation measures, the environmental impacts of the worst case and the

best case scenario are assessed. The influence of the number of renovation steps is tested by combining two or three renovation measures per step. For the execution of these steps, a delayed (worst case) and an early (best case) implementation are considered. This means that the renovation step is carried out at the moment when the last or the first one of the renovation measures was planned.

In Figure 4, the total environmental impact is shown for the scenarios where only one or both of these variables deviate from the basic assumptions made in Subsection A. Both parameters result in a similar increase of the total environmental impact in terms of their worst case scenarios. In the best case scenario, the influence of optimizing the order of renovation is limited. The environmental impact of the least optimal scenario is 60% to 102% higher than the impact of the most optimal scenario, depending on the set of renovation measures implemented. For all scenarios above the 100% line, single-step renovation is preferred over stepwise renovation, in terms of environmental impact. When stepwise renovation scenarios are compared to single-step renovation scenarios with less efficient technical installations, as shown with the arrows in the figure, some stepwise renovation scenarios are favored if an well thought-out execution order and/or fewer renovation steps are considered.

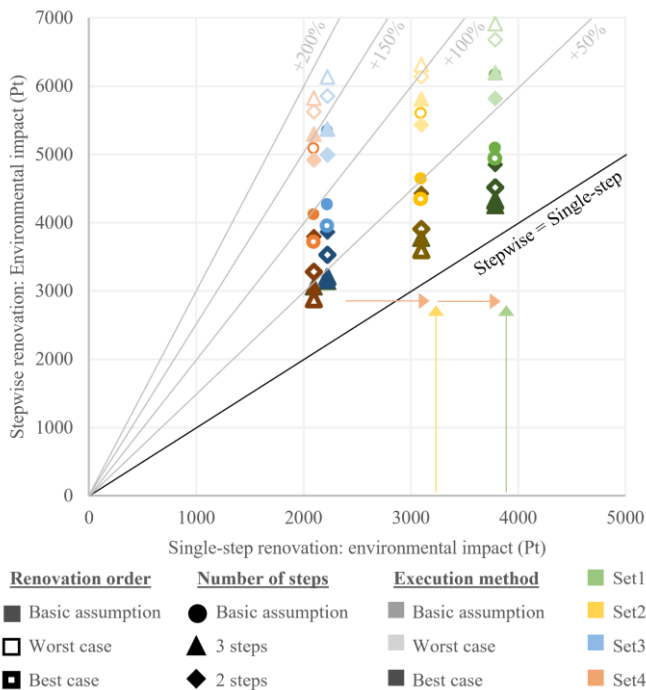


Figure 4: Total environmental impact when changing the renovation order and/or the number of steps

As shown in Figure 5, the time between consecutive renovation steps is found to have a linear relationship with environmental impact. Also here, the stepwise renovation scenarios (period between consecutive renovation steps is larger than 0) with heat pump can lead to a lower environmental impact than the single-step renovation scenarios with a condensing gas boiler (period between consecutive renovation steps is 0).

If another of the variables deviates from the assumptions, the time-variable influences the effect that the other variables can have on the total environmental impact. Again, a linear relation is observed: if the period between consecutive renovation steps doubles, the deviation of the environmental impact due to changing the other variable, will double as well. This is an

important conclusion, as, in a realistic scenario, the period between consecutive renovation measures can be determined by financial considerations. The longer a renovation is bound to take, the greater the importance of an intelligently chosen renovation planning will be.

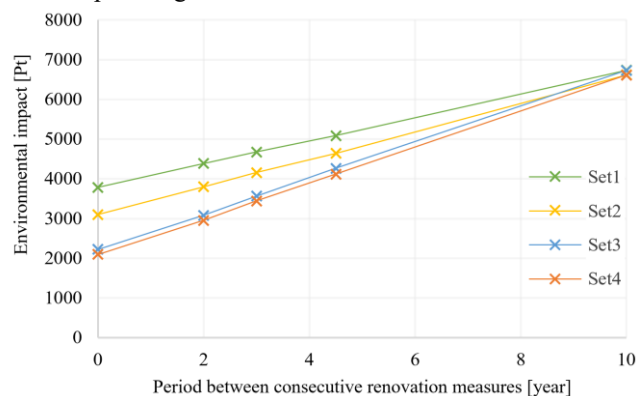


Figure 5: Total environmental impact when changing the period between consecutive renovation measures

Each of the variables seem to have a greater influence on scenarios with highly efficient technical installations than on scenarios with less efficient installations.

Moreover, the closer the stepwise renovation resembles to the single step renovation, the more the environmental impact decreases. The variable that has the largest effect on the environmental impact of the stepwise renovation is therefore the time between the subsequent renovation steps. Also combining different renovation measures in one step, can have a similar effect. The influence of the order of renovation, however, proves to be rather limited, as it only optimizes the stepwise renovation within a fixed timeframe.

C. Energy performance levels vs. environmental impact

In the last part of this research, the obtained energy performance level of each of the renovation scenario is compared to its environmental impact.

The four sets of renovation measures result in varying levels of energy performance. As the E-level does not take into account the renovation planning, the obtained energy performance level is the same for all the renovation scenario's with the same set of renovation measures.

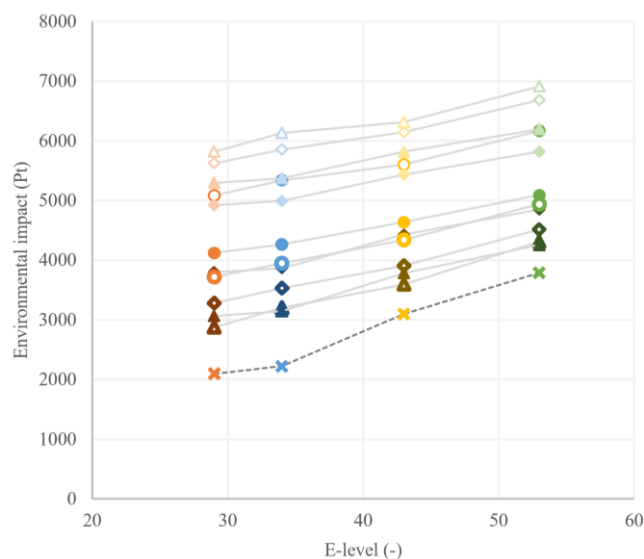


Figure 6: Relationship environmental impact of the renovation options vs. energy performance level (Legend: Figure 4)

When evaluating the relationship between energy performance level and environmental impact, it is generally acknowledged that the environmental impact decreases as energy performance levels decrease. In the context of this study, this statement holds true when examining the single-step renovation. However, when considering the stepwise renovation scenarios, the statement requires some nuance: it is only valid if scenarios with comparable renovation planning are taken into consideration. Indeed, only then the connecting line between the different renovation scenarios rises when energy performance levels rise.

VI. CONCLUSION

The research findings indicate that a single-step renovation conducted at the beginning of the study period consistently leads to a lower environmental impact compared to a stepwise renovation with the same set of renovation measures. The biggest contributor towards observed performance differences, is the operational energy use. Consequently, the environmental impact of a stepwise renovation is strongly influenced by the renovation planning. An effective renovation plan that focusses on quickly reducing operational energy use proves to be paramount when executing a stepwise renovation.

Indeed, it is shown that a stepwise renovation with energy-efficient renovation measures and an intelligently chosen renovation plan can outperform a single-step strategy with a less performant set of renovation measures.

Three planning variables were defined: the order of renovation, the period between subsequent renovation measures and the number of renovation steps. The most effective variables include minimizing the period between executing subsequent renovation steps and completing the renovation in fewer steps. The renovation order has a smaller, but not unimportant, influence on the environmental impact as it only optimizes the stepwise renovation within a fixed timeframe. An interesting correlation between the period between consecutive renovation measures and the other two variables was observed. The influence of the two variables on the environmental impact increases linearly with the renovation speed.

Furthermore, it was observed that for a single-step renovation scenario, the environmental impact decreases as energy performance levels decrease. However, when considering stepwise renovation, this statement holds only true when scenarios with a comparable renovation planning are taken into account. The environmental impact can vary significantly across different planning scenarios with the same set of renovation measures that result in the same energy performance level. As the E-level does not take into account the renovation planning, it can be concluded that an additional LCA could be beneficial to optimize the environmental impact of the renovation.

REFERENCES

- [1] United Nations Environment Programme, “2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector,” Nairobi, 2020.
- [2] Klimaat.be, “Uitstoot van broeikasgassen: de uitstoot in de belangrijkste sectoren,” 2021. <https://klimaat.be/in-belgie/klimaat-en-uitstoot/uitstoot-van-broeikasgassen/uitstoot-per-sector> (accessed Dec. 27, 2022).
- [3] F. Vastmans and E. Buyst, “Drempels voor renovatie aan de aanbodzijde,” *Steunpunt Wonen*, 2019.
- [4] European Commission, “Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU - Final report,” Cologne, 2019. doi: 10.2833/14675.
- [5] C. Wilson, L. Crane, and G. Chryssochoidis, “Why do homeowners renovate energy efficiently? Contrasting perspectives and implications for policy,” *Energy Res Soc Sci*, vol. 7, pp. 12–22, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.03.002>.
- [6] RenoFase, “Stappenplan voor een kwaliteitsvolle, efficiënte renovatie,” *www.renofase.be*, 2017.
- [7] T. Fawcett, “Exploring the time dimension of low carbon retrofit: owner-occupied housing,” *Building Research & Information*, vol. 42, no. 4, pp. 477–488, 2014, doi: 10.1080/09613218.2013.804769.
- [8] mijnrenovatie.be, “Leer BENOveren in 5 stappen. Volg jouw ideale BENOvatietraject!,” *Vlaamse Overheid*.
- [9] L. Delem, A. Janssen, J. Vrijders, and L. Wastiels, “The impact of materials needed for renovation and new housing,” 2020.
- [10] A. Passer, C. Ouellet-Plamondon, P. Kenneally, V. John, and G. Habert, “The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings,” *Energy Build*, vol. 124, pp. 153–163, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.008>.
- [11] A. Dodoo, L. Gustavsson, and U. Y. A. Tetey, “Primary energy and carbon dioxide implications of low-energy renovation of a Swedish apartment building,” *Passivhus Norden*, pp. 270–282, 2013.
- [12] Bureau voor Normalisatie, “NBN EN 15978: Duurzaamheid van constructies - Beoordeling van milieuprestaties van gebouwen - Rekenmethode,” 2012.
- [13] OVAM, “Environmental profile of building elements [update 2017],” Mechelen, 2018.

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	1
LIJST VAN FIGUREN	4
LIJST VAN TABELLEN	7
LIJST VAN AFKORTINGEN.....	9
1 INLEIDING	1
1.1 Relevantie voor de bouwsector.....	1
1.2 Klimaatdoelen.....	3
1.3 Doelstelling en onderzoek	5
2 ENERGETISCHE RENOVATIE IN DE PRAKTIJK	7
2.1 Renoveren in de praktijk	7
2.1.1 Renovatieactiviteit meten.....	7
2.1.2 Hoe wordt er gerenoveerd?	9
2.1.3 Drempels voor de uitvoering van een energetische renovatie.....	10
2.2 Het verschil tussen gefaseerde renovatie en totaalrenovatie.....	11
2.3 Uitvoering van een gefaseerde renovatie.....	15
2.4 Besluit	18
3 LEVENSCYCLUSANALYSE VAN EEN ENERGETISCHE RENOVATIE	19
3.1 Impact van materialen vs. operationeel energiegebruik.....	23
3.2 De invloed van individuele renovatiemaatregelen	24
3.3 Tijdgerelateerde effecten in een levenscyclusanalyse.....	28
4 METHODOLOGIE	30
4.1 Levenscyclusanalyse	30
4.2 Bepaling van de methodologie	31
4.2.1 Doel en reikwijdte	31
4.2.2 Levenscyclusinventarisatie.....	37
4.2.3 Levenscyclusimpactanalyse	38
4.2.4 Interpretatie	40

5	SCENARIO'S.....	41
5.1	De casestudy	41
5.2	Randvoorwaarden	45
5.2.1	Eisen.....	45
5.2.2	Bouwknopen	47
5.2.3	Luchtdichtheid.....	48
5.3	Referentiescenario.....	50
5.4	Renovatiescenario's	50
5.4.1	Renovatiemaatregelen.....	50
5.4.2	Planning gefaseerde renovatie.....	53
5.4.3	Tijdslijn referentiescenario en renovatiescenario's bij basisaannames	54
5.5	Besluit	55
6	MILIEU-IMPACT VAN DE BESTUDEERDE SCENARIO'S BIJ BASISAANNAMES	56
6.1	Milieu-impact van de materialen	56
6.1.1	Gebouwschil.....	56
6.1.2	Technische installaties.....	59
6.1.3	Besluit	62
6.2	Milieu-impact van de materialen en het operationeel energiegebruik.....	63
6.2.1	Jaarlijkse milieu-impact.....	63
6.2.2	Cumulatieve milieu-impact	64
6.2.3	Totale milieu-impact	68
6.3	Besluit	70
7	MILIEU-IMPACT VAN GEFASEERDE RENOVATIE BIJ AFWIJKEN VAN BASISAANNAMES	71
7.1	Variabele 1: de uitvoeringsvolgorde	71
7.1.1	Bepaling van de optimale uitvoeringsvolgorde van de renovatie van de gebouwschil	71
7.1.2	Randvoorwaarden voor de overstap naar lage temperatuurverwarming	73
7.1.3	Bepaling van de optimale uitvoeringsvolgorde van de volledige renovatie.....	73
7.1.4	Bepaling van de meest negatieve uitvoeringsvolgorde van de volledige renovatie.....	76
7.1.5	Resultaat.....	78
7.2	Variabele 2: het aantal renovatiestappen	81
7.2.1	Bepaling van de renovatiestappen	81
7.2.2	Resultaat.....	82

7.3	Variabele 3: periode tussen de renovatiestappen	85
7.3.1	Bepaling van de tussenperiode	85
7.3.2	Resultaat.....	86
7.4	Relatie tussen de variabelen.....	88
7.4.1	Uitvoeringsvolgorde in combinatie met aantal renovatiestappen.....	88
7.4.2	Uitvoeringsvolgorde in combinatie met de periode tussen renovatiestappen.....	90
7.4.3	Het aantal renovatiestappen in combinatie met de periode tussen renovatiestappen.....	91
7.5	Besluit	92
8	RESULTATEN IN CONTEXT	93
8.1	Voorkeur bij renovatiewerken	93
8.2	Relatie tussen het behaalde E-peil en de totale milieu-impact	95
8.3	Situering van de gefaseerde renovatiescenario's in de regelgeving tot 2050	97
8.4	Besluit	99
9	GEVOELIGHEIDSANALYSES.....	100
9.1	Warmteverliezen doorheen bouwknopen	100
9.2	Luchtdichtheid.....	102
9.3	Woningtypologie- en geometrie.....	104
9.4	Milieu-impact vs. klimaatveranderingspotentieel.....	110
9.5	Invloed van de elektriciteitsmix	113
9.6	Overige factoren	116
10	BESLUIT	119
10.1	Besluit	119
10.2	Toekomstig onderzoek	121
	BIBLIOGRAFIE.....	122
	BIJLAGEN	

Lijst van figuren

Figuur 1: Primair energiegebruik en energie-gerelateerde CO ₂ -emissies per sector (2019) – globaal ..	1
Figuur 2: Emissie van broeikasgassen per sector (2021).....	2
Figuur 3: Residentiële uitstoot van broeikasgassen in Europa in kg CO ₂ -equivalent per inwoner.....	2
Figuur 4: Relatie tussen aantal renovatiefases richting langetermijndoelstelling en jaarlijks aandeel te renoveren woningen).....	4
Figuur 5: Evolutie van de renovatieverplichting voor woningen. Bij appartementen is het tijdverloop verschillend: hier geldt de renovatieverplichting tot EPC-label B en A respectievelijk vanaf 2040 en 2045.....	4
Figuur 6: Verschil energetische totaalrenovatie en gefaseerde renovatie.....	11
Figuur 7: Directe en indirecte verbanden tussen verschillende gebouwcomponenten.....	13
Figuur 8: Schematische voorstelling gefaseerd renovatieproces zonder overkoepelend plan van aanpak.....	14
Figuur 9: Schematische voorstelling gefaseerd renovatieproces met een overkoepelend plan van aanpak.....	15
Figuur 11: milieu-impact renovatiescenario's voor verschillende impact indicatoren	24
Figuur 12: Jaarlijks primair operationeel energiegebruik na verschillende renovatiemaatregelen en met verschillende verwarmingssystemen	26
Figuur 13: Invloed van het verwarmingssysteem op de cumulatieve niet-hernieuwbare energievraag van de casestudy	27
Figuur 14: Algemene structuur van een levenscyclusanalyse	31
Figuur 15: Overzicht van de verschillende levenscyclusfasen en systeemgrenzen van een gebouw .	33
Figuur 16: Principe cut-off methode	35
Figuur 17: Afbakening systeemgrenzen voor de vergelijkende LCA tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie	37
Figuur 18: Overzicht van de impactcategorieën in de ReCiPe 2016 methodologie en hun relatie tot de beschermingsgebieden	40
Figuur 19: Snede casestudy rijwoning.....	41
Figuur 20: Plannen casestudy rijwoning	42
Figuur 21: Gevels casestudy rijwoning	42
Figuur 22: Opbouw schildelen casestudy - bestaande toestand	44
Figuur 23: Forfaitaire toeslag op de U-waarde van de gebouwschil omwille van extra warmteverlies ter plaatse van bouwknoopen. In functie van compactheid van het gebouw en gekozen berekeningsmethode.....	47
Figuur 24: Prioritair te behandelen bouwdetails op basis van luchtdichtheid	48

Figuur 25: Invloed van de renovatie van schildelen op de reductie van het lekdebiet bij een drukverschil van 50 Pa (v_{50})	49
Figuur 26: Opbouw schildelen casestudy - gerenoveerde toestand	51
Figuur 26: Opbouw schildelen casestudy - gerenoveerde toestand	51
Figuur 28: Tijdlijn referentiescenario en renovatiescenario's bij basisaannames	54
Figuur 29: Milieu-impact per schildeel op elementniveau	57
Figuur 30: Materiaalimpact van de gebouwschilonderdelen in referentie en renovatiescenario	58
Figuur 31: Vergelijking van de milieu-impact van de opwekkers en opslagvaten voor RVW en sanitair warm water	61
Figuur 32: Vergelijking van de milieu-impact van de verschillende ventilatiesystemen	62
Figuur 33: Jaarlijkse milieu-impact bij referentiescenario, totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames. De renovatiescenario's worden uitgevoerd met maatregelenpakket 4	63
Figuur 34: Cumulatieve milieu-impact bij referentiescenario, totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames	65
Figuur 35: Detail 1 uit Figuur 34	66
Figuur 36: Detail 2 uit Figuur 34	67
Figuur 37: Totale milieu-impact bij totaalrenovatie en gefaseerde renovatie volgens de basisaannames	68
Figuur 38: Milieu-impact casestudy over 60 jaar na isolatie van één van de schildelen aan het begin van de studieperiode	72
Figuur 39: Vergelijking warmtevraag in ruimtes wanneer gebouwschil volledig geïsoleerd is ten opzichte van situatie waarin elk schildeel behalve de vloer geïsoleerd is	73
Figuur 40: Beslissingsproces optimale renovatievolgorde in functie van milieu-impact	74
Figuur 40: Beslissingsproces optimale renovatievolgorde in functie van milieu-impact	75
Figuur 41: Beslissingsproces slechtste renovatievolgorde in functie van milieu-impact	77
Figuur 42: Invloed van de uitvoeringsvolgorde op de cumulatieve milieu-impact van een gefaseerde renovatie	79
Figuur 43: Vergelijking van de totale milieu-impact van totaalrenovatie en gefaseerde renovatie met meest optimale en de meest negatieve uitvoeringsvolgorde van de renovatiemaatregelen	80
Figuur 44: Groepering van renovatiemaatregelen tot renovatiestappen bij een gefaseerde renovatie	81
Figuur 45: Schematische planning gefaseerde renovatie waarbij renovatiemaatregelen samengenomen worden en vervroegd of uitgesteld uitgevoerd worden	82
Figuur 46: Invloed van het tegelijk uitvoeren van renovatiemaatregelen op de cumulatieve milieu-impact van een gefaseerde renovatie	83
Figuur 47: Vergelijking milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie waarbij renovatiemaatregelen tegelijk uitgevoerd worden	84

Figuur 48: Schematische planning gefaseerde renovatie met een kortere periode tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen.....	86
Figuur 49: Invloed van de renovatiesnelheid op de milieu-impact van een gefaseerde renovatie.....	86
Figuur 50: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie	88
Figuur 51: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij uitvoeringsvolgorde en de tijd tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie	90
Figuur 52: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij het aantal renovatiestappen en de tijd tussen uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie	91
Figuur 53: Milieu-impact van een totaalrenovatie ten opzichte van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen kunnen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie	94
Figuur 54: Vergelijking E-peil en milieu-impact bij verschillende renovatiescenario's	96
Figuur 55: Evolutie E-peil en EPC-label bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames of waarbij één variabele gewijzigd wordt.....	98
Figuur 56: Milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie bij andere optie voor bouwknopen	101
Figuur 57: Milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie bij andere aanname voor finale luchtdichtheid	103
Figuur 58: Schematische voorstelling verschillende beschouwde woningtypologieën	105
Figuur 59: Vergelijking milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames voor verschillende beschouwde gebouwtypologieën.....	106
Figuur 60: Vergelijkende analyse optimale renovatievolgorde van de gebouwschil voor de beschouwde gebouwtypologieën	109
Figuur 61: Vergelijking totale milieu-impact gefaseerde renovatie waarvan renovatiemaatregelen volgens basisaannames uitgevoerd zijn en waarvan ze in de optimale volgorde uitgevoerd zijn....	109
Figuur 62: Vergelijking totaalrenovatie en gefaseerde renovatie aan de hand van milieu-impact (milieupunten) en aan de hand van klimaatveranderingspotentieel (kg CO ₂ eq).....	111
Figuur 63: Vergelijking totale milieu-impact in totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames bij de standaard elektriciteitsmix, een groenere en een meer vervuilende elektriciteitsmix.....	114

Lijst van tabellen

Tabel 1: Verschil tussen een traditionele vergelijkende LCA-studie en vergelijkende LCA-studie met totaalrenovatie en gefaseerde renovatie.....	5
Tabel 2: schatting renovatieactiviteit aan woningen op basis van de 6%-btw aangifte van Vlaamse bouwbedrijven in 2018.....	8
Tabel 3: Bijdrage operationeel energiegebruik aan totale milieu-impact voor verschillende woningtypologieën en isolatiegraad in België	19
Tabel 4: Overzicht LCA-studies: algemene informatie	21
Tabel 5: Overzicht LCA-studies: systeemgrenzen en indicatoren.....	22
Tabel 6: Thermische eigenschappen van de casestudy voor en na renovatie	26
Tabel 7: Afbakening systeemgrenzen voor de vergelijkende LCA tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie	36
Tabel 8: CEN- en CEN+-indicatoren	38
Tabel 9: Oppervlaktes gebouwschildelen	43
Tabel 10: E-peil, EPC-label en afkorting voor de beschouwde maatregelenpakketten	53
Tabel 11: Gebruikte afkortingen gebouwschildelen	56
Tabel 12: Vergelijking gewicht opwekkers voor RVW en sanitair warm water uit de ecoinvent databank en van commercieel beschikbare installaties	60
Tabel 13: Periode waarover een totaalrenovatie uitgesteld moet worden zodat milieu-impact totaalrenovatie gelijk wordt aan de milieu-impact van een gefaseerde renovatie.	66
Tabel 14: Optimale renovatievolgorde in functie van milieu-impact.....	75
Tabel 15: Optimale renovatievolgorde met praktische aanpassingen	75
Tabel 16: Meest negatieve renovatievolgorde in functie van milieu-impact.....	76
Tabel 17: Meest negatieve renovatievolgorde met praktische aanpassingen	78
Tabel 18: Te behalen EPC-label na eigendomsoverdracht.....	97
Tabel 19: Overzicht oppervlaktes gebouwschildelen verschillende beschouwde woningtypologieën	105
Tabel 20: Invloed renovatie schildelen op afname lekdebiet v_{50}	105
Tabel 21: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de verschillende beschouwde gebouwtypologieën	108
Tabel 22: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt op basis van de optimale uitvoeringsvolgorde ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de verschillende gebouwtypologieën	110
Tabel 23: Toename impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie op basis van milieu-impact en klimaatveranderingspotentieel	113

Tabel 24: Milieu-impact gebruikte elektriciteitsmixen	114
Tabel 25: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de Belgische, een meer vervuilende en een groenere elektriciteitsmix.	115
Tabel 26: Ontwerpwarmtebelasting van de casestudy in verschillende scenario's	xiii
Tabel 27: Vermogen van de opwekker voor RVW en SWW in verschillende scenario's	xiv
Tabel 28: Ventilatie debieten in de casestudy	xiv

Lijst van afkortingen

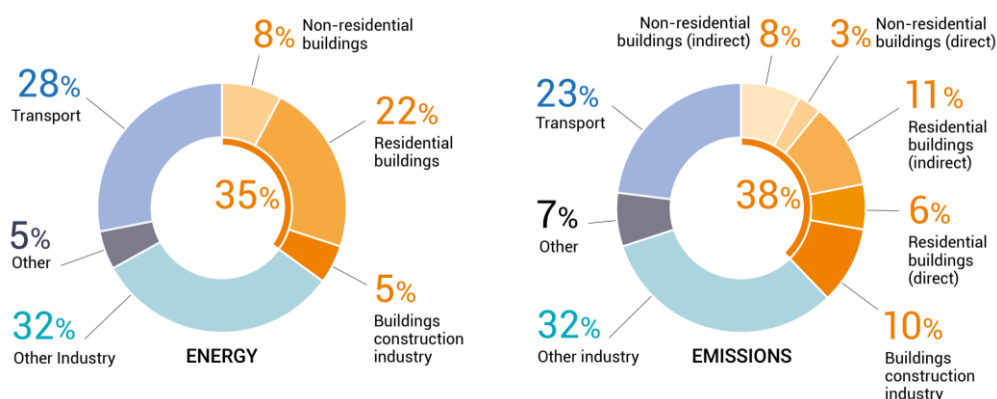
CEN	Europees Normalisatie Comité
D	Buitendeur
DLCA	Dynamische levenscyclusanalyse
EPB	Energieprestatie en binnenklimaat
EPC	Energie Prestatie Certificaat
EU	Europese Unie
G	Gevel
GM	Gemene muur
GWO	Grote Woononderzoek
GWP	Klimaatveranderingspotentieel
HD	Hellend dak
IER	Ingrijpende Energetische Renovatie
ISO	International Organisation for Standardization
LCA	Levenscyclusanalyse
LCC	Life Cycle Cost analysis
LCI	Levenscyclusinventarisatie
LCIA	Levenscyclusimpactanalyses
LTV	Lage temperatuurverwarming
MMG	Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouwen
NBN	Bureau voor Normalisatie
OE	Operationeel energiegebruik
OVAM	Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij
Pak	Maatregelenpakket
PD	Plat dak
PV	fotovoltaïsch
R	Ramen
ref	Referentiescenario
REG	Rationeel Energiegebruik
reno	Renovatiescenario
RVW	Ruimteverwarming
SBR	Stichting Bouwresearch
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
SWW	Sanitair warm water
TOTEM	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
TV	Technische Voorlichting
V	Vloer op volle grond
VEKA	Vlaams Energie- en Klimaatagentschap
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf

1 Inleiding

Sinds de jaren 80 is klimaatverandering gekend als een urgent probleem en ook vandaag staat het hoog op de politieke agenda. Vanaf de industriële revolutie is de energiebehoefte van de mens toegenomen en worden er steeds meer broeikasgassen zoals CO₂, CH₄ en N₂O uitgestoten om aan die groeiende energiebehoefte te voldoen. Dit zorgt ervoor dat het natuurlijke broeikaseffect versterkt wordt. Hierdoor warmt de aarde op, wat grote gevolgen heeft: zo komt de biodiversiteit onder druk te staan en zullen er vaker extreme weersomstandigheden voorkomen, wat kan leiden tot voedsel- en drinkwatertekorten. Het beperken van de uitstoot van broeikasgassen – en dus van de klimaatverandering – is één van de grootste uitdagingen waarmee de mensheid te kampen heeft.

1.1 Relevantie voor de bouwsector

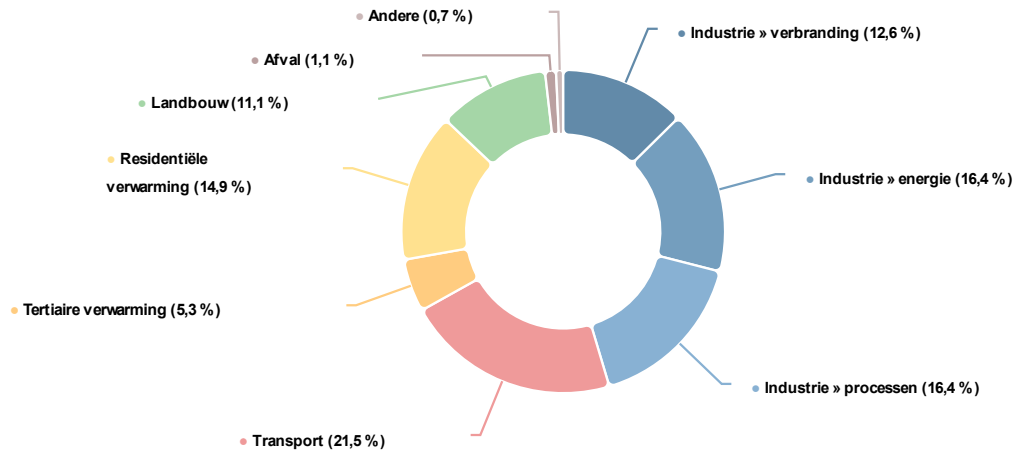
Momenteel is het grootste deel van de CO₂-emissies te wijten aan de bouwsector: in 2019 is 38% van de wereldwijde CO₂-uitstoot afkomstig uit de bouwsector. Dit gaat om de uitstoot van de constructie-industrie bij de productie van de materialen (10%), maar ook om de directe uitstoot bij operationeel energiegebruik (9%) en de indirecte uitstoot bij productie van elektriciteit (19%) (United Nations Environment Programme, 2020).



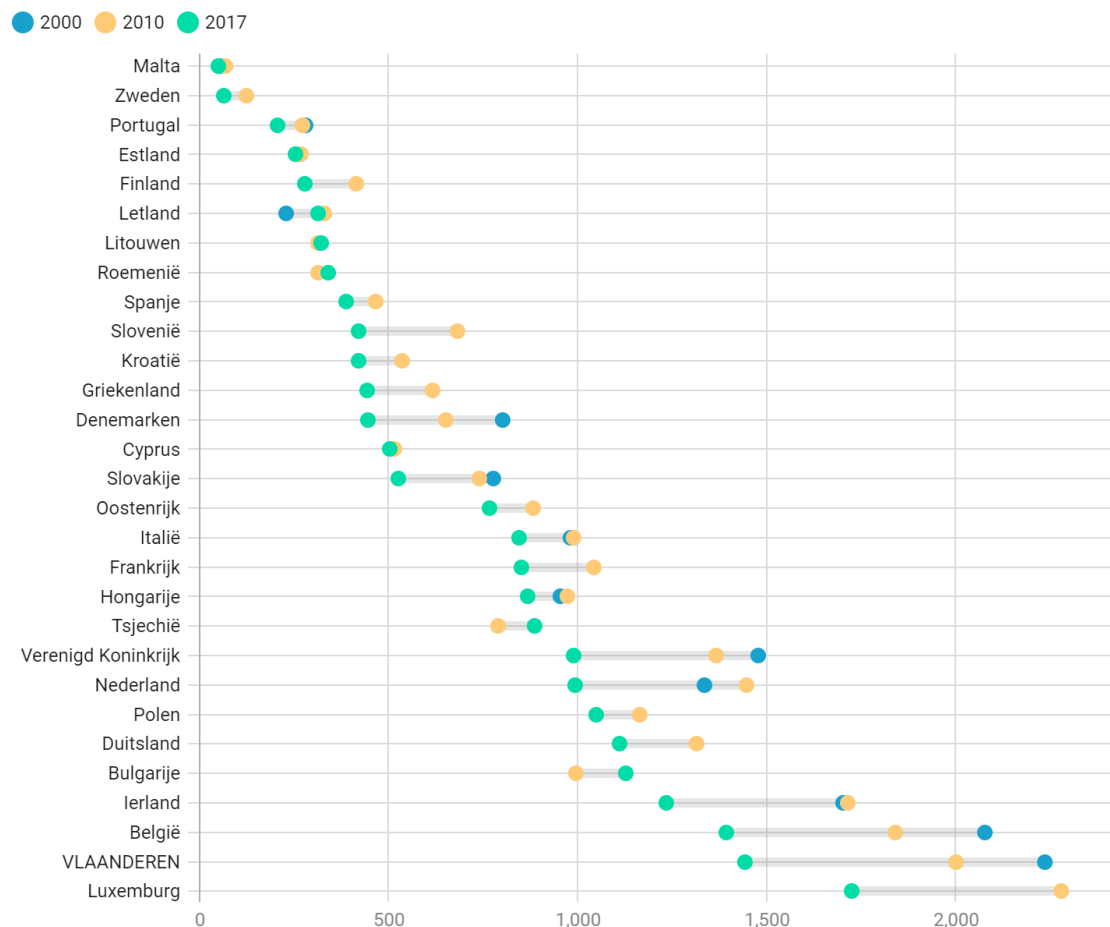
Figuur 1: Primair energiegebruik en energie-gerelateerde CO₂-emissies per sector (2019) – globaal (United Nations Environment Programme, 2020)

Ook in ons land draagt de bouwsector in grote mate bij aan de opwarming van de aarde: volgens de laatste vaststelling in 2021 is 14,9% van de totale uitstoot van broeikasgassen in België te wijten aan de verwarming in residentiële gebouwen (Klimaat.be, 2021). Dat is niet alleen meer dan het globale gemiddelde, maar deze uitstoot is ook groot ten opzichte van huishoudens in andere Europese landen, zoals uit Figuur 3 blijkt (Departement Omgeving Vlaanderen, 2019). Het grote energiegebruik voor verwarming is deels te verklaren door het verouderde Belgische gebouwenpark.

Volgens cijfers van Statbel (2022) dateert 59% van de Belgische woningen van voor 1970. Bovendien speelt de gebouwtypologie een rol. In 2021 woont slechts 22,3% van de Belgische bevolking in een appartement, terwijl dat in Europa gemiddeld 46,3% is. In ons land zijn er dus relatief veel vrijstaande woningen, halfopen bebouwingen en rijwoningen en relatief weinig appartementen ten opzichte van het Europese gemiddelde. Deze woningen hebben gewoonlijk een groter verliesoppervlak en bijgevolg een grotere warmtevraag (Eurostat, 2022).



Figuur 2: Emissie van broeikasgassen per sector (2021) – België (Klimaat.be, 2021)



Figuur 3: Residentiële uitstoot van broeikasgassen in Europa in kg CO₂-equivalent per inwoner (Departement Omgeving Vlaanderen, 2019)

Om de uitstoot van de bouwsector te beperken, moet het gebouwenpark energie-efficiënter worden. Voor de residentiële sector kunnen hiervoor twee strategieën gevolgd worden: de bouw van energie-efficiënte nieuwbouwwoningen en de energetische renovatie van bestaande woningen. Beide strategieën zullen ingezet worden om het gebouwenpark te moderniseren.

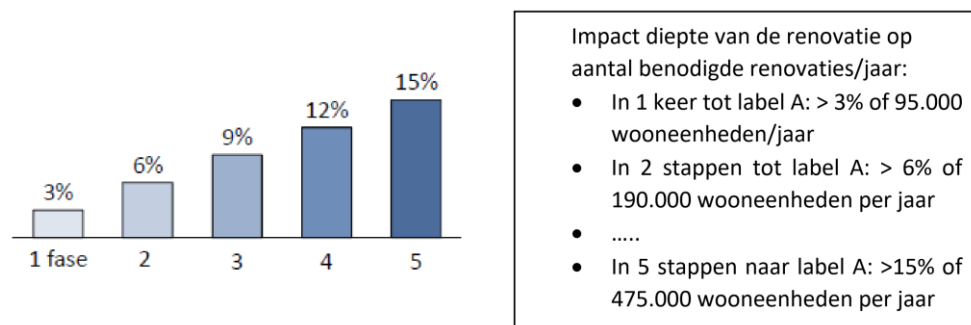
1.2 Klimaatdoelen

Om de klimaatcrisis het hoofd te bieden, is het essentieel om de broeikasgasemissies te verminderen. Verschillende instanties leggen doelstellingen vast om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Het 'Akkoord van Parijs', vastgelegd in 2016, is het eerste mondiale, juridisch bindende klimaatverdrag. Momenteel hebben 195 landen deze overeenkomst ondertekend. In dit akkoord wordt afgesproken om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C boven het pre-industriële niveau. Als streefdoel wordt 1,5°C vastgelegd. In 2019 is door de Europese Unie (EU) de 'EU Green Deal' goedgekeurd. Hiermee hebben alle deelstaten van de EU zich ertoe verbonden om het Europese continent klimaatneutraal te maken tegen 2050. Er is ook een tussentijdse mijlpaal vastgelegd: in 2030 moeten de emissies met 55% gedaald zijn ten opzichte van 1990. Om deze doelstellingen te halen, moeten er telkens nieuwe maatregelenpakketten ingevoerd worden. Elke lidstaat heeft de verantwoordelijkheid om zich hiervoor in te zetten en zelf plannen op te stellen (Klimaat.be, 2022).

In de Europese en Belgische beleidsplannen wordt zwaar ingezet op de bouwsector, zo ook in de *Vlaamse Klimaatstrategie 2050* (Vlaamse Regering, 2019). Hierin wordt voorgesteld om de emissies van het Vlaamse gebouwenpark te reduceren tot 2,3 Mt CO₂-equivalent tegen 2050. Daarna zouden de inspanningen doorgezet worden om het gebouwenpark na 2050 zo snel mogelijk klimaatneutraal te maken. Om deze doelstelling te realiseren, moet er gefocust worden op verschillende elementen:

- Verhogen van de energieprestatie van de gebouwschil en de installaties. De gemiddelde energiescore op het energieprestatiecertificaat (EPC) van de Vlaamse gebouwen moet 100 kWh/m² zijn. Dit komt overeen met een EPC-label A. Men wil dit bereiken door het woningpark grondig te renoveren en waar nodig te slopen en heropbouwen.
- Verhoogde focus op ruimtelijke aspecten en efficiënter gebruik van het gebouwenpark.
- Ontwikkeling en implementatie van hernieuwbare energie en technologieën zonder lokale uitstoot. Om de restvraag aan energie op te vangen, moet ook de energievoorziening voor gebouwen verduurzaamd worden.
- Verlagen van de koolstof- en materialenvoetafdruk.

De ‘Vlaamse Klimaatstrategie 2050’ blijft echter vrij algemeen. In de ‘Langetermijnstrategie voor de Renovatie van Vlaamse Gebouwen’ (Vlaamse Regering, 2020) – ook wel het ‘Renovatiepact’ genoemd – wordt het beleid voor het Vlaamse gebouwenpark verder uitgewerkt. Hierbij wordt gefocust op het verbeteren van de energieprestatie van het gebouwenbestand en het verhogen van de renovatiegraad. Deze moet gemiddeld op 3% liggen om de doelstellingen te halen, wat betekent dat jaarlijks 3% van de woningen of 95 000 wooneenheden naar EPC-label A gerenoveerd moeten worden. Zoals geïllustreerd wordt in Figuur 4, zullen er jaarlijks in een groter aantal woningen renovatiewerken ondernomen moeten worden indien eigenaars ervoor kiezen om in meerdere fases te renoveren.



Figuur 4: Relatie tussen aantal renovatiefases richting langetermijndoelstelling en jaarlijks aandeel te renoveren woningen (Vlaamse Regering, 2020)

Momenteel is de renovatiegraad in België echter zo’n 0,8%. Daar komt nog bij dat er meer kleine dan diepe energetische renovaties gedaan worden. Aan dit tempo zou slechts 30% van de gebouwen voldoende energie-efficiënt zijn tegen 2050. Vlaanderen wil de renovatiegraad verhogen door het potentieel van sleutelmomenten, zoals een huurders- of eigenaarswissel, systematisch te benutten. De bevolking zal dus gemotiveerd of verplicht worden om renovatiewerken uit te voeren op deze sleutelmomenten (Vlaamse Regering, 2020). Zo is het vanaf 1 januari 2023 verplicht voor nieuwe eigenaars van een woning met EPC-label E of F om de woning binnen de vijf jaar na overdracht te renoveren tot EPC-label D. Deze renovatieverplichting zal stapsgewijs strenger worden. Op die manier zullen gebouwen met de slechtste EPC-labels stelselmatig uitgefaseerd worden (Vlaamse Regering, 2022).



Figuur 5: Evolutie van de renovatieverplichting voor woningen. Bij appartementen is het tijdsverloop verschillend: hier geldt de renovatieverplichting tot EPC-label B en A respectievelijk vanaf 2040 en 2045 (Vlaanderen.be, s.d.-a)

1.3 Doelstelling en onderzoek

De laatste jaren is er veel onderzoek gedaan naar de milieu-impact van verschillende renovatiescenario's. Dit gebeurt gewoonlijk aan de hand van een levenscyclusanalyse (LCA). Wanneer verschillende renovatiescenario's met elkaar vergeleken worden, wordt de renovatie meestal gesimuleerd als een eenmalige ingreep. Alle energiebesparende maatregelen worden hierbij op één moment uitgevoerd, daarna gebeuren er enkel nog vervangingen. In deze studies wordt voornamelijk de invloed van de toegepaste renovatiemaatregelen onderzocht.

In de realiteit blijkt dat er echter vaak een gefaseerde renovatiemethode toegepast wordt en ook in beleidsplannen wordt deze gefaseerde aanpak als een legitieme optie beschouwd. Toch is er nog weinig of geen LCA-onderzoek gepubliceerd waarin de invloed van de gefaseerde renovatiestrategie expliciet onderzocht wordt. Het is belangrijk om hier een zicht op te krijgen, want er is wel degelijk een verschil tussen de totaalrenovatie en de gefaseerde aanpak wanneer men deze zou vergelijken op vlak van milieu-impact: zoals geïllustreerd in Tabel 1, is niet enkel het maatregelenpakket een variabele, maar ook de manier waarop de gefaseerde renovatie gepland is. Bij een gefaseerde renovatie kan er namelijk heel wat variatie zitten in de volgorde waarin de renovatiemaatregelen uitgevoerd worden, de periode tussen de renovatiestappen en het aantal stappen waarin de renovatie uitgevoerd wordt. Deze variabelen hebben allemaal een invloed op de milieu-impact.

	Variabelen			
	Renovatie- maatregelen	Volgorde uitvoering	Aantal renovatie- stappen	Periode tussen renovatiestappen
Traditionele vergelijkende LCA- studie	X			
Vergelijkende LCA-studie met totaal- en gefaseerde renovatie	X	X	X	X

Tabel 1: Verschil tussen een traditionele vergelijkende LCA-studie en vergelijkende LCA-studie met totaalrenovatie en gefaseerde renovatie

Deze masterproef tracht te onderzoeken wat de invloed van de gefaseerde renovatiestrategie is op de milieu-impact van een eengezinswoning. Hiervoor zullen een aantal onderzoeksvragen beantwoord worden:

- Wat zijn de verschillen tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie en welke parameters hebben invloed op de milieu-impact van een gefaseerde renovatie?
- In welke levenscyclusfasen verschilt de milieu-impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie?
- Hoe wordt de milieu-impact een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie beïnvloed door de beschouwde renovatiemaatregelen?
- In welke mate beïnvloedt de planning van de gefaseerde renovatie de milieu-impact?
- Is het behaalde energieprestatieniveau een indicatie voor de grootte van de milieu-impact?

Deze masterproef start met een literatuurstudie, deze beslaat hoofdstuk 2 en 3. In het eerste deel van de literatuurstudie wordt onderzocht hoe er in de praktijk gerenoveerd wordt en wat de belangrijkste verschillen zijn tussen gefaseerde renovatie en totaalrenovatie. In het tweede deel worden bestaande LCA-studies die focussen op de energetische renovatie van gebouwen, geanalyseerd.

In het onderzoekluik van deze masterproef wordt een LCA-methodologie opgesteld die als doel heeft om de milieu-impact van een gefaseerde renovatie te vergelijken met deze van een totaalrenovatie (hoofdstuk 4). Vervolgens wordt deze methodologie toegepast op een specifieke casestudy en met vier verschillende pakketten van renovatiemaatregelen. Deze worden in hoofdstuk 5 beschreven. Daarna zal de milieu-impact van deze casestudy in het geval van een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie berekend worden. In hoofdstuk 6 wordt voor de gefaseerde renovatie een renovatieplanning, die opgesteld is op basis van een aantal veronderstellingen, aangenomen. In hoofdstuk 7 worden deze veronderstellingen gewijzigd, waardoor de invloed van de planning op de milieu-impact van de gefaseerde renovatie begroot kan worden. In hoofdstuk 8 wordt er teruggekoppeld naar de inzichten uit de literatuurstudie en naar relevante regelgeving om de resultaten in context te plaatsen. Ten slotte wordt de robuustheid van het onderzoek getest in een gevoeligheidsanalyse. Dit gebeurt in hoofdstuk 9.

2 Energetische renovatie in de praktijk

De energetische renovatie van gebouwen kan op verschillende manieren aangepakt worden. Maia et al. (2021) onderscheiden hier een aanpak waarbij alle renovatiemaatregelen in één keer uitgevoerd worden en een aanpak waarbij verschillende maatregelen op verschillende tijdstippen uitgevoerd worden. De twee strategieën zullen in deze masterproef respectievelijk de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie genoemd worden. Bij gefaseerde renovatie kan nog een onderscheid gemaakt worden: er kan gekozen worden voor een aanpak waarin ruimte per ruimte, maatregel per maatregel of stap per stap gewerkt wordt. Bij 'stap per stap' bedoelt men dat er telkens een aantal renovatiemaatregelen tegelijk, en dus in één stap, uitgevoerd worden.

In dit hoofdstuk wordt eerst toegelicht hoe men in de praktijk renoveert en welke bestaande drempels ervoor zorgen dat de stap om een energetische renovatie uit te voeren groot is. Daarna wordt het verschil tussen een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie besproken. Uiteindelijk zullen ook enkele praktische aanbevelingen voor een gefaseerde renovatie uit de doeken gedaan worden.

2.1 Renoveren in de praktijk

2.1.1 Renovatieactiviteit meten

In België zijn er verschillende mogelijkheden om de renovatieactiviteit voor woningen te meten. Vastmans & Buyst (2019) onderzochten hoe de 6% btw-aangifte gebruikt kan worden als indicator voor de renovatie-activiteit en vergeleken dit met de informatie die gehaald kan worden uit de renovatievergunningen, verbouwingskredieten en woonsurveys.

De 6% btw-aangifte kan een goede indicator zijn voor de renovatieactiviteit van woningen, want in de bouwsector geldt er een verlaagd btw-tarief van 6% voor de volgende diensten en producten:

- renovatiewerken aan privéwoningen ouder dan 10 jaar;
- afbraak en heropbouw van gebouwen voor privéwoningen in stadsgebieden;
- nieuwbouw, enkel op de eerste schijf van 50 000 euro (tussen 2009 en 2010);
- huisvesting in het kader van het sociaal beleid, enkel voor sociale huisvestingsmaatschappijen;
- werken in onroerende staat aan privéwoningen voor gehandicapten;
- werken aan schoolgebouwen (vanaf 1 januari 2016)

Het is echter niet mogelijk om de exacte omzet van de bouwsector voor renovaties van privéwoningen te bepalen aan de hand van de 6% btw-aangifte. Ze wordt namelijk niet alleen gebruikt voor facturaties van bouwondernemingen aan particulieren, maar ook voor facturaties aan ondernemingen zonder btw-nummer. Bovendien geldt het verlaagde btw-tarief niet enkel voor renovatiewerken aan woningen, maar ook voor een aantal andere diensten. Toch zou volgens Vastmans & Buyst (2019) het grootste deel van de 6% btw-aangiftes wel degelijk afkomstig zijn van de renovatie van privéwoningen. De auteurs stellen dus dat er een vrij accurate inschatting gemaakt kan worden en dat er een aantal algemene conclusies getrokken kunnen worden. Zo schatten ze op basis van de 6% btw-aangifte dat de Vlaamse huishoudens in 2018 iets meer dan 6 miljard euro aan renovatie en onderhoud van woningen uitgaven. Op basis van bepaalde codes in de btw-aangiftes, kan ook ingeschat worden welke types werken voornamelijk uitgevoerd worden: de algemene bouw van residentiële gebouwen, de installatie van schrijnwerk en de installatie van verwarming, klimaatregeling en ventilatie zijn de drie categorieën met de grootste omzet.

6%-btw-omzet (mia euro)	6,87
Sloop en heropbouw	0,1
Scholen	0,3
Werken privéwoningen gehandicapten (nieuwbouw)	0,05
Sociale woningen (nieuwbouw)	0,15
Renovatie-activiteiten privéwoningen	6,27
Te verdelen over	
- Sociale huisvestingsmaatschappijen (enkel renovatie & onderhoud bij SHM's zonder btw-nummer)	
- Renovatie-activiteiten privéwoningen	

Tabel 2: schatting renovatieactiviteit aan woningen op basis van de 6%-btw aangifte van Vlaamse bouwbedrijven in 2018 (Vastmans & Buyst, 2019)

De renovatieactiviteit van woningen wordt ook vaak ingeschat op basis van renovatievergunningen. Vastmans & Buyst (2019) vergeleken deze indicator met de 6% btw aangifte en kwamen tot de conclusie dat beide indicatoren globaal in dezelfde lijn liggen. Een nadeel hierbij is echter dat men niet voor elke renovatie-ingreep een vergunning nodig heeft. Vooral bij veranderingen van het bouwvolume en grote ingrepen moet er een vergunning aangevraagd worden. Dit maakt dat de renovatievergunningen een minder goede indicator zijn om uitspraken te kunnen doen over het energetische renovatietempo.

Een andere mogelijke indicator voor de renovatieactiviteit bij woningen zijn de uitgekeerde verbouwingskredieten. De informatie die hieruit gehaald kan worden, is opnieuw minder volledig: er is enkel een indicatie van het budget dat gespendeerd is aan renovaties van woningen, maar niet van het type werken dat effectief uitgevoerd wordt. Deze informatie kan wel uit de 6% btw-aangiftes gehaald worden. Bovendien blijkt uit een rapport in opdracht van de Europese Commissie (2019) dat 72% van de huiseigenaars zelf hun verbouwing financiert. Ook de verbouwingskredieten schetsen dus een onvolledig beeld.

Ten slotte kan men volgens Vastmans & Buyst (2019) op basis van enquêtes achterhalen wat de energetische kenmerken zijn van de woningvoorraad. Door verschillende onderzoeken te combineren, kan er vrij accuraat ingeschat worden hoe vaak elk type renovatie uitgevoerd is in een bepaalde periode. Zo besluiten de auteurs op basis van de resultaten uit het Grote Woononderzoek (GWO) uit 2013 en de woonsurvey uit 2018 dat in de periode van 2013 tot 2018 bij minstens 7% van de woningen enkel glas vervangen is door dubbel of driedubbel glas, bij 8% het dak (bijkomend) geïsoleerd is en bij 7% hernieuwbare energie geïmplementeerd is. Het blijft echter onduidelijk welke van deze renovaties binnen eenzelfde woning gebeurden en welke niet.

De 6% btw-aangifte en de enquêtes schetsen dan wel het meest volledige beeld van de renovatieactiviteit in woningen, ook hier blijkt het moeilijk om het aantal energetische renovaties en de manier waarop er energetisch gerenoveerd wordt accuraat te meten. Op basis van de beschikbare indicatoren is het momenteel onmogelijk om antwoord te geven op vragen als “Welke woningen worden eerst gerenoveerd?”, “Hoe worden renovaties in de praktijk aangepakt?” en “Welke onderdelen worden het eerst gerenoveerd?”. Vastmans & Buyst (2019) stellen wel een methode voor om die data te verkrijgen: de tweejaarlijkse REG (Rationeel Energiegebruik)-enquêtes zouden longitudinaal bevestigd moeten worden. Op die manier zou men een vast staal van woningen kunnen opvolgen doorheen de tijd.

2.1.2 Hoe wordt er gerenoveerd?

Ondanks de moeilijkheid om de renovatie-activiteit op een accurate manier te meten, heeft de Europese Commissie (2019) geprobeerd om te achterhalen hoe en waarom men precies renoveert. Dit is gebeurd op basis van een ondervraging van 30 118 eigenaars, waarvan er 18 302 al geïnvesteerd hebben in een energetische renovatie van hun woning. Uit de ondervraging blijkt dat, in de residentiële sector, meer dan 90% van de energiebesparende maatregelen in combinatie met een niet-energiebesparende maatregel uitgevoerd worden. Slechts 2,8% van de investeerders heeft bij een energetische renovatie het verbeteren van een slechte energieprestatie als hoofddoel. De meeste huiseigenaars voeren dus geen energiebesparende maatregelen uit omdat ze energie willen besparen, maar doen het tegelijk met een andere ingreep.

Een soortgelijke conclusie kan getrokken worden wanneer men de renovatiegraad onderzoekt. Verder in het rapport van de Europese Commissie (2019) wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende renovatiedieptes op basis van de gerealiseerde energiebesparing: als de energiebesparing groter is dan 60%, wordt er gesproken van een diepe renovatie, een gemiddelde renovatie zorgt voor een energiebesparing tussen 30 en 60%, bij een energiebesparing tussen de 3 en 30% spreekt men van een lichte renovatie en renovaties waarbij de energiebesparing kleiner is dan 3%, worden niet meer als energetische renovaties beschouwd. Wanneer men dan de renovatiegraad van elk type renovatie bekijkt, blijkt dat jaarlijks slechts 0,2% van de bebouwde oppervlakte in de EU – maar ook in België – een diepe renovatie ondergaat. Tijdens diezelfde periode is in België 15,6% van

de bebouwde oppervlakte gerenoveerd, al is de energiebesparing voor 7,8% van de bebouwde oppervlakte verwaarloosbaar. Ook hier valt het dus op dat er vandaag slechts sporadisch diepe energetische totaalrenovaties gebeuren. De helft van de renovaties had een verwaarloosbare impact op het energiegebruik. De andere helft van de renovaties worden als individuele of gefaseerde maatregelen uitgevoerd, met telkens een vrij kleine impact op het energiegebruik.

Niet enkel uit de enquête in opdracht van de Europese Commissie blijkt dat gefaseerde renovaties in de praktijk vaak voorkomen, ook andere bronnen suggereren dit. Zo wordt het als een legitieme optie naar voren geschoven in beleidsplannen; denk hierbij aan de verplichte renovatie tot EPC-label D bij aankoop van een energieverblindende woning vanaf 2023 en de stapsgewijze verstrenging van deze verplichting die in deel 1.3 aangehaald werd (Vlaamse Regering, 2022). Ook Fawcett (2014) beargumenteert dat een gefaseerde energetische renovatie beter aansluit bij de manier waarop de meeste huiseigenaars andere werken in de woning aanpakken dan een energetische totaalrenovatie. Huiseigenaars zouden namelijk veel vaker 'home improvement'-maatregelen en onderhoud uitvoeren dan dat ze verhuizen. Tijdens de periode dat de eigenaars in een woning wonen, zullen er dus verschillende momenten zijn waarop ze relatief beperkte werken uitvoeren. Deze aanpak is heel gelijkaardig aan de planning van een gefaseerde energetische renovatie. Slechts de helft van de huiseigenaars zou daarentegen ooit een heel intensieve renovatie uitvoeren.

2.1.3 Drempels voor de uitvoering van een energetische renovatie

Er zijn verschillende redenen waarom huiseigenaars geen energetische renovatie uitvoeren. In de literatuur worden deze onderverdeeld in drie categorieën: de financiële drempel, de informatiedrempel en de drempel om beslissingen te nemen (Wilson et al., 2015).

De eerste drempel is de financiële: het kostenplaatje van een energetische renovatie is niet te onderschatten. In het rapport van de Europese Commissie (2019) geeft 78% van de eigenaars aan geen lening te willen aangaan voor de uitvoering van een energetische renovatie en van de mensen die energetische renovaties uitvoerden, blijkt 72% deze zelf gefinancierd te hebben. 18% ervan is (ook) een commerciële lening aangegaan en 8% heeft (ook) geleend bij vrienden of familie. Ongeveer één vijfde van de huishoudens geeft aan dat vooral de toegang tot budget de aanleiding is geweest om een renovatie uit te voeren. Uit onderzoek van Albrecht & Hamels (2021) blijkt dat ongeveer de helft van de Belgische huishoudens financieel niet in staat is om een energetische renovatie uit te voeren, hetzij in één stap, hetzij gefaseerd. Hieruit concluderen de auteurs dat de financiële drempel aanzienlijk is, maar dat er ook nog andere drempels zijn. Ondanks het feit dat de helft van de Belgische huishoudens in theorie wél een energetische renovatie kan financieren, blijkt namelijk uit de lage renovatiegraad dat slechts een heel klein deel dit doet.

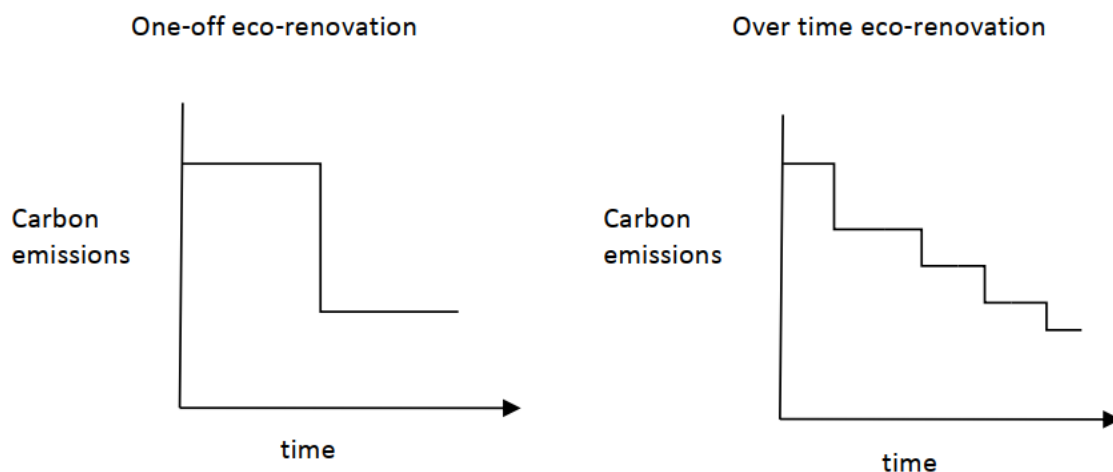
De informatiedrempel is een tweede reden waarom heel wat huiseigenaars afzien van een energetische renovatie. Uit de tweejaarlijkse REG-enquête is in 2017 gebleken dat ongeveer de helft van de huiseigenaars hun woning niet verder isoleren omdat ze oordelen dat dit niet nodig is, omdat

het technisch moeilijk is of omdat ze geen tijd hebben. Van den Broeck (2019) stelt dat dit aangepakt zou kunnen worden door duidelijke informatie te verspreiden over de verwachte effecten van energetische renovatie en de beoogde normen of door een vorm van ontzorging en technische bijstand door specialisten. Met de campagne 'BENOveren' die eind 2016 door de Vlaamse Overheid opgestart is, probeert men huiseigenaars alvast te informeren en te overtuigen van het nut van een energetische renovatie. Uit de REG-enquête van 2019 is bovendien gebleken dat een gebrek aan duidelijkheid over financiële kosten en baten van energetische renovatiemaatregelen een grote drempel is om renovaties uit te voeren (72%). Ook duidelijkheid over toekomstige regelgeving weerhoudt mensen ervan om te renoveren (70%).

De derde drempel voor energetische renovatie is eerder psychologisch en bestaat uit de cognitieve last om grote beslissingen te nemen. Ook het vooruitzicht op hinder en het eerder vermelde gebrek aan tijd zorgt ervoor dat er vaak niet beslist wordt om energetisch te renoveren (Wilson et al., 2015).

2.2 Het verschil tussen gefaseerde renovatie en totaalrenovatie

Het is duidelijk dat er wel degelijk gefaseerd gerenoveerd wordt, maar ook totaalrenovatie komt voor in de praktijk. In dit onderdeel zal zowel de gefaseerde renovatie als de totaalrenovatie onder de loep genomen worden. Het grote verschil tussen een energetische totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie is de manier waarop een energiebesparing gerealiseerd wordt. Zoals geïllustreerd in Figuur 6 gebeurt dit bij een totaalrenovatie in één keer, bij een gefaseerde renovatie zal het energiegebruik in verschillende fases dalen. Toch is de keuze tussen de twee strategieën niet altijd voor de hand liggend, elk heeft zijn eigen voor- en nadelen.



Figuur 6: Verschil energetische totaalrenovatie en gefaseerde renovatie (Fawcett, 2014)

A. Totaalrenovatie

Bij een totaalrenovatie worden alle gebouwonderdelen op eenzelfde moment gerenoveerd. Dit houdt een aantal voordelen in ten opzichte van een gefaseerde renovatie (Albrecht & Hamels, 2021; RenoFase, 2017):

- Doordat alle componenten gelijktijdig geplaatst worden, kan er een synergie-effect bekomen worden. Zo kunnen sommige installaties, zoals stellingen, voor meerdere werken tegelijk gebruikt worden en zullen de opvolg- en ontwerpkosten beperkter zijn.
- De hinder die de renovatiemaatregelen met zich meebrengen wordt beperkt in tijd.
- Er is minder kans op schade aan reeds uitgevoerde werken door werken die later uitgevoerd worden.
- Er is onmiddellijk een grote energiebesparing en dit levert dus ook financieel voordeel op.

Soms is de keuze voor een totaalrenovatie echter niet meteen haalbaar: de hoge initiële investeringskost is één van de grootste nadelen van deze renovatie-aanpak. Uit het rapport van de Europese Commissie (2019) wordt namelijk duidelijk dat de meerderheid van de huiseigenaars de renovatie met eigen middelen wil financieren. Bovendien is er bij een renovatie altijd in een zekere mate hinder. Bij een totaalrenovatie is de hinder vaak van die aard dat het onwenselijk of onmogelijk is om in de te renoveren woning te blijven wonen. Dit zet extra druk op het budget (RenoFase, 2017). Een laatste nadeel is dat de terugverdienperiode mogelijk langer is dan de periode dat de mensen in de woning blijven wonen (Albrecht & Hamels, 2021).

B. Gefaseerde renovatie

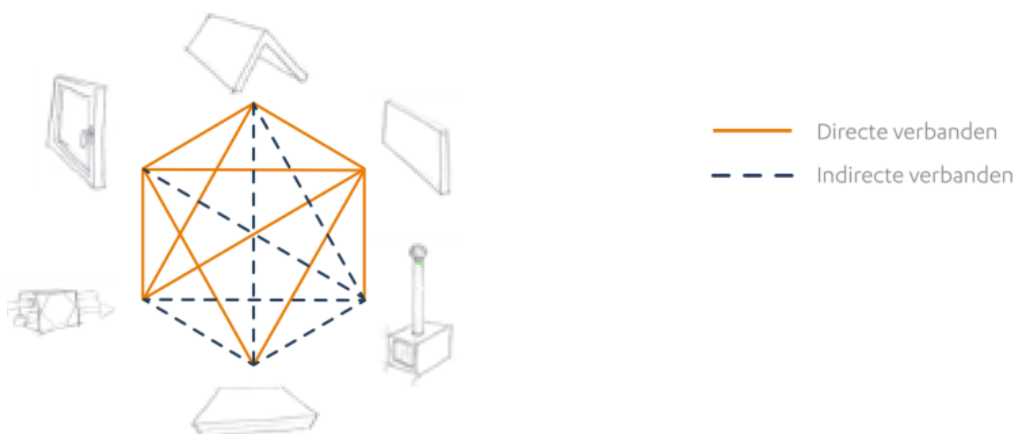
Een gefaseerde renovatie biedt een antwoord op de voornoemde nadelen van de totaalrenovatie. Zo kunnen de kosten gespreid worden over een langere periode. Gewoonlijk ook start men met de renovatiemaatregelen die een korte terugverdientermijn hebben. Daarnaast is de hinder bij elke renovatiestap eerder beperkt, waardoor de woning meestal bewoond kan blijven. Bovendien is het mogelijk om de renovatiewerken te combineren met andere onderhoudswerken. Een ander voordeel van de gefaseerde renovatie is dat er meer opportuniteiten zijn om de gebouwkenmerken aansluitend aan de veranderende voorkeuren of noden van het huishouden aan te passen. Vaak doen huiseigenaars ook ervaring op tijdens eerdere renovatiestappen en kunnen ze hun doelen nog bijstellen en ambitieuzer maken, aldus Fawcett (2014).

Een nadeel van gefaseerde renovatie is dat er geen synergie-effect gecreëerd kan worden en dat er in sommige gevallen ook tijdelijke oplossingen voorzien moeten worden om latere aansluitingen mogelijk te maken. Dit vraagt extra tijd, aandacht en materialen. Bovendien blijkt uit literatuur dat er een aantal risico's specifiek aan gefaseerde renovatie verbonden zijn (Albrecht & Hamels, 2021; BPIE, 2021; Fawcett, 2014; Saheb, 2018; WTCB, 2016). Over deze risico's is weinig kwantitatieve data te vinden, ze worden dus vooral kwalitatief besproken,.

Zo waarschuwen verschillende van deze bronnen voor een *lock-in* effect (Albrecht & Hamels, 2021; Fawcett, 2014; WTCB, 2016). In het rapport van RenoFase wordt dit omschreven als “een situatie [...] waarbij een bestaande oplossing of standaard bijna onmogelijk aan te passen is omwille van de grote kostprijs of logistieke moeilijkheden, en dat ondanks het feit dat er betere oplossingen voorhanden zijn.” (RenoFase, 2017, p.22) Bij een energetische renovatie kan dit *lock-in* effect zich voordoen op het niveau van een gebouwcomponent of op het niveau van de bouwdetails en de aansluitingen.

In verband met het mogelijke *lock-in* effect op componentniveau stelt Fawcett (2014) dat sommige installaties of renovatiemaatregelen een groter risico op *lock-in* inhouden dan andere. Wanneer er bij een bepaalde renovatiemaatregel weinig variatie mogelijk is of de isolatiegraad eenvoudig verhoogd kan worden, is het risico eerder beperkt. Denk hier bijvoorbeeld aan isolatie van de spouw, isolatie in het hellend dak of de plaatsing van een gascondensatieketel. Bij maatregelen met een lange levensduur, hoge investeringskost en groot onbenut potentieel op vlak van milieu-impact is er dan weer een groot risico op *lock-in*. Zeker wanneer het heel moeilijk of duur is om de maatregel te upgraden eens ze geïnstalleerd is. Dit fenomeen is belangrijker bij gefaseerde renovatie dan bij een totaalrenovatie. Bij een gefaseerde renovatie kan er in het begin van het proces namelijk een keuze gemaakt worden die in eerste instantie onbelangrijk lijkt, maar toch een invloed zal uitoefenen op later te maken keuzes.

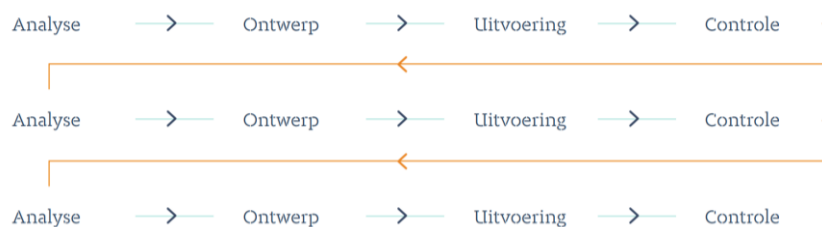
Het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB) (2016) en RenoFase (2017) waarschuwen voor een *lock-in* effect op niveau van de bouwdetails en aansluitingen. Men spreekt hier men van bouwkundige situaties die – als gevolg van een ad hoc renovatieaanpak – niet zonder meerkost kunnen worden opgelost (WTCB, 2016). Om een *lock-in* te vermijden is het belangrijk om bij het uitvoeren van bouwdetails te beseffen dat elke gebouwcomponent in rechtstreekse verbinding staat met naburige gebouwcomponenten en ook onrechtstreekse verbanden heeft met bijvoorbeeld de verwarmingsbehoefte en de performantie van het ventilatiesysteem. Dit concept is geïllustreerd in Figuur 7. Bij de renovatie van één component, moeten zo veel mogelijk van de rechtstreekse verbanden aangepakt worden - ook naar de toekomst toe - en er dient er maximale flexibiliteit te worden gegeven voor de onrechtstreekse verbanden (RenoFase, 2017).



Figuur 7: Directe en indirecte verbanden tussen verschillende gebouwcomponenten (RenoFase, 2017)

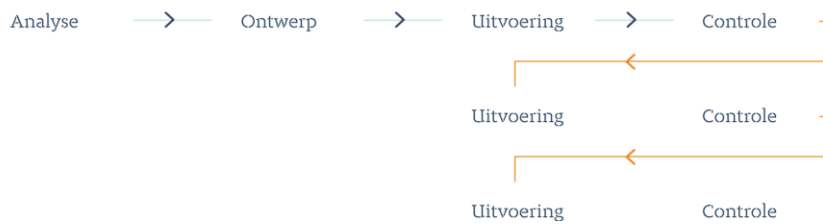
Saheb (2018), Albrecht & Hamels (2021) en BPIE (2021) halen een ander risico van gefaseerde renovatie aan: het zou kunnen dat een gefaseerde renovatie resulteert in een lagere energiebesparing dan oorspronkelijk vooropgesteld was. Vaak zijn eigenaars namelijk heel gemotiveerd om de eerste maatregelen uit te voeren, dat zijn de maatregelen die kosteneffectief zijn en een korte terugverdientermijn hebben. De laatste renovatiestappen hebben typisch een hogere terugverdientermijn en brengen net als alle andere maatregelen ook hinder met zich mee. Bijgevolg is er een grotere motivatie nodig om de laatste renovatiestappen uit te voeren en het risico bestaat dat men oordeelt dat deze laatste stappen de moeite niet meer waard zijn. In dat geval wordt gefaseerde renovatie uiteindelijk een gemiste kans om tot zeer goede energetische niveaus te komen. Dit risico is van een eerder psychologische aard: indien de hele renovatie in één keer uitgevoerd zou worden, zou de lage kostenefficiëntie van enkele maatregelen niet zo belangrijk lijken.

De grootste risico's bij een gefaseerde renovatie zijn dus het *lock-in* effect en de mogelijkheid dat de laatste renovatiestappen niet meer uitgevoerd worden door een gebrek aan motivatie. In beide gevallen ligt het gebrek aan een ambitieuze doelstelling en een plan van aanpak aan de basis. Wanneer er na elke stap namelijk opnieuw een analyse moet gebeuren om de volgende stap te bepalen, zoals schematisch voorgesteld is in Figuur 8, kan men geen oplossingen voor latere problemen voorzien en zou men bij de laatste stappen kunnen redeneren dat de maatregelen niet voldoende efficiënt meer zijn.



Figuur 8: Schematische voorstelling gefaseerd renovatieproces zonder overkoepelend plan van aanpak (RenoFase, 2017)

In het rapport van RenoFase (2017) wordt verwezen naar het project 'Huberti', waarbij men met een gefaseerde aanpak uiteindelijk een passiefniveau heeft kunnen realiseren. Ze stellen dat een goed resultaat steeds haalbaar is bij gefaseerde renovatie, maar dat de maatregelen dan wel moeten kaderen in een globaal plan van aanpak met een ambitieuze doelstelling. Dan zal het gefaseerde renovatieproces er eerder uitzien zoals in Figuur 9 en zal er enkel in het begin van het proces een analyse- en ontwerpfase nodig zijn om een overkoepelend plan op te stellen. Alleen wanneer er op die manier gewerkt wordt, kunnen er gegarandeerd hoge standaarden gehanteerd worden voor de maatregelen waarvan geweten is dat ze een risico op *lock-in* inhouden en kunnen de aansluitingen voor volgende renovatiestappen voorbereid worden. Zo wordt het risico op *lock-in* verkleind en zal men sneller geneigd zijn om alle stappen uit te voeren, deze zijn namelijk al gepland. Voor het opstellen van een masterplan is echter kennis van zake nodig en laat dat nu juist één van de drempels zijn om een energetische renovatie uit te voeren.



Figuur 9: Schematische voorstelling gefaseerd renovatieproces met een overkoepelend plan van aanpak (RenoFase, 2017)

2.3 Uitvoering van een gefaseerde renovatie

In hoofdstuk 1 is duidelijk geworden dat België, in het kader van de strijd tegen klimaatopwarming, zal evolueren naar een klimaatneutraal gebouwenpark. Aangezien de meeste woningen eigendom zijn van particulieren, moeten deze huiseigenaren aangezet worden tot het uitvoeren van een energetische renovatie. Daarom zijn er een aantal verplichtingen ingevoerd, zoals de renovatieverplichting uit sectie 1.2. Bovendien zijn er allerlei maatregelen geïntroduceerd om huiseigenaren aan te zetten tot en te ondersteunen bij een energetische renovatie. Dit wordt niet alleen gedaan door de financiële drempel te verlagen door middel van premies, renteloze leningen, etc. Er zijn ook verschillende initiatieven die focussen op het verlenen van kennis en begeleiding aan particulieren. Op die manier wordt de informatiedrempel verlaagd en probeert men ervoor te zorgen dat een energetische renovatie kwalitatief en doordacht uitgevoerd wordt.

Twee van deze initiatieven komen van de overheid. Een eerste is te vinden in het EPC-certificaat van een woning. In het onderdeel ‘aanbevelingen’ worden namelijk renovatieadviezen gegeven om naar een EPC-label A te evolueren. Ook via het ‘ik BENOveer’-label wil de Vlaamse overheid huiseigenaars motiveren om hun woning ingrijpend energetisch te renoveren volgens de ambities van het ‘Renovatiepact 2050’ (Vlaamse Regering, 2020). Het platform biedt onder andere informatie over de verschillende uit te voeren stappen en de mogelijke renovatiepremie. Bovendien wordt er op de website een optimale renovatievolgorde naar voren geschoven, deze wordt verder in dit hoofdstuk in meer detail toegelicht. Twee andere projecten, ‘iBroad’ en de Gentse Energiecentrale, werken op het niveau van een individueel gebouw. Ze bieden hulp bij het opstellen van een renovatieplan voor specifieke gebouwen en op basis van de mogelijkheden en wensen van de eigenaars. Verder zijn er ook instanties zoals RenoFase die bouwprofessionelen ondersteunen om renovatieprojecten efficiënt en kwalitatief te realiseren.

Door elk van deze instanties en initiatieven wordt rechtstreeks of onrechtstreeks benadrukt dat een renovatieproject zeer individueel is. Aangezien elke woning en elke bouwheer verschillend is, is het opstellen van een algemeen geldend stappenplan voor een gefaseerde renovatie niet eenvoudig. Toch kan er een aanpak voor een gefaseerde renovatie vooropgesteld worden en die wordt ook in het ‘Stappenplan voor een kwaliteitsvolle, efficiënte renovatie’ (RenoFase, 2017) uitgewerkt.

Dit is geen stappenplan om een renovatie uit te voeren, maar wel om tot een algemeen masterplan voor de renovatie te komen. Wat dat masterplan dan inhoudt, zal projectafhankelijk zijn.

Volgens dit rapport bestaat een efficiënte voorbereiding voor een gefaseerde renovatie uit verschillende stappen:

1. analyse van de bestaande toestand
2. vastleggen van het ambitieniveau
3. kiezen van een maatregelenpakket
4. opstellen van een plan van aanpak

De analyse van de bestaande toestand kan helpen om te bekijken welke maatregelen mogelijk zijn, welke prioritair uit te voeren zijn en of een renovatie überhaupt wel een goed idee is. Indien de structuur van de woning bijvoorbeeld veel defecten vertoont, kan het ook interessant zijn om na te denken over sloop en herbouw.

Voordat er gekozen wordt welke maatregelen geïmplementeerd gaan worden, moet het ambitieniveau vastgelegd worden. Hierbij moet men minstens de wettelijke verplichtingen volgen die van kracht zijn op het moment van renovatie, deze verplichtingen worden in hoofdstuk 5 uit de doeken gedaan. Aangezien renovatiemaatregelen typisch een lange levensduur hebben, is het echter ook belangrijk om voldoende vooruit te kijken en eventueel meer ambitieuze doelstellingen na te streven. Op die manier vermijdt men dat het gerenoveerde gebouw snel opnieuw verouderd is op vlak van energie-efficiëntie.

Hierna kan beslist worden welke maatregelen men zal uitvoeren om het vastgelegde ambitieniveau te behalen. In het rapport van RenoFase (2017) wordt voorgesteld om hiervoor de principes van de Trias Energetica te volgen. In eerste instantie dient het energieverbruik beperkt te worden, de meest groene energie is namelijk de energie die niet verbruikt hoeft te worden. Vervolgens moet er maximaal gebruik gemaakt worden van energie uit duurzame bronnen zoals wind-, water- en zonne-energie. Ten slotte dienen fossiele energiebronnen zo efficiënt mogelijk gebruikt te worden om in de resterende energiebehoefte te voorzien.

Vervolgens zal er een plan van aanpak opgesteld worden. Een gefaseerde renovatie kan op verschillende manieren gepland worden en elke manier heeft zo zijn eigen voor- en nadelen (RenoFase, 2017). Men kan ervoor kiezen om component per component (het dak, de gevel, het schrijnwerk, de verwarming,...) te renoveren. Dit laat toe om te logica van de Trias Energetica te volgen, maar er zullen tijdelijke verbindingen met andere componenten voorzien moeten worden, wat een goede planning vereist. Indien men onderdeel per onderdeel gaat renoveren (de volledige gevel, met alle elementen die erin zitten, de achterbouw, ...) kunnen er onmiddellijk heel wat rechtstreekse verbanden tussen de verschillende componenten opgelost worden. Men zal echter nog altijd moeten nadenken over de integratie in het grote geheel. Nog een andere aanpak is om de energetische doelstelling van een bepaalde component (de gevel, de verwarming,...) gefaseerd te

bereiken. Zo kan er bijvoorbeeld voor gekozen worden om een verouderde gasketel eerst te vervangen door een moderne gascondensatieketel en deze na 15 à 20 jaar te vervangen door een warmtepomp of eerst de gevel te isoleren met spouwvulling en deze in een latere fase verder te isoleren door binnen- of buitenisolatie toe te voegen. Hierbij kan het initiële budget lager gehouden worden, maar zal de complexiteit van het hele project vergroten: verbindingen met andere gebouwcomponenten zullen bijvoorbeeld meerdere keren aangepakt moeten worden.

Op de website van 'BENOveren' wordt een welbepaalde renovatievolgorde prominent naar voren geschoven (mijnbenovatie.be, s.d.). Deze is gebaseerd op de principes van de Trias Energetica en op de idee dat de meest kostenefficiënte maatregelen idealiter als eerste uitgevoerd worden. Voor de isolatie van de gebouwschil zou men idealiter beginnen met de isolatie van het dak, daarna de gevel, gevolgd door het schrijnwerk en als laatste de vloer. Pas na de isolatie van de gebouwschil zouden de technische installaties vernieuwd moeten worden. In deze zeer sterk vereenvoudigde aanbeveling wordt echter geen rekening gehouden met het specifieke karakter van elke woning: de kosten- of energie-efficiëntie van elke maatregel wordt sterk bepaald door de oppervlakte van de schildelen en de opbouw van de schildelen voor en na de renovatie.

Het rapport van RenoFase (2017) biedt meer nuance: de volgorde waarin de maatregelen het best uitgevoerd worden, zal verschillen van project tot project. Toch zouden er een aantal vuistregels gevolgd kunnen worden.

- Indien uit de analyse van de bestaande toestand blijkt dat bepaalde maatregelen zeer dringend zijn, worden deze best eerst uitgevoerd. Om dubbel werk te vermijden is het belangrijk om deze voldoende ambitieus aan te pakken.
- Volgens het principe van de Trias Energetica is het logisch om eerst de gebouwschil aan te pakken en vervolgens de installaties. Een belangrijke opmerking die hierbij gemaakt wordt, is dat dit principe vooral geldt voor verwarmingsinstallaties. Het plaatsen van een ventilatiesysteem kan wel al vroeger ingepland worden, in heel wat gevallen is dat zelfs wenselijk. Wanneer de gebouwschil geïsoleerd wordt, verbetert de luchtdichtheid namelijk. Dan kan het interessant worden om een ventilatiesysteem te installeren om zo een gezond binnenklimaat te behouden.
- De meest kostenefficiënte of energie-efficiënte maatregelen kunnen het best prioriteit krijgen.
- Om praktische redenen is het aan te raden om de werken van boven (dak) naar beneden (vloer) uit te voeren. Zo raken afgewerkte bouwdelen niet meer beschadigd door latere werken.

2.4 Besluit

In dit hoofdstuk werd opgemerkt dat het accuraat meten van de renovatieactiviteit moeilijk is omwille van de beperkte beschikbare data. Toch kan wel vastgesteld worden dat de meeste energetische renovaties resulteren in een relatief kleine daling van het operationeel energiegebruik, energetische totaalrenovatie komt minder frequent voor. Er werden drie drempels beschreven voor de uitvoering van een energetische renovatie: de financiële drempel, de informatiedrempel en de cognitieve drempel.

Bij totaalrenovatie wordt het energiegebruik in één stap gereduceerd, terwijl dit bij een gefaseerde renovatie in verschillende stappen gebeurt. Dit is het grootste verschil tussen beide renovatiestrategieën. Bovendien is opgemerkt dat een gefaseerde renovatie enkele risico's met zich meebrengt, namelijk het *lock-in* effect en de mogelijkheid dat sommige renovatiemaatregelen niet worden uitgevoerd wegens een gebrek aan motivatie. Om deze risico's te beperken, blijkt een goed ontworpen masterplan essentieel te zijn.

Een andere drempel voor de uitvoering van een energetische renovatie, blijkt de informatiedrempel te zijn. Verschillende instanties geven renovatieadvies, met als doel om deze drempel te verlagen. Het gebruikelijke advies is om renovatiestappen in een logische volgorde uit te voeren, rekening houdend met de principes van de Trias Energetica. Het is echter belangrijk om te benadrukken dat het ideale masterplan voor stapsgewijze renovatie afhangt van het specifieke gebouw en de personen die betrokken zijn bij het renovatieproces.

3 Levenscyclusanalyse van een energetische renovatie

In het vorige hoofdstuk werden verschillende initiatieven naar voren geschoven die informatie en richtlijnen verschaffen bij (gefaseerde) energetische renovaties van gebouwen. De voorstellen in verband met een optimale aanpak voor een gefaseerde renovatie die door deze initiatieven geformuleerd worden, steunen vooral op het de economische besparing, de reductie van het operationeel energiegebruik en de uitvoeringstechnische aspecten. Aangezien energetische renovaties onder andere worden uitgevoerd om de impact van het gebouw op het klimaat te reduceren, is het ook belangrijk om naar de milieu-impact van de renovatie te kijken. Onderzoek toont namelijk aan dat de meest kostenefficiënte renovatieoplossingen niet altijd gelijk zijn aan de renovatiemaatregelen die leiden tot de laagste milieu-impact. Zo concluderen Vrijders & Wastiels (2013) voor vier renovatiescenario's voor een Belgische rijwoning dat het minst energie-efficiënte renovatiescenario als goedkoopste uit een levenscycluskostenanalyse (LCC) komt, maar het slechtst presteert in een LCA. Het meest energie-efficiënte renovatiescenario scoort dan weer het slechtste op de LCC (+15% ten opzichte van de standaard renovatie), maar kwam als beste uit de LCA (-67% ten opzichte van de standaard renovatie). Kertsmik et al. (2023) veralgemenen dit door te stellen dat de optimalisatie van een renovatie op basis van milieu-impact over het algemeen leidt tot gebouwen met een hogere energieprestatie dan de keuze voor een kostenoptimale renovatie.

Bij de milieu-impact van gebouwen speelt niet alleen de impact die gerelateerd wordt aan het operationeel energiegebruik een rol, maar ook de impact van de materialen – de zogenaamde ingebedde energie. Het aandeel aan ingebedde energie wint aan belang naarmate gebouwen energie-efficiënter worden. Er worden dan namelijk meer materialen gebruikt en de productie, het transport en de afvalverwerking van al die materialen heeft uiteraard een impact op het milieu. Allacker (2010) bepaalde de verhouding tussen de ingebedde energie en operationeel energiegebruik in functie van de woningtypologie en de isolatiegraad (Tabel 3).

Omwille van het dalende energiegebruik en de stijgende ingebedde energie is er bij de energetische renovatie van een woning een risico op *burden shifting*. Dit is een situatie waarbij er een bepaalde energiebesparing is in de operationele fase, maar waarbij deze gecompenseerd wordt door een hogere impact in een andere fase van de levenscyclus.

	Vrijstaand	Halfopen	Gesloten
Bestaande toestand	71-86%	73-89%	69-87%
Lage energie-woning	39-60%	35-61%	47-58%

Tabel 3: Bijdrage operationeel energiegebruik aan totale milieu-impact voor verschillende woningtypologieën en isolatiegraad in België (Allacker, 2010)

Om de meest gunstige renovatiemaatregelen op vlak van milieu-impact te bepalen en het effect van *burden shifting* te bestuderen en te vermijden, wordt er vaak een levenscyclusanalyse (LCA) gedaan. Dit is een methode waarmee de milieu-impact van een gebouw over haar volledige levensduur in kaart gebracht wordt. Tot op heden is er echter geen LCA-onderzoek gepubliceerd dat specifiek de invloed van de gefaseerde renovatiestrategie op de milieu-impact onderzoekt. Toch kunnen er op basis van de bestaande studies conclusies getrokken worden die een interessant startpunt vormen voor een dergelijk onderzoek.

Voordat er resultaten van LCA-studies vergeleken kunnen worden, is het echter belangrijk om op te merken dat de resultaten in een LCA-studie sterk afhankelijk zijn van een aantal methodologische keuzes en van de randvoorwaarden (Vilches et al., 2017; Oregi et al., 2017).

- In principe moet een LCA-studie de milieu-impact tijdens alle levenscyclusfasen meenemen. Omwille van de complexiteit van het onderzoek, het gebrek aan accurate informatie en de beperkte bijdrage van sommige levenscyclusfasen aan de totale milieu-impact, worden sommige fasen vaak verwaarloosd. Zowel Vilches et al. (2017) als Oregi et al. (2017) merkten op dat de productiefase (A1-3) en het operationeel energiegebruik (B6) altijd worden meegenomen. De andere levenscyclusfasen worden soms niet in rekening gebracht.
- De keuze van de impactindicator is bepalend voor welke van de emissies zwaarder doorwegen. Afhankelijk van de focus van het onderzoek kan dus voor verschillende impactindicatoren gekozen worden, maar vaak worden ook binnen eenzelfde onderzoek verschillende indicatoren beschouwd.
- De beschouwde levensduur beïnvloedt het operationeel energiegebruik over de hele periode, maar ook het aantal benodigde vervangingen. Een wijziging van de beschouwde levensduur kan ervoor zorgen dat de verhouding tussen het aandeel operationeel energiegebruik en ingebedde energie verandert. Dit kan op zijn beurt invloed hebben op de conclusie van het onderzoek.
- Ook het klimaat en de beschouwde energiemix zijn belangrijke randvoorwaarden die een groot effect kunnen hebben op de effectiviteit van bepaalde maatregelen.

In dit hoofdstuk worden vijf LCA-studies over de energetische renovatie van gebouwen, geanalyseerd. In elk van deze studies worden uitspraken gedaan over de invloed van individuele renovatiemaatregelen op de milieu-impact. De analyse van deze studies laat toe om een beter inzicht te krijgen in de effectiviteit van elke renovatiemaatregel op vlak van milieu-impact. De methodologische keuzes, randvoorwaarden en onderzochte renovatiemaatregelen van de studies die in dit hoofdstuk aan bod komen, zijn in Verklaring afkortingen: zie Tabel 5

Tabel 4 en Tabel 5 samengevat. De renovatiemaatregelen die aan bod komen, kunnen ingedeeld worden in 3 groepen: isolatie van de gebouwschil, installatie van technieken en implementatie van 'on-site' hernieuwbare energieproductie.

Auteur (jaar)	Land	Type gebouw	Functionele eenheid	Levensduur	Renovatiescenario's
Passer et al. (2016)	Oostenrijk	Residentieel	1m ²	60	I. Geen extra isolatie gebouwschil + vervanging technieken II. Minimum isolatie gebouwschil + vervanging technieken III. Goede isolatie gebouwschil + vervanging technieken Vervanging technieken: a. Geen vervanging technische installaties (100% gas) b. Zonnecollectoren (54% DH, 46% gas) c. PV panelen (54% DH, 46% gas) b. + c. Zonnecollectoren + PV panelen (54% DH, 46% gas) d. Zonnecollectoren + 1,5 x aantal PV panelen (54% DH, 46% gas)
Delem et al. (2020)	België	Residentieel: rijwoning, appartement, vrijstaande woning	Volledig gebouw over levensduur	30	1. Referentiescenario 2. Minimaal: 3 maatregelen worden uitgevoerd 3. E60 materialen: focus op gebouwschil en basisvervanging verwarmingsinstallatie 4. E60 installaties: gebouwschil volgens minimale eisen en focus op installaties 5. E30 gas: focus op gebouwschil en combi condenserende gasketel 6. E30 WP: gebouwschil volgens minimale eisen en lucht-water warmtepomp (Voor 5. en 6. PV-panelen om tot gewenste E-peil te geraken)
Ramírez-Villegas et al. (2019)	Zweden	Residentieel: appartementen- gebouw	Volledig gebouw over levensduur	50	1. Referentie: Geen extra isolatie, ventilatiesysteem zonder WTW, Ti = 22,7°C 2. Isolatie gevel, zolder, ramen, ventilatiesysteem met WTW, Ti = 21°C 3. Isolatie gevel, zolder, ramen, ventilatiesysteem zonder WTW, Ti = 22,7°C 4. Geen extra isolatie, ventilatiesysteem met WTW, Ti = 22,7°C 5. Geen extra isolatie, ventilatiesysteem met WTW, Ti = 21°C
Dodoo et al. (2013)	Zweden	Residentieel: appartementen- gebouw	m ²	50	1. Referentiescenario 2. Isolatie dak, gevel, ramen, deuren, verbeterde tappunten, ventilatiesysteem met WTW, efficiënte elektrische huishoudapparaten en 3 verschillende verwarmingssystemen a. "Resistance heating" b. Warmtepomp c. Warmtenet ("District heating")
Van de moortel et al. (2022)	België	Residentieel: sociale woning	Volledig gebouw over levensduur	60	1. Referentiescenario 2. Spouwisolatie met gasketel 3. NZEB renovatie met gasboiler 4. NZEB renovatie met warmtepomp

Verklaring afkortingen: zie Tabel 5

Tabel 4: Overzicht LCA-studies: algemene informatie

Auteur (jaar)	Systeemgrenzen						Indicator					
	A1 - A3	A4 - A5	B4	B6	B7	C1-4	GWP	CED	MONETAIR	AP	EP	Ander
Passer et al. (2016)	Ja, SimaPro 7.3.3 Ecoinvent 2.2	Ja	Ja	Ja, H, V, E, W	/	Ja	Ja	Ja, niet hernieuwbare energie	Nee	Nee	Nee	Ja, UBP
Delem et al. (2020)	Ja	Ja	Ja	Ja, H, C, V, W, A, E	/	Ja	Ja	Nee	Ja, MGEI	Nee	Nee	Nee
Ramírez-Villegas et al. (2019)	Ja, EPD EcoInvent, GaBi	Ja		Ja	?	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja, ADP
Dodoo et al. (2013)	Ja	Ja	/	Ja, H, V, W, E	/	Ja	Ja	Ja, primaire energie	Nee	Nee	Nee	Nee
Van de moortel et al. (2022)	Ja	Ja		Ja, A0, A1 - A5, B2, B4 - B7, C1 - C4	/	Ja	Nee	Nee	Ja, CEN en CEN+	Nee	Nee	Nee

DH: District heating / Warmtenet, PV: Photovoltaic / Fotovoltaïsch, WTW: Warmteterugwinning, WP: Warmtepomp, NZEB: Nearly Zero Energy Building / Bijna-energie neutraal

H: Ruimteverwarming, C: Koeling, V: Ventilatie, W: Opwarming sanitair warm water, A: Hulpenergie, E: Elektriciteit voor huishouden

GWP: Global Warming Potential, CED: Cumulative Energy Demand, MGEI: Monetised Global Environmental Impact Indicator, AP: Acidification Potential, EP: Eutrophication Potential, ADP: abiotic depletion potential of non-fossil elements, , UBP: ecological scarcity

Tabel 5: Overzicht LCA-studies: systeemgrenzen en indicatoren

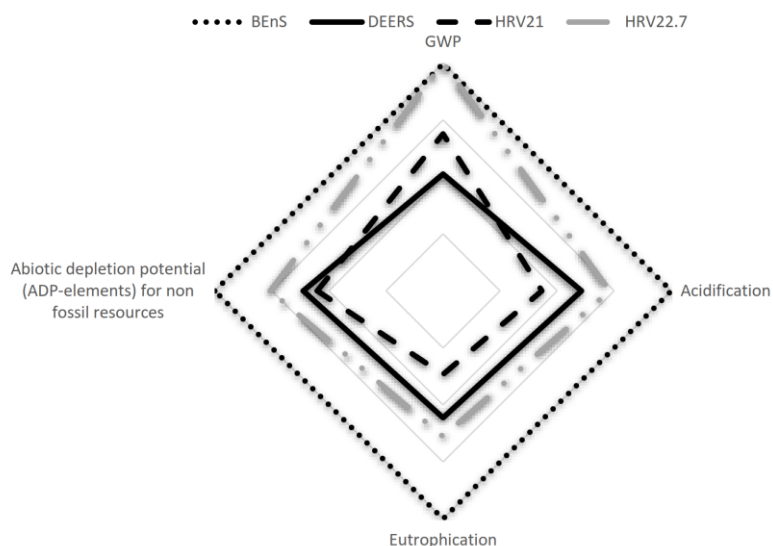
In een eerste sectie zal ingegaan worden op de relatie tussen de milieu-impact van de materialen en van het operationeel energiegebruik. In de tweede sectie wordt, aan de hand van de beschouwde LCA-studies, de invloed van de individuele renovatiemaatregelen op de milieu-impact van een gebouw onder de loep genomen. De laatste sectie zal het dynamische LCA-onderzoek (DLCA) belichten, waarin men sommige parameters dynamisch modelleert en dus laat variëren over de levensduur van een gebouw.

3.1 Impact van materialen vs. operationeel energiegebruik

In elk van de beschouwde studies stijgt de milieu-impact van de materialen wanneer er renovatiemaatregelen uitgevoerd worden. Wanneer het klimaatveranderingspotentieel (GWP) of het cumulatief energiegebruik (CED) voor de casestudy over de beschouwde levensduur berekend wordt, blijkt dat de implementatie van een renovatiemaatregel telkens resulteert in een daling van de totale CO₂-emissies of het totale energiegebruik. De stijging van de ingebodde energie wordt dus telkens gecompenseerd door de daling in het operationeel energiegebruik, waardoor men kan besluiten dat de renovatiemaatregelen efficiënt zijn.

Dit geldt enkel indien het klimaatveranderingspotentieel of het cumulatief energiegebruik onderzocht wordt. In het onderzoek van Ramírez-Villegas et al. (2019) is ook de invloed van de renovatiemaatregelen op het vermestingspotentieel (*Eutrophication Potential*), het verzuringspotentieel (*Acidification Potential*) en het potentieel voor uitputting van abiotische chemische elementen (*Abiotic Depletion Potential Elements*) van het gebouw onderzocht. Hier wordt aangetoond dat er in sommige gevallen geconcludeerd moet worden dat er *burden shifting* optreedt als er andere indicatoren onderzocht worden.

Dit is te zien bij de renovatiescenario's HRV21 en DEERS in Figuur 10. In het eerste scenario (HRV21) wordt een ventilatiesysteem D met warmteterugwinning geïmplementeerd en wordt de binnentemperatuur verlaagd tot 21°C, in het tweede scenario (DEERS) worden daarenboven ook de gebouwschil verder geïsoleerd. Het DEERS-scenario zorgt voor reductie van 19% op het klimaatveranderingspotentieel, terwijl dit voor het HRV21-scenario slechts 16% is. De extra isolatie van de gebouwschil zorgt dus voor een reductie van het klimaatveranderingspotentieel van 3%. Wanneer de impact op de andere drie indicatoren berekend wordt, komt het HRV21-scenario met een reductie van 16% op het verzuringspotentieel, 17% op het vermestingspotentieel en 12% op het potentieel voor uitputting van abiotische chemische elementen telkens als beste uit de bus. Bij deze indicatoren blijkt de extra afname van de impact van het operationeel energiegebruik door de isolatie van de gebouwschil kleiner dan de extra toename van de materiaalimpact. Bij het verder isoleren van de gebouwschil, ontstaat er dus een effect van *burden shiftingen* moet men – indien men enkel naar deze indicatoren kijkt – besluiten dat deze extra renovatiemaatregel geen positieve invloed heeft op de impact van het gebouw, ook al zorgt ze voor een reductie van het operationeel energiegebruik.



Figuur 10: milieu-impact renovatiescenario's voor verschillende impact indicatoren (Ramírez-Villegas et al., 2019)

Aangezien de milieu-impact van een gebouw zich niet beperkt tot het energiegebruik of het klimaatveranderingspotentieel en aangezien de resultaten van een LCA-onderzoek kunnen verschillen afhankelijk van de indicator die beschouwd wordt, lijkt het interessant om verschillende impactindicatoren te beschouwen binnen eenzelfde onderzoek. Indien de verschillende indicatoren tot andere resultaten leiden, zoals in het onderzoek van Ramírez-Villegas et al. (2019) het geval was, is het echter niet eenvoudig om verschillende scenario's tegen elkaar af te wegen. Daarom kan het aangewezen zijn om gebruik te maken van een geaggregeerde score waarin de gewogen impact van verschillende indicatoren vervat zit. Dit is wat Delem et al. (2020) doen in hun onderzoek: ze berekenen de milieu-impact van renovatiemaatregelen telkens op basis van de gemonetariseerde score – een geaggregeerde score – en op basis van het klimaatveranderingspotentieel.

3.2 De invloed van individuele renovatiemaatregelen

A. Gebouwschil

Passer et al. (2016) benadrukken het belang van de isolatie van de gebouwschil. Bij de met gas verwarmde casestudy in hun onderzoek merken namelijk ze op dat het cumulatief niet-hernieuwbaar energiegebruik met meer dan 70% gereduceerd wordt ten opzichte van de oorspronkelijke situatie indien de gebouwschil geïsoleerd wordt tot een U-waarde van respectievelijk 0,14W/m²K, 1W/m²K, 0,1W/m²K en 0,3W/m²K voor de gevel, de ramen, het plat dak en het plafond van de kelder. Ook Delem et al. (2020) merken in hun onderzoek op dat de extra CO₂-impact die veroorzaakt wordt door isolatiematerialen heel klein is in vergelijking met de energiebesparing die er het resultaat van is. Dit in tegenstelling tot de installatie van bijvoorbeeld fotovoltaïsche (PV) panelen, waarbij de materiaalimpact groot is ten opzichte van de reductie van de milieu-impact door de opwekking van elektriciteit. Na-isolatie van de gebouwschil zou volgens dit onderzoek dus voordeliger zijn op vlak

van milieu-impact dan het plaatsen van PV-panelen. Er wordt echter wel een kanttekening gemaakt: bij sommige schilrenovaties, zoals bijvoorbeeld de vloer op volle grond, heeft men ook niet-isolerende materialen nodig. Deze kunnen een grote materiaalimpact hebben. De materiaalimpact van de na-isolatie van de vloer kan bijvoorbeeld gelijkaardige waarden bereiken als de materiaalimpact van de na-isolatie van het dak, de gevel en het schrijnwerk samen, aldus Delem et al. (2020). Doordat de materiaalimpact zo groot is, vermindert de efficiëntie van de ingreep uiteraard.

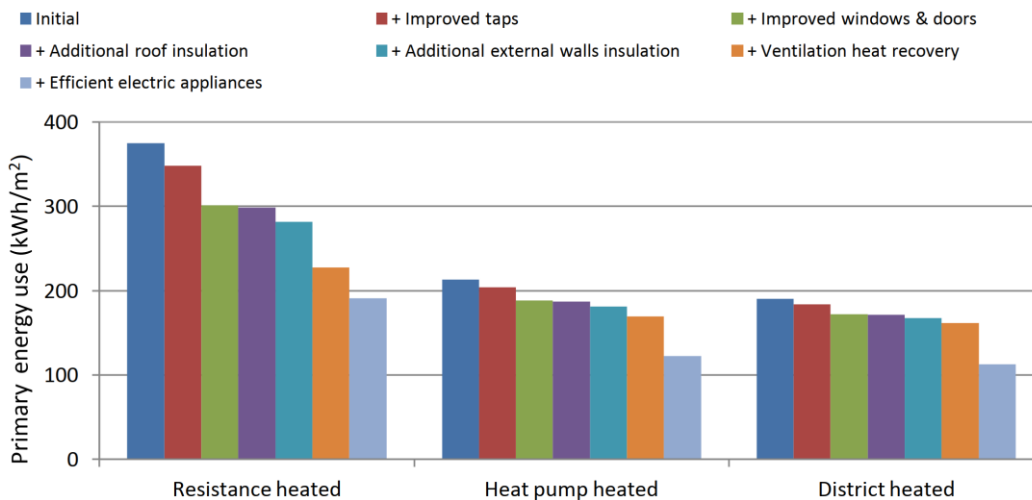
Wanneer Passer et al. (2016) scenario's met een verschillende isolatiegraad vergelijken, blijkt duidelijk dat de isolatie van een niet-geïsoleerd gebouw een grotere invloed heeft dan de verdere isolatie van een gebouw met een redelijke isolatiegraad. In het onderzoek wordt dan ook duidelijk dat er een soort kantelpunt bestaat: een situatie waarbij de toename aan materiaalimpact niet meer gecompenseerd wordt door de afname van het operationeel energiegebruik. In een review-studie merken ook Mirabella et al. (2018) op dat er zo een kantelpunt bestaat. De auteurs halen verschillende studies aan waarin hier expliciet naar gezocht wordt, maar uit deze onderzoeken komt geen eenduidige conclusie. Het kantelpunt zou onder andere afhankelijk zijn van het klimaat, de gebouwtypologie, het gebruikte isolatiemateriaal, het verwarmingssysteem en de bestudeerde impactindicator.

Indien al isolatie aanwezig is in de woning, kan het soms interessanter zijn om eerst andere renovatiemaatregelen te ondernemen. Dit kan ook besloten worden uit de studie van Doodoo et al. (2013). Zij onderzoeken de efficiëntie van verschillende maatregelen wanneer ze opeenvolgend uitgevoerd worden en dat voor een Zweeds appartementsgebouw waarvan de gebouwschil reeds hoge isolatiewaarden heeft voor de start van de renovatie (Tabel 6). De resultaten van de studie zijn weergegeven in Figuur 11. De isolatiegraad van de gebouwschil wordt bij de renovatie slechts beperkt verbeterd, waardoor deze renovatiestappen relatief weinig effect op het energiegebruik van het gebouw hebben. Het schrijnwerk is het schildeel waarvan de vervanging zorgt voor de grootste reductie in het primair operationeel energiegebruik. Deze reductie is gelijk aan 14% wanneer het gebouw elektrisch verwarmd wordt en gelijk aan 5% wanneer het gebouw aangesloten is op een warmtenet of met een warmtepomp verwarmd wordt. De implementatie van een ventilatiesysteem met warmteterugwinning en van efficiëntere elektrische huishoudapparaten zorgen voor een grotere reductie van het primair operationeel energiegebruik.

Er kan besloten worden dat, indien het beschouwde gebouw slecht geïsoleerd is, de isolatie van de gebouwschil de milieu-impact sterk doet dalen. De daling van het operationeel energiegebruik is namelijk groot, terwijl de materiaalimpact die de isolatie van de gebouwschil met zich meebrengt eerder klein is. Als het gebouw echter al enigszins geïsoleerd is, is de reductie van de milieu-impact die bekomen kan worden door de gebouwschil te isoleren, kleiner. In dat geval is het mogelijk interessanter om eerst andere renovatiemaatregelen uit te voeren.

	U-waarde scheiddeel [W/m ² K]				
	Vloer	Gevel	Ramen	Deuren	Dak
Voor renovatie	0,23	0,2	1,9	1,19	0,13
Na renovatie	0,23	0,1	0,9	0,9	0,08

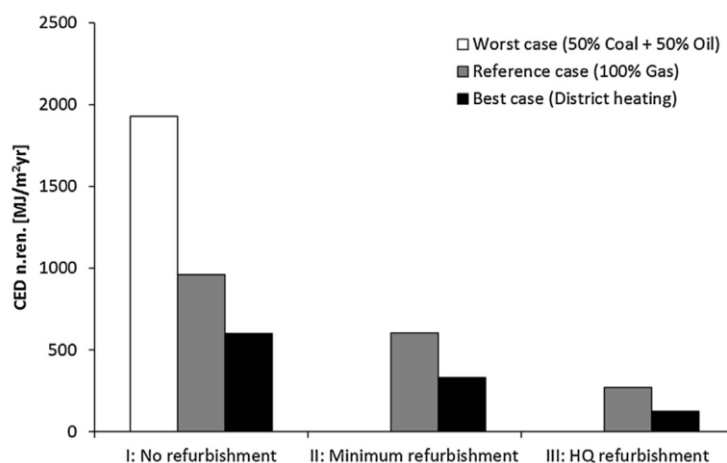
Tabel 6: Thermische eigenschappen van de casestudy voor en na renovatie (Dodoo et al., 2013)



Figuur 11: Jaarlijks primair operationeel energiegebruik na verschillende renovatiemaatregelen en met verschillende verwarmingssystemen (Dodoo et al., 2013)

B. Verwarmingsinstallaties

Wanneer het gaat over de invloed van een verwarmingssysteem op de milieu-impact van een woning, stellen Passer et al. (2016) en Dodoo et al. (2013) vast dat, als een gebouw verwarmd wordt met een vervuilende brandstof, de omschakeling naar een groenere brandstof een heel grote positieve invloed kan hebben op de milieu-impact van dat gebouw. In het geval van Passer et al. (2016) zou het vervangen van een verwarmingsketel op basis van 50% steenkool en 50% aardolie door een gascondensatieketel zorgen voor een halvering van de cumulatieve niet-hernieuwbare energievraag en een reductie van het GWP met 76%. Als de condensatieketel daarna nog vervangen zou worden door een aansluiting op een warmtenet, vermindert de cumulatieve niet-hernieuwbare energievraag nog eens met zo'n 30% (Figuur 12). Zij besluiten zelfs dat het vervangen van de verwarmingsinstallatie in dit geval het best als eerste uitgevoerd wordt, nog voor de renovatie van de gebouwschil. Dodoo et al. (2013) trokken een vergelijkbare conclusie wanneer er elektrisch verwarmd wordt: in de bestudeerde casestudy zou het onmiddellijk installeren van een warmtepomp zorgen voor een reductie van de milieu-impact van zo'n 40% terwijl alle andere voorgestelde renovatiemaatregelen samen voor een reductie van zo'n 45% zouden zorgen. Ook dan is het omschakelen naar een warmtepomp de meest logische eerste stap. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat het initiële isolatieniveau van de gebouwschil in deze studie al relatief hoog was, waardoor het mogelijk is om een warmtepomp te implementeren voordat de gebouwschil bijkomend geïsoleerd (Tabel 6).



Figuur 12: Invloed van het verwarmingssysteem op de cumulatieve niet-hernieuwbare energievraag van de casestudy (Passer et al., 2016)

Ook andere studies bestuderen de invloed van courante verwarmingssystemen bij Belgische woningrenovaties: een gascondensatieketel en een lucht/water-warmtepomp. Delem et al. (2020) en Van de moortel et al. (2022) merken op dat de materiaalimpact van een warmtepomp groter is dan deze van de condensatieketel, maar dit wordt ruimschoots gecompenseerd door de lagere impact bij het operationeel energiegebruik. Van de moortel et al. (2022) becijferen dat de grotere materiaalimpact van de warmtepomp al na 2 jaar gecompenseerd is door de lagere milieu-impact van het energiegebruik voor ruimteverwarming. In het onderzoek van Delem et al. (2020) presteren de renovatiescenario's met warmtepomp op vlak van CO₂-emissies telkens beter dan de scenario's met condensatieketel die hetzelfde E-peil behalen, zelfs wanneer de scenario's met condensatieketel beter geïsoleerd zijn. Indien er echter gekeken wordt naar de gemonetariseerde score, is het verschil tussen de scenario's met een condensatieketel en een warmtepomp telkens kleiner. Toch zorgt een warmtepomp ook hier telkens voor een lagere milieu-impact dan een condensatieketel, op voorwaarde dat een gelijk isolatieniveau beschouwd wordt.

Net als bij de isolatie van de gebouwschil, is ook de reductie van de milieu-impact die bekomen kan worden door middel van de vervanging van de verwarmingsinstallatie sterk afhankelijk van de beginsituatie. Bovendien werd duidelijk dat de ingebodde energie van een warmtepomp hoger is dan deze van een gascondensatieketel. Toch zorgt de grotere reductie van het operationeel energiegebruik ervoor dat de warmtepomp te verkiezen is boven de condensatieketel op vlak van milieu-impact.

C. Ventilatiesysteem

Een ventilatiesysteem D heeft mechanische toe- en afvoer en wordt in de meeste gevallen gecombineerd met een systeem van warmteterugwinning. Hierdoor zullen de warmteverliezen door ventilatie dalen, waardoor ook het operationeel energiegebruik gereduceerd wordt. Een ander type ventilatiesysteem dat frequent gebruikt wordt bij renovaties is het ventilatiesysteem C met natuurlijke toevoer en mechanische afvoer. Om ook hiermee het operationeel energiegebruik te

reduceren, wordt er vaak gewerkt met een vraagsturing, in dat geval spreekt men van een ventilatiesysteem C+.

In geen van de vijf beschouwde studies werden beide types ventilatiesystemen rechtstreeks met elkaar vergeleken. De enige studie waarin ze allebei aan bod komen, is deze van Delem et al. (2020). Hier worden echter geen scenario's beschouwd waarbij enkel het ventilatiesysteem verschilt. Op basis van deze studies kan dus geen uitspraak gedaan worden over een potentiële voorkeur voor een ventilatiesysteem C(+) of D op basis van milieu-impact.

Uit de studie van Ramírez-Villegas et al. (2019) blijkt wel dat zowel de implementatie van een ventilatiesysteem type D met warmteterugwinning als de verdere isolatie van de gebouwschil zorgen voor een reductie van 10% op het totale GWP van het gebouw. Voor de beschouwde casestudy is de invloed van beide maatregelen over een levensduur van 50 jaar dus zeer gelijkaardig.

D. Besluit

Uit de voorgaande analyses kan geleerd worden dat de effectiviteit van verschillende renovatiemaatregelen sterk afhankelijk is van de staat waarin het te renoveren gebouw zich bevindt. De isolatiegraad en het type verwarmingsinstallatie zullen in grote mate bepalen welke reductie in milieu-impact mogelijk is en welke renovatiemaatregelen het best als eerste uitgevoerd worden.

3.3 Tijdgerelateerde effecten in een levenscyclusanalyse

Een levenscyclusanalyse van een gebouw is een complexe oefening en om een LCA te kunnen uitvoeren, moeten er verschillende aannames gemaakt worden. Vaak worden deze aannames vastgelegd over de hele beschouwde levensduur van het gebouw, in dat geval spreken we van een klassieke of statische LCA. Omwille van de lange levensduur van een gebouw, is het echter niet evident dat deze parameters – die ingeschat worden op basis van de situatie van vandaag – onveranderd blijven. De laatste jaren zijn er verschillende onderzoekers die zich de vraag stellen of sommige parameters beter als veranderlijk gemodelleerd zouden worden. In dat geval spreken we van een dynamische levenscyclusanalyse of DLCA. Ook voor de vergelijking tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie kan deze vraag relevant zijn: indien maatregelen op verschillende momenten uitgevoerd worden, is de milieu-impact ervan misschien ook verschillend.

De dynamische parameters of karakteristieken kunnen in vier grote categorieën onderverdeeld worden (Su et al., 2017).

- **Het technologisch proces:** de verandering van processen als gevolg van de intellectuele vooruitgang van de mens of de implementatie op een steeds grotere schaal. Hieronder vallen verschillende elementen die dynamisch gemodelleerd kunnen worden, zoals een variabele

energiemix, de verbetering van het productieproces, de verbetering van het product zelf of een beter afvalverwerkingsproces zijn hier enkele voorbeelden van.

- **Dynamische karakterisatiefactoren:** deze factoren zijn moeilijker in rekening te brengen. Ze beschouwen het tijdsafhankelijke verloop van emissies en de invloed daarvan op de milieu-impact.
- **Dynamische wegingsfactoren:** deze factoren hebben betrekking op de weging van de verschillende emissies wanneer die tot een meer globaal cijfer gereduceerd worden. Deze wegingsfactoren zullen waarschijnlijk evolueren doorheen de jaren omdat men meer of minder aandacht schenkt aan bepaalde emissies of effecten.
- **De variatie van de gebruiker:** dit kan zich uiten op verschillende manieren. Het aantal gebruikers kan veranderen, maar ook het gedrag van de gebruiker blijft niet gelijk gedurende de hele studieperiode.

Een parameter die niet opgenomen is in de voorgaande categorieën, maar wel kan resulteren in een variabele koel- of verwarmingsvraag is de temperatuurverandering als gevolg de klimaatverandering.

In verschillende studies worden parameters dynamisch gemodelleerd (Negishi et al., 2019; Obrecht et al., 2021; Ramon et al., 2023; Van de moortel et al., 2022). Er zijn ook studies die de robuustheid van hun onderzoek testen door in een gevoeligheidsanalyse een andere aanname te gebruiken voor enkele van de veranderlijke parameters. Zo gaan zowel Delem et al. (2020) als Passer et al. (2016) na in hoeverre de resultaten veranderen wanneer de energiemix varieert. Passer et al. (2016) implementeren een groenere energiemix. Dan blijkt dat het plaatsen van PV-panelen een minder grote invloed hebben, het verschil in milieu-impact tussen de zelf opgewekte elektriciteit en de elektriciteit op het elektriciteitsnet wordt dan namelijk kleiner. Omwille van de Belgische plannen om de productie van nucleaire energie stop te zetten en deze op korte termijn te vervangen door gascentrales, kiezen Delem et al. (2020) in hun gevoeligheidsanalyse net voor een meer vervuilende energiemix. Zij concluderen dan dat het voordeel van PV-panelen groter wordt, aangezien de vermeden impact van de energiemix groter is. De milieu-impact van de warmtepomp stijgt echter omwille van de vervuilende energiemix.

Bij de vergelijking van een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie is de tijdsfactor van belang, want renovatiemaatregelen worden op een verschillend tijdstip geïmplementeerd. Het kan dus interessant zijn om hiervoor een DLCA toe te passen. De variabelen die mogelijk invloed op de resultaten uitoefenen zijn de variabele energiemix, productie- en productverbetering, verbeterde afvalverwerkingsprocessen en een verandering in het gebruikersgedrag. Aangezien het LCA-onderzoek voor gefaseerde renovatie nog in zijn kinderschoenen staat, wordt hier in deze masterproef nog niet op gefocust. Bovendien is er slechts weinig data beschikbaar over het effect van de productie- en productverbetering en de verbeterde afvalverwerking. In een gevoeligheidsanalyse zal de invloed van een andere energiemix op de milieu-impact echter wel geëvalueerd worden.

4 Methodologie

In het onderzoekluik van deze masterproef zullen verschillende pakketten van renovatiemaatregelen gedefinieerd worden. Deze zullen toegepast worden op een eengezinswoning, waarna de milieu-impact van de woning berekend en geanalyseerd zal worden. In tegenstelling tot het tot hiertoe beschikbare onderzoek, zal de milieu-impact telkens berekend worden voor een totaalrenovatie – een situatie waarin alle renovatiemaatregelen in één keer geïmplementeerd worden – en een gefaseerde renovatie – een situatie waarin de renovatiemaatregelen in verschillende stappen uitgevoerd worden. Omdat er bij een gefaseerde renovatie heel wat variabelen zijn wat betreft de planning van de renovatiestappen, zal vervolgens ook de invloed van deze variabelen op de milieu-impact bij een gefaseerde renovatie onderzocht worden.

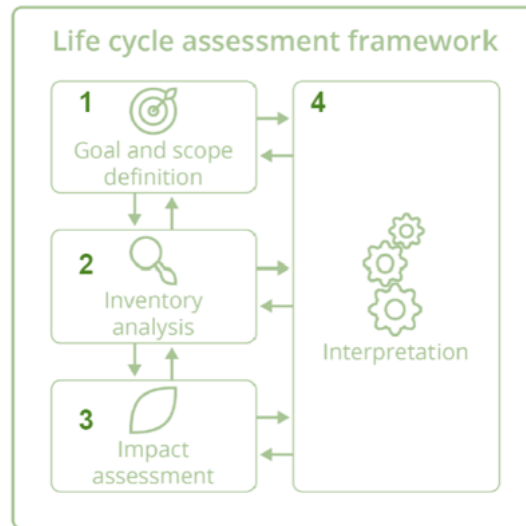
Een eerste stap in het onderzoek is het opstellen van een methodologisch kader. In dit hoofdstuk zal nagegaan worden hoe LCA-studies doorgaans worden opgesteld en welke methodologische keuzes gangbaar zijn in de literatuur. Na een korte literatuurstudie over elk onderdeel worden de keuzes uit deze masterproef toegelicht. Bij het maken van methodologische keuzes is de doelstelling telkens om de totaalrenovatie en gefaseerde renovatie op een eerlijke manier te vergelijken.

4.1 Levenscyclusanalyse

Een levenscyclusanalyse is een onderzoek waarbij de totale milieubelasting of milieu-impact van een product in kaart gebracht wordt. Hierbij wordt gekeken naar de hele levenscyclus van het product: van de ontginning van de benodigde grondstoffen tot het gebruik en de afvalverwerking.

Doorheen de jaren zijn er een aantal internationale normen vastgelegd die als doel hebben om LCA-studies te standaardiseren, waardoor het vergelijken van verschillende studies mogelijk wordt. In ISO-normen 14040 en 14044 worden de principes en een raamwerk voor LCA beschreven en vastgelegd. De Europese normen NBN EN 15978 en NBN EN 15804 focussen dan weer specifiek op de bouwsector. De eerste Europese norm legt een rekenmethode vast voor de beoordeling van de milieuprestaties van gebouwen, in de tweede wordt de bepaling van de milieuprestatie van bouwproducten gestandaardiseerd. Ondanks het feit dat de principes, rekenmethodes en het raamwerk voor LCA duidelijk vastgelegd zijn in normen, moeten er in elk onderzoek nog heel wat aannames gemaakt worden. Thibodeau et al. (2019) merken op dat deze aannames kunnen verschillen van onderzoek tot onderzoek of van auteur tot auteur. Ze worden echter wel altijd goed gedocumenteerd, waardoor het mogelijk is om de resultaten van andere studies na te bootsen, te vergelijken, etc. De studie stelt echter wel vast dat de structuur van de LCA-studie in de meerderheid van de onderzoeken gelijklopend is. Zoals in de ISO-normen is voorgeschreven, wordt deze

gewoonlijk opgedeeld in vier onderdelen: de definitie van het doel en de reikwijdte, de levenscyclusinventarisatie (LCI), de levenscyclusimpactanalyse (LCIA) en de interpretatie van de resultaten. Zoals weergegeven in Figuur 13, zijn al deze onderdelen sterk met elkaar verbonden. Ook in deze masterproef wordt dit raamwerk gebruikt om de methodologie vast te leggen.



Figuur 13: Algemene structuur van een levenscyclusanalyse

4.2 Bepaling van de methodologie

4.2.1 Doel en reikwijdte

In dit onderdeel wordt vastgelegd wat er precies geanalyseerd zal worden en hoe diepgaand dit zal gebeuren. Zo wordt de functionele eenheid bepaald, wordt de duur van de studieperiode vastgelegd en wordt er gekozen welke levenscyclusfasen meegenomen zullen worden in de analyse. Voor dit echter kan gebeuren, moet het objectief van de studie helder geformuleerd worden.

Deze masterproef heeft als doel om de milieu-impact van verschillende totaalrenovaties en gefaseerde renovaties met elkaar te vergelijken aan de hand van een LCA-studie. De resultaten van deze studie zouden helpen bij de afweging tussen een totaalrenovatie of een gefaseerde renovatie. Ze kunnen ook worden op de invloed van bepaalde keuzes bij de planning van een gefaseerde renovatie op de milieu-impact van de woning beter in te schatten.

A. Functionele eenheid

De functionele eenheid vormt de referentie-eenheid voor een levenscyclusanalyse en de milieu-impact van het gebouw wordt in functie van deze eenheid berekend. De functionele eenheid omvat informatie over de meeteenheid, de hoeveelheid materiaal die onderzocht wordt en de tijdsperiode waarover de milieu-impact berekend wordt. Vilches et al. (2017) merken op dat 1 m² vloeroppervlakte de meest gebruikte functionele eenheid is bij LCA-studies voor renovaties van gebouwen. Deze

functionele eenheid maakt het mogelijk om verschillende studies met elkaar te vergelijken. Een andere veelgebruikte functionele eenheid is het volledige gebouw (Vilches et al., 2017). Hoewel dit een goede manier is om de milieu-impact van een enkel gebouw te beoordelen, bemoeilijkt het de vergelijking van verschillende studies. Het volledige gebouw als functionele eenheid beschouwen heeft echter wel als voordeel dat bijvoorbeeld technische installaties op maat van het gebouw ontworpen kunnen worden. De tijdsperiode die gebruikt wordt, varieert van 1 jaar tot de beschouwde levensduur van het gebouw.

De focus van deze masterproef ligt op het effect van een energetische renovatie op de milieu-impact van een woning. Hiervoor zijn eventuele interne renovatiemaatregelen of onderhoudswerken niet relevant, aangezien deze niet bijdragen aan de verhoging van de energie-efficiëntie van het gebouw. Net als in het onderzoek van Van de moortel et al. (2022) is de functionele eenheid in dit onderzoek daarom vastgesteld op de volledige woning, met uitzondering van de binnenelementen, gedurende een levensduur van 60 jaar. Met binnenelementen worden hier de binnenmuren, binnendeuren, verdiepingvloeren en trappen bedoeld.

B. Levensduur

De Europese norm NBN EN 15978 bepaalt dat de levensduur die beschouwd moet worden bij de LCA van een bestaand gebouw gelijk is aan de resterende levensduur en niet de volledige levenscyclus van het gebouw. Bij een LCA van de renovatie van een gebouw betekent dit dat de beschouwde levensduur start op het moment dat de renovatie wordt uitgevoerd en eindigt op het moment dat het gebouw zijn functie niet langer kan vervullen.

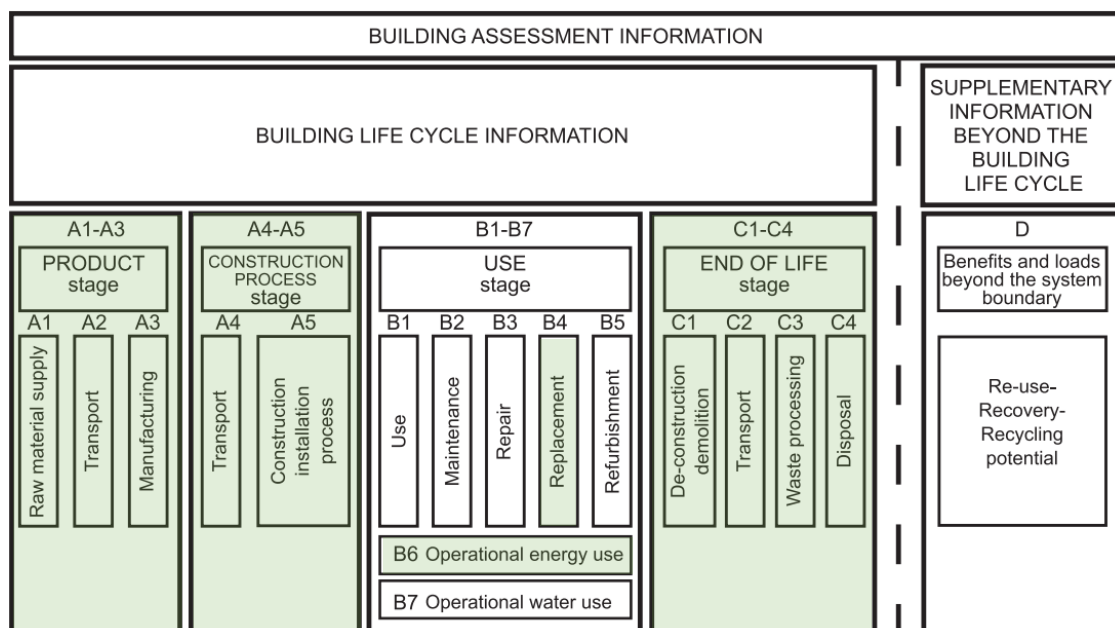
In de literatuur worden echter verschillende levensduurperiodes gehanteerd. In de besproken studies uit hoofdstuk 3 varieert de levensduur van 30 tot 60 jaar, waarbij 50 en 60 jaar het meeste voorkomen. In de studies die Vilches et al. (2017) hebben onderzocht, is 50 jaar de meest gebruikte levensduur. Ook Thibodeau et al. (2019) concluderen dat de meest gebruikte studieperiode 50 jaar is, gevolgd door een studieperiode van 60 jaar. In Belgische LCA-studies die uitgevoerd worden volgens de MMG (Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouwen)-methode, wordt doorgaans gekozen voor een levensduur van 60 jaar, tenzij anders bepaald door de opdrachtgever (OVAM, 2012). Deze periode is vastgelegd op 60 jaar omdat men ervan uitgaat dat een gebouw na deze periode grondig gerenoveerd moet worden. De structuur heeft over het algemeen een langere levensverwachting, waardoor men ook bij LCA's voor renovaties van gebouwen kan uitgaan van een levensduur van 60 jaar. In deze masterproef worden de aannames door de Belgische instellingen gevolgd en wordt een levensduur van 60 jaar aangenomen.

Een methodologische complexiteit die ontstaat bij de vergelijking van een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie is het feit dat de eerste renovatie-actie in de verschillende renovatiescenario's niet noodzakelijk op hetzelfde moment plaatsvindt. Om een eerlijke vergelijking te maken tussen de verschillende scenario's moet echter ook de periode tussen de start van de renovatie in het eerste

scenario en de start van de renovatie in een ander scenario meegenomen worden. Uitstel van de renovatie voor een bepaalde periode zorgt er namelijk voor dat de milieu-impact van het operationeel energiegebruik gedurende die periode hoog blijft. Dit mag niet verwaarloosd worden. In deze masterproef wordt er dan ook voor gekozen om de start van de beschouwde studieperiode vast te leggen op 1 januari 2023, ook wel jaar 0 genoemd: het moment dat de eerste renovatiestap uitgevoerd wordt.

C. Systeemgrenzen

In de norm NBN EN 15978 wordt de levenscyclus van een gebouw onderverdeeld in vier fasen die elk uit verschillende modules bestaan: de productiefase, de constructiefase, de gebruiksfase en de eindelevensfase. Na deze eindelevensfase kan er nog een vijfde fase, module D, gedefinieerd worden. In deze fase kan de impact van eventueel hergebruik van materialen in rekening gebracht worden. Het geheel van de modules die in een bepaalde studie beschouwd worden, noemt men de systeemgrenzen. Deze zijn voor dit onderzoek aangeduid in Figuur 14. In de volgende paragrafen worden de aannames voor de berekening van de milieu-impact van elk van deze modules besproken.



Figuur 14: Overzicht van de verschillende levenscyclusfasen en systeemgrenzen van een gebouw (NBN EN 15978)

Voor de berekening van de milieu-impact in de verschillende modules, worden in deze masterproef de aannames uit de MMG-methode gevolgd (OVAM, 2012). Deze methode is opgesteld voor gebouwen in de Belgische context.

Module A omvat de productie- en constructiefase. In de verschillende modules van de productiefase (A1-A3) worden de impact van de ontginning van grondstoffen, het transport tot aan de fabriek en de fabricage van de uiteindelijke producten ondergebracht. De transportafstanden en het gebruikte transportmiddel zijn materiaalafhankelijk en worden bepaald volgens de aannames van de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) (2018). De constructiefase (A4-A5) bevat het

transport van de fabriek tot aan de werf en de installatie van de producten op de werf. Tijdens het installatieproces wordt 5% materiaalverlies verondersteld voor alle materialen behalve voor schrijnwerk en technische installaties. Voor de bepaling van de transportafstanden en -middelen wordt opnieuw gesteund op de aannames van OVAM (2018).

De gebruiksfase (B1-B7) omvat het gebruik, onderhoud, herstellingen en vervangingen van constructieonderdelen, eventuele renovaties en het energie- en watergebruik tijdens de levensduur van het gebouw. In deze masterproef wordt enkel de milieu-impact die gerelateerd is aan het energiegebruik en aan vervangingen in rekening gebracht. Het operationeel energiegebruik wordt berekend op basis van de EPB-software. Om het tijdstip van vervangingen te berekenen, moet eerst een aanname gemaakt worden over de levensduur van de gebouwcomponenten. Vervolgens moet er een methode opgesteld worden om het tijdstip van een vervanging te bepalen.

De structuur van het gebouw wordt verondersteld een levensduur van 120 jaar te hebben, deze moet dus niet vervangen worden (TOTEM, 2020). De levensduur van de andere gebouwcomponenten wordt telkens ingeschat aan de hand van de documentatie van TOTEM (2020). Voor de elementen met een levensduur van meer dan 60 jaar in TOTEM, worden de aannames van de Stichting Bouwresearch (SBR) (2011) gebruikt. Verschillende materialen die samen één gebouwcomponent vormen en in een realistisch scenario samen vervangen zullen worden, krijgen een gelijke levensduur toegekend. Hiervoor wordt de kortste levensduur van de samenstellende materialen verondersteld.

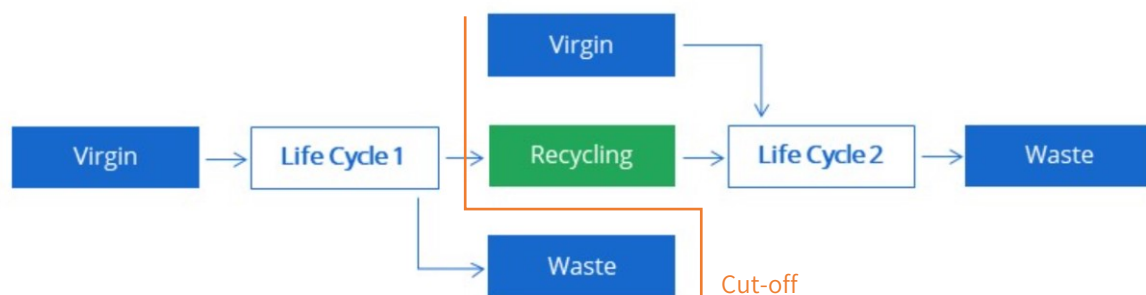
In de MMG-methodologie wordt gesteld dat een niet-essentieel element vervangen wordt wanneer het einde van zijn theoretische levensduur bereikt is en de resterende studieperiode niet korter is dan de helft van de theoretische levensduur van dit element. Een element dat belangrijk is voor de veiligheid of het comfort, zoals een verwarmingsketel, wordt sowieso vervangen wanneer het einde van zijn levensduur bereikt is (OVAM, 2012). In dit onderzoek zou het letterlijk toepassen van deze rekenregel er echter toe leiden dat in sommige scenario's twee jaar voor het einde van de studieperiode of net voor de implementatie van een warmtepomp nog een nieuwe condensatieketel wordt geïnstalleerd. Omdat dit geen realistisch scenario is, is in deze masterproef geopteerd om alle aanwezige elementen als niet-essentieel te beschouwen. De vervanging van elk element, ook van de technische installaties, kan dus met maximaal de helft van de theoretische levensduur uitgesteld worden.

Een moeilijkheid bij een theoretische casestudy is dat er aannames gemaakt moeten worden in verband met de ouderdom van componenten en wanneer ze voor de eerste keer vervangen moeten worden. In dit onderzoek wordt uitgegaan van de basisveronderstelling dat het gebouw in slechte staat verkeert. Alle componenten met een levensduur die kleiner of gelijk aan 60 jaar is, moeten dus vervangen worden aan het begin van de studieperiode. Bij de gefaseerde renovatiescenario's is het echter meer waarschijnlijk dat de vervanging van deze elementen tegelijk met de renovatie van dat onderdeel zal gebeuren. Daarom stelt dit onderzoek een variatie voor op de rekenregel uit de MMG-methodologie om het aantal vervangingen te berekenen: indien de periode tussen de start van de

studieperiode en de geplande renovatie van een bepaald deel van de gebouwschil korter is dan de helft van de levensduur van de elementen die aan vervanging toe zijn, wordt de vervanging van die elementen uitgesteld totdat het schildeel gerenoveerd wordt. Als deze periode langer is zullen de elementen die het einde van hun levensduur bereikt hebben, vervangen worden aan het begin van de studieperiode.

De eindelevensfase (C1-C3) is de laatste fase waarvan de milieu-impact in deze masterproef wordt berekend. In deze fase worden de ontmanteling van het gebouw, het afvaltransport vanaf de werf tot de plaats van afvalverwerking en de afvalverwerking ondergebracht. Deze milieu-impact is materiaalafhankelijk en bij de technische installaties, die uit heel wat verschillende materialen bestaan, wordt hier een vereenvoudigde berekeningsmethode toegepast: er wordt verondersteld dat het volledige product bestaat uit het materiaal met het hoogste gewicht. Het transport van de ontmantelde materialen gebeurt telkens met een vrachtwagen van 16-32 ton en de afgelegde afstanden zijn afhankelijk van de methode van afvalverwerking. Materialen kunnen worden gestort, verbrand, gerecycleerd en/of hergebruikt. Opnieuw wordt er gesteund op de aannames van OVAM (2018) om in te schatten hoe de afvalverwerking van elk materiaal gebeurt. De milieu-impact ten gevolge van recyclage of hergebruik aan het einde van de levenscyclus wordt in deze masterproef echter niet meegenomen. Er is namelijk gekozen om te werken met de *cut-off* methode, waarbij alle voor- en nadelen die verbonden zijn met het hergebruik en de recyclage van materialen toegekend worden aan de levenscyclus waarin ze hergebruikt worden. Het principe van de *cut-off* methode wordt geïllustreerd in Figuur 15.

In de bijlages zijn alle aannames voor de levenscyclusanalyse die in deze masterproef gebruikt zijn, geïnventariseerd. In bijlage C zijn de aannames in verband met transportafstanden en transportmiddelen samengevat. De afvalscenario's zijn terug te vinden in bijlage D en de gehanteerde levensduur van elk materiaal is terug te vinden in bijlage A.



Figuur 15: Principe cut-off methode

Niet alleen moet er beslist worden welke levenscyclusfasen beschouwd zullen worden in het LCA-onderzoek. Ook moet er vastgelegd worden welke materialen of gebouwelementen al dan niet

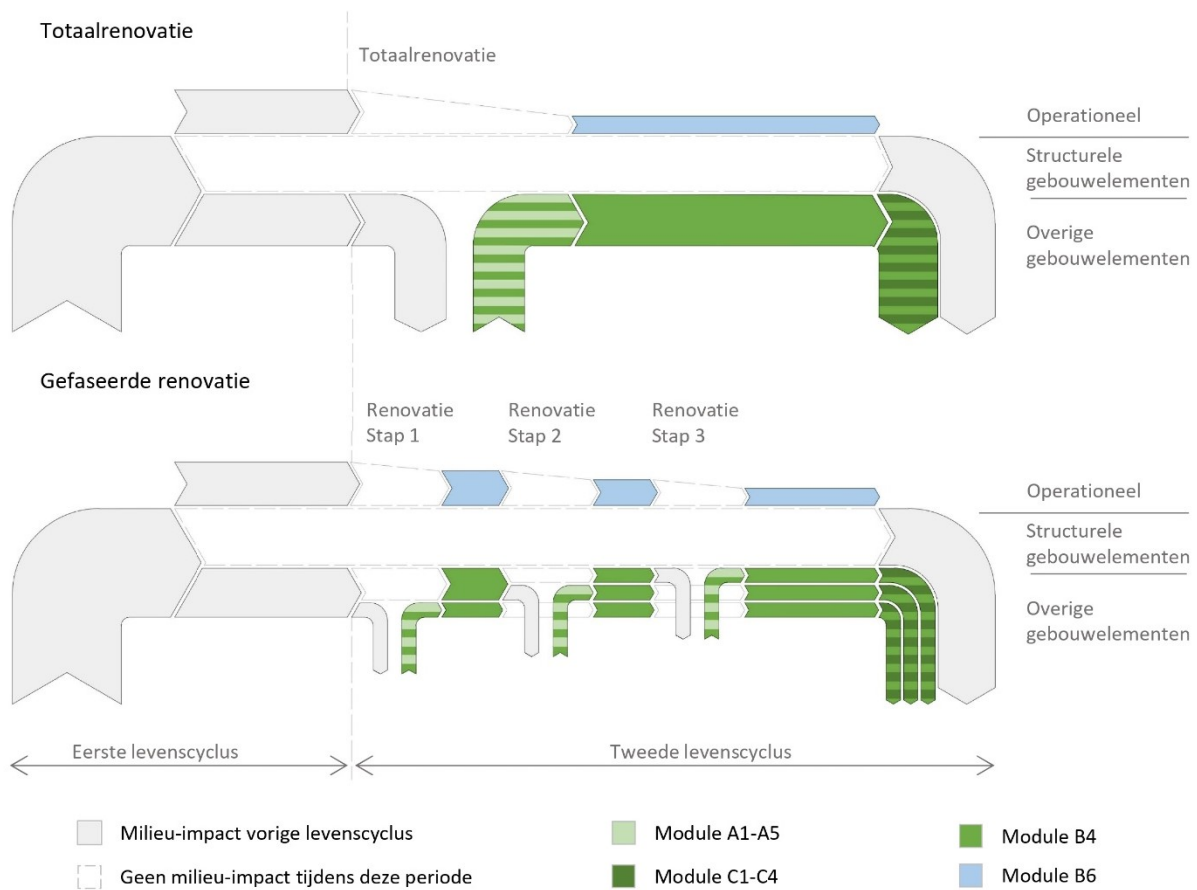
meegenomen worden in de berekening en in welke module deze ondergebracht worden. Bij een vergelijkende LCA-studie dient dit te gebeuren op een manier waarop geen van de beschouwde scenario's een voordeel toebedeeld krijgt. Dit is een methodologische uitdaging.

In deze masterproef is ervoor gekozen de milieu-impact van de volledige levenscyclus te berekenen voor alle materialen die toegevoegd worden vanaf het begin van de studiekeerperiode. Dit zijn zowel de materialen die nodig zijn voor vervangingen van elementen die het einde van hun levensduur bereiken hebben als de materialen die nodig zijn voor de energetische renovatie. De milieu-impact van de afvalverwerking van reeds aanwezige materialen wordt niet berekend, deze hoort bij de eerste levenscyclus van de woning.

Van de moortel et al. (2022) stellen in hun onderzoek voor om de renovatiemaatregelen die aan de start van de studiekeerperiode genomen worden niet onder te brengen in de module voor renovatie (B5), maar wel in module A. De milieu-impact van een tweede renovatiestap, waarin een condensatieketel nog vervangen wordt door een warmtepomp, wordt dan weer ondergebracht in module B5. In deze masterproef worden enkele wijzigingen aan deze aanpak voorgesteld. De module B5 voor renovatie zal in deze masterproef niet gebruikt worden. De milieu-impact van de extra materialen die toegevoegd worden bij de renovatie van de woning wordt ondergebracht in module A, ongeacht of deze aan het begin van de studiekeerperiode of in een latere stap toegevoegd worden. Dit zijn de 'nieuw toegevoegde materialen'. Wanneer deze nieuw toegevoegde materialen aan het einde van hun levensduur vervangen moeten worden, zal de milieu-impact hiervan ondergebracht worden in de module voor vervangingen (B4). De vervanging van de materialen die reeds aanwezig zijn in de bestaande woning, wordt altijd gezien als een vervanging, ook wanneer deze vervanging tijdens een renovatiestap uitgevoerd wordt. De corresponderende milieu-impact wordt dus in module B4 ondergebracht. Een volledig overzicht van de systeemgrenzen in dit onderzoek is weergegeven in Tabel 7 en Figuur 16

Tijdens een renovatiestap	Productie en constructie van nieuw toegevoegde materialen	Module A
	Productie en constructie van vervangingen van reeds aanwezige materialen	Module B4
	Afvalverwerking van reeds aanwezige materialen die vervangen worden	Buiten beschouwing
Tijdens de levensduur	Operationeel energiegebruik	Module B6
	Eventuele vervangingen	Module B4
Einde levensduur	Afvalverwerking van alle nieuw toegevoegde materialen	Module C
	Afvalverwerking van de reeds aanwezige materialen	Module B4
	Afvalverwerking van de structuur van het gebouw	Buiten beschouwing

Tabel 7: Afbakening systeemgrenzen voor de vergelijkende LCA tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie



Figuur 16: Afbakening systeemgrenzen voor de vergelijkende LCA tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie

4.2.2 Levenscyclusinventarisatie

De volgende stap van een levenscyclusanalyse is de levenscyclusinventarisatie of LCI. In deze dataverzamelingsfase worden de inkomende en uitgaande milieustromen van alle materialen en processen in het systeem in kaart gebracht en gekwantificeerd. Deze inkomende stromen zijn bijvoorbeeld het energie- en watergebruik dat nodig is om een product te produceren en de impact van de ontginning van de grondstoffen. Onder de uitgaande stromen wordt bijvoorbeeld het afval dat ontstaat of de uitstoot tijdens de levensduur van het product verstaan (Liebsch, 2023).

Er bestaan verschillende databanken waarin de inkomende en uitgaande stromen van materialen en processen gedocumenteerd zijn. In deze masterproef wordt er gebruik gemaakt van de ecoinvent databank (versie 3.6). Dit is één van de meest gebruikte databanken voor LCA-studies die focussen op de renovatie van gebouwen, aldus (Thibodeau et al., 2019). Ze bevat momenteel informatie over meer dan 18000 processen of 'datasets' en er zijn heel wat gegevens en materialen beschikbaar voor de Europese context, waarin de Belgische context uiteraard vervat is. De gekozen materialen en processen zijn geïnventariseerd in bijlage A (productie) en B (afvalverwerking). Daarnaast wordt er in deze masterproef voor gekozen om de LCI uit te voeren met behulp SimaPro (versie 9.1.1.1) te werken. Deze software wordt vaak gebruikt in combinatie met de ecoinvent databank en is opgebouwd op basis van de ISO-normen voor levenscyclusanalyse.

Niet alleen de milieu-impact van de gebruikte materialen en afvalverwerkingsprocessen moeten bepaald worden, ook het operationeel energiegebruik vormt een belangrijke. De ecoinvent databank bevat ook een dataset over gas en elektriciteit, waarvan de milieu-impact in SimaPro kan worden berekend. Deze waarden moeten vervolgens vermenigvuldigd worden met het eindenergiegebruik voor ruimteverwarming (RVW), sanitair warm water (SWW) en hulpenergie. Om het energiegebruik van de woning te berekenen, wordt gebruik gemaakt van de EPB-software 3G (versie 13.5.1). Het operationeel energiegebruik is voor elk van de beschouwde scenario's opgenomen in bijlage G.

4.2.3 Levenscyclusimpactanalyse

In de derde stap van een levenscyclusanalyse, de levenscyclusimpactanalyse (LCIA), worden de verzamelde gegevens verder verwerkt. Het doel is om te begrijpen hoe groot de impact van die verschillende inkomende en uitgaande stromen op het milieu is.

Zoals besproken in hoofdstuk 3, is het belangrijk om niet enkel de impact van het gebouw op één aspect van het milieu, bijvoorbeeld de klimaatverandering, te beoordelen. Ook andere factoren die een impact hebben op het milieu moeten in rekening gebracht worden. Uit het onderzoek van Ramírez-Villegas et al. (2019) blijkt namelijk dat een bepaalde renovatiemaatregel een positief effect kan hebben op de uitstoot van broeikasgassen, maar wel voor een grotere impact van het gebouw op de verzuring van de bodem en de eutrofiëring zorgt. Om dit effect van *burden shifting* te voorkomen en om de milieu-impact zo goed mogelijk te begrijpen, werkt men met impactcategorieën. Elk van deze impactcategorieën komt overeen met een aspect van het milieu of met een gekend milieuprobleem. De verschillende impactcategorieën zijn in de vorm van CEN-indicatoren vastgelegd in NBN EN 15804 en moeten verplicht gebruikt worden tijdens een LCA. Als aanvulling van de CEN-indicatoren, zijn er ook CEN+-indicatoren gedefinieerd. Deze moeten momenteel nog niet verplicht geïntegreerd worden in een LCA.



CEN	CEN+
Klimaatverandering	Ioniserende straling: menselijke gezondheid
Ozonlaagaantasting	Ecotoxiciteit
Verzuring	Fijn stof
Eutrofiëring	Menselijke toxiciteit: kanker
Uitputting niet-fossiele abiotische grondstoffen	Menselijke toxiciteit: niet kanker
Uitputting fossiele abiotische grondstoffen	Waterschaarste
Fotochemische oxidantvorming	Landbezetting: organisch bodemmateriaal
	Landbezetting: biodiversiteit
	Landtransformatie: organisch bodemmateriaal
	Landtransformatie: biodiversiteit

Tabel 8: CEN- en CEN+-indicatoren

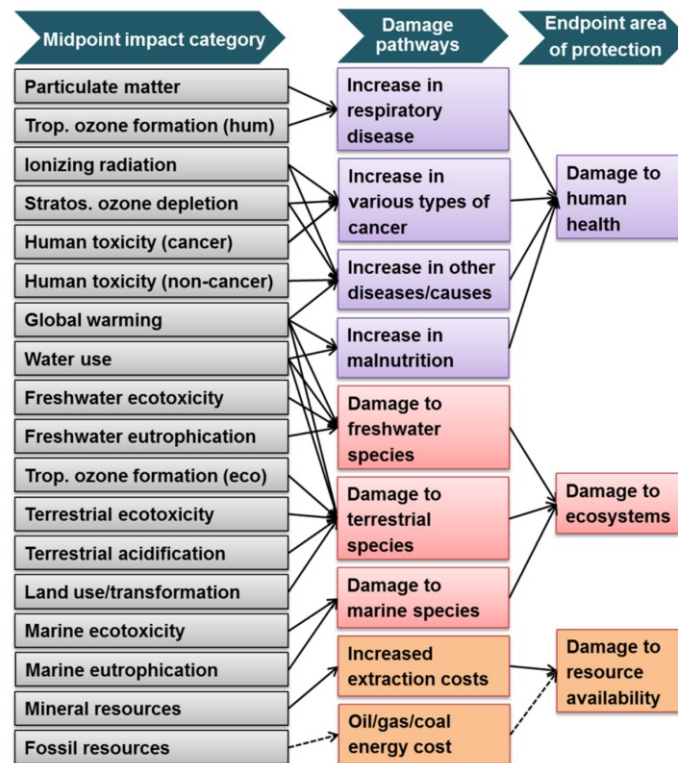
Om de resultaten uit de LCI te vertalen naar een milieu-impact voor deze impactcategorieën wordt een effectenbeoordelingsmethode gebruikt. Hiervoor bestaan verschillende systemen, waaronder de ReCiPe-methode. Deze methode werd in 2008 ontwikkeld in Nederland en is in 2016 geüpdatet.

In de ReCiPe 2016-methode wordt de impact op verschillende indicatoren op twee niveaus berekend: de middelpuntindicatoren en de eindpuntindicatoren. De 18 middelpuntindicatoren komen ongeveer overeen met de CEN- en CEN+-indicatoren en geven dus de impact op afzonderlijke milieuproblemen weer. Ze worden rechtstreeks berekend op basis van de verzamelde informatie uit de LCI-fase en hebben bijgevolg een relatief lage onzekerheid. Omdat er zo veel middelpuntindicatoren zijn, zijn ze echter moeilijk te interpreteren. Om de interpretatie van de resultaten te vereenvoudigen, worden de middelpuntindicatoren omgezet tot drie eindpuntindicatoren. Deze komen overeen met de uiteindelijke schade die aan het milieu toegebracht wordt: de schade aan de menselijke gezondheid, biodiversiteit en grondstoffenschaarste. De omzetting van middelpunt- naar eindpuntindicatoren gebeurt door elke middelpuntindicator te linken aan één of meerdere schadetrajecten. Deze leiden op hun beurt tot schade aan de menselijke gezondheid of ecosystemen of tot grondstoffenschaarste. Om tot deze eindpuntindicatoren te komen, moet er een weging van de middelpuntindicatoren gebeuren en dit zorgt voor een zekere subjectiviteit van de resultaten. Een ander nadeel is dat er informatie verloren gaat. De drie eindpuntindicatoren kunnen ook op hun beurt worden gebundeld om tot een enkele score voor de milieu-impact te komen. In deze stap gebeurt er opnieuw een weging en gaat er informatie verloren. De enkele score is wel zeer eenvoudig te interpreteren en de invloed van alle verschillende impactcategorieën zit erin verwerkt. Omwille van deze voordelen wordt de milieu-impact in dit onderzoek met de enkele score uitgedrukt. Figuur 17 geeft de verbanden tussen de middelpuntindicatoren, de schadetrajecten en de eindpuntindicatoren weer (Huijbregts, 2016).

Omdat de weging van de resultaten een zekere subjectiviteit met zich meebrengt, kan er in ReCiPe 2016 met drie perspectieven gewerkt worden (Huijbregts, 2016).

- *Individualist* (I): Dit scenario gaat uit van een korte termijnvisie van 20 jaar. Enkel onbetwiste impactmechanismen worden in rekening gebracht en het gaat uit van een technologisch optimisme, waardoor de mens zich zou kunnen aanpassen en toekomstige problemen zou kunnen oplossen.
- *Egalitarian* (E): Dit is het meest voorzichtige perspectief. Het gaat uit van een lang tijdsbestek en houdt rekening met alle impactmechanismen waarvoor gegevens beschikbaar zijn.
- *Hierarchist* (H): Dit perspectief ligt tussen de twee anderen. Het is gebaseerd op wetenschappelijke consensus wat betreft het tijdsbestek en de plausibiliteit van verschillende impactmechanismen.

In deze masterproef wordt uitgegaan van het hiërarchische perspectief, wat het meest gematigde is. De totale milieu-impact die aan de hand van deze methode bekomen wordt voor 1 kg van elk van de gebruikte materialen, is opgenomen in bijlage E.



Figuur 17: Overzicht van de impactcategorieën in de ReCiPe 2016 methodologie en hun relatie tot de beschermingsgebieden (Huijbregts, 2016)

4.2.4 Interpretatie

In de laatste fase van een levenscyclusanalyse worden de resultaten geanalyseerd en geïnterpreteerd. Om relevante conclusies te trekken, wordt er teruggekoppeld naar de doelstelling die in de eerste stap is geformuleerd. In de interpretatiefase van een Levenscyclusanalyse moeten de volgende stappen worden doorlopen (ISO 14044:2006):

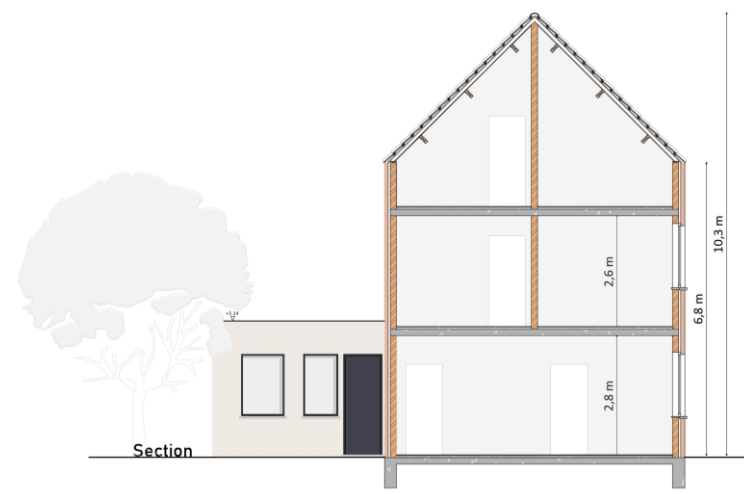
- Identificeren van belangrijke problemen op basis van onze LCI- en LCIA-fase.
- Beoordelen van het onderzoek zelf, inclusief de volledigheid, de robuustheid en de consistentie van de uitvoering.
- Trekken van conclusies, bespreken van beperkingen en aanbevelingen.

5 Scenario's

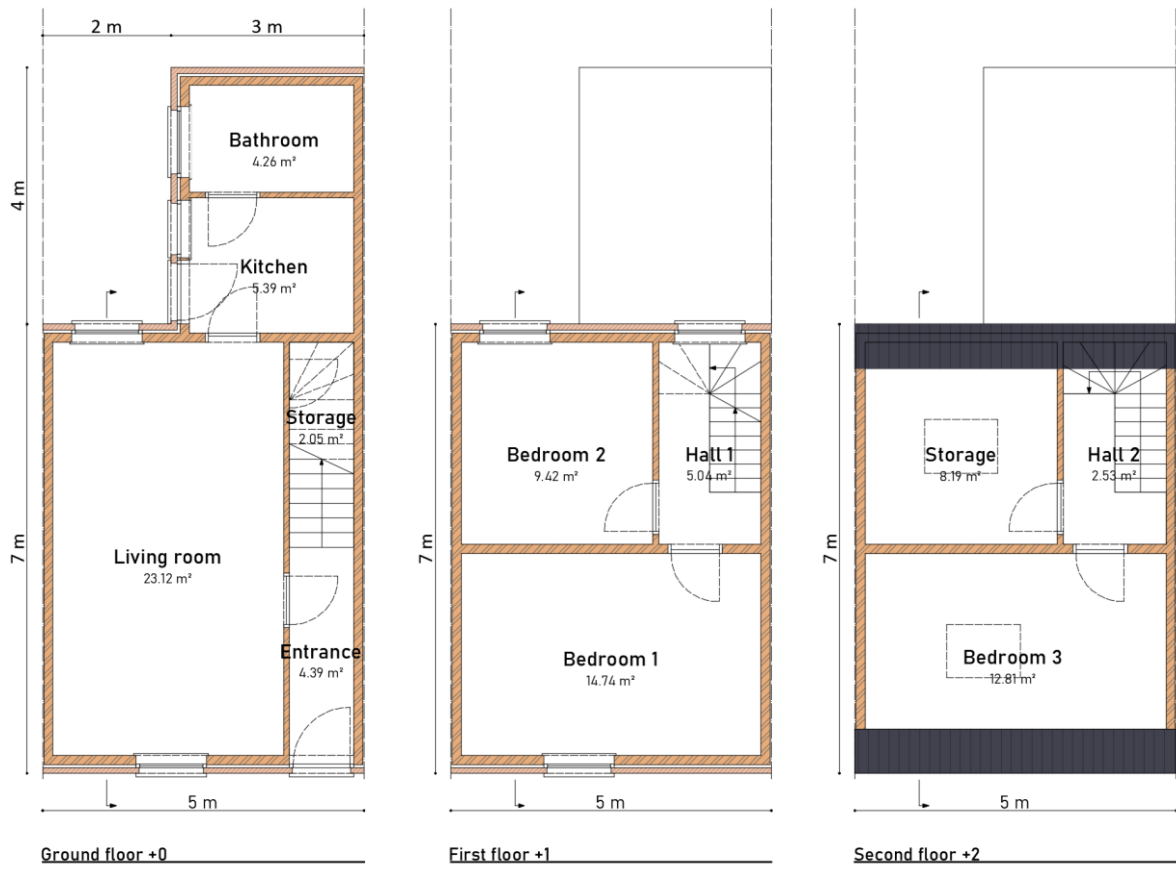
Om de methodologie te testen en de onderzoeksvragen te beantwoorden zal er vertrokken worden van een casestudy. Deze wordt in het eerste deel van dit hoofdstuk beschreven. Vervolgens wordt uiteengezet aan welke eisen de renovatiescenario's moeten voldoen en welke keuzes en aannames er gemaakt worden voor de luchtdichtheid en de berekening van de extra warmteverliezen doorheen bouwknopen. Ten slotte wordt een referentiescenario vastgelegd en worden ook de renovatiemaatregelen voor de renovatiescenario's gekozen. Deze renovatiemaatregelen worden zodanig gekozen zodat er voldaan wordt aan alle eisen die op korte en lange termijn aan woningen gesteld worden. In het referentiescenario wordt het gebouw in stand gehouden en zullen er enkel vervangingen uitgevoerd worden. Dit scenario zal dienen als referentiepunt: er kan bepaald worden hoeveel beter de gefaseerde renovaties en totaalrenovaties scoren op vlak van milieu-impact.

5.1 De casestudy

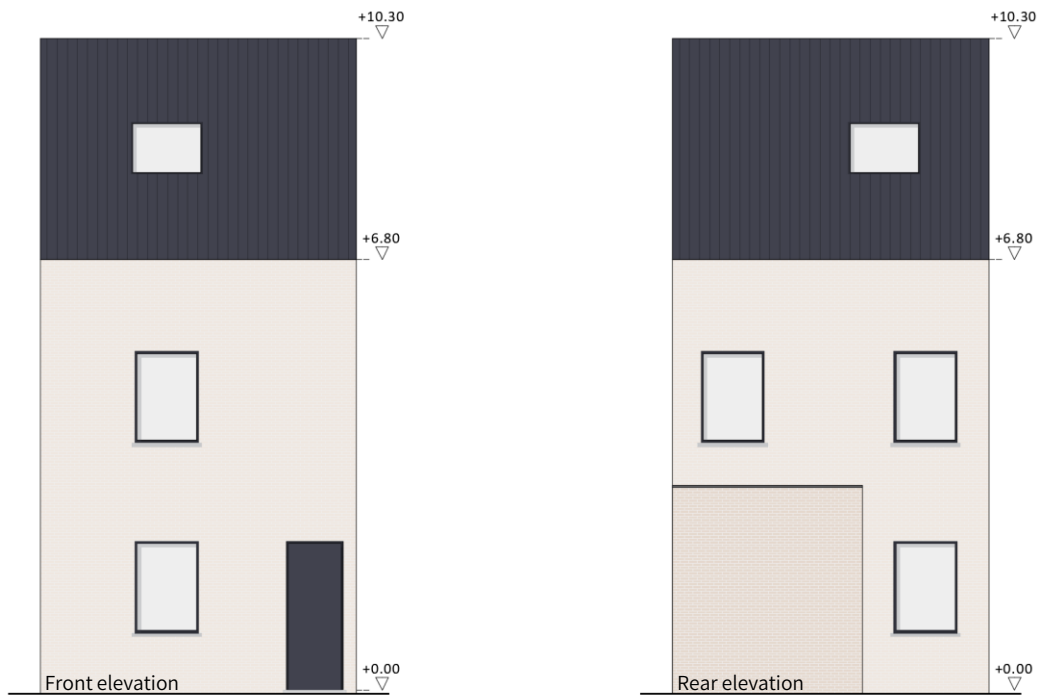
De casestudy waarop de methodologie, die beschreven werd in hoofdstuk 4, uitgetest zal worden, is een niet-geïsoleerde type-rijwoning. Deze casestudy is qua typologie en bouwwijze representatief voor een groot aandeel van de Belgische woningen in een stedelijke context. Het is een eengezinswoning die bestaat uit een gelijkvloers met een uitbouw achteraan en twee verdiepingen. De tweede verdieping bevindt zich onder een hellend dak. De rijwoning is 5 m breed, de gevel is 6,8 m hoog en de nokhoogte is 10,3 m. Het hoofdvolume is 7 m diep en de uitbouw is nog eens 4 m diep en 3 m breed. Op het gelijkvloers vindt men de inkomhal, leefruimte, berging, keuken en badkamer terug. Op de eerste verdieping zijn er twee slaapkamers en ook op de derde verdieping zijn er twee ruimtes, waarvan er één als slaapkamer en één als berging gebruikt wordt.



Figuur 18: Snede casestudy rijwoning



Figuur 19: Plannen casestudy rijwoning



Figuur 20: Gevels casestudy rijwoning

Figuur 21 geeft de opbouw van de gebouwschil van de casestudy in de niet-gerenoveerde toestand weer. De gevel en de gemene muur van de casestudy zijn spouwmuren. De draagmuur bestaat telkens uit gemetste snelbouwsteen (140 mm) met cementmortel. Tussen de twee spouwbladen is er telkens een luchtspouw, deze is 40 mm breed bij de gemene muur en 50 mm bij de gevel. Het buitenspouwblad van de gevel bestaat uit bakstenen (9 mm) die gemetst zijn met cementmortel. De binnenkant van de muur is telkens afgewerkt met een pleisterlaag (12 mm). De voorgevel is naar het oosten gericht, de achtergevel naar het westen.

De woning heeft een houten gordingendak dat onder een helling van 45° staat. Onder de tengellatten is een onderdak aangebracht dat bestaat uit vezelcementplaten (3 mm). Aan de kepers zijn gipskartonplaten (12,5 mm) bevestigd, waardoor er zich een luchtspouw bevindt tussen het onderdak en de gipskartonplaten. Het plat dak bestaat uit een draagvloer uit gewapend beton (150 mm) met hierboven een betonnen hellingslaag. Het dak is waterdicht gemaakt aan de hand van een EPDM dakafdichting (1,3 mm) en aan de binnenkant is het dak afgewerkt met een pleisterlaag (12 mm). De vloer op volle grond bestaat uit een draagvloer uit gewapend beton (150 mm) met daarboven een gewapende dekvloer (50 mm) en eikenhouten planken (20 mm) als vloerafwerking.

De buitendeuren zijn gemaakt uit eikenhout en aluminium en de ramen bestaan uit eikenhouten raamkaders met enkel glas (4 mm).

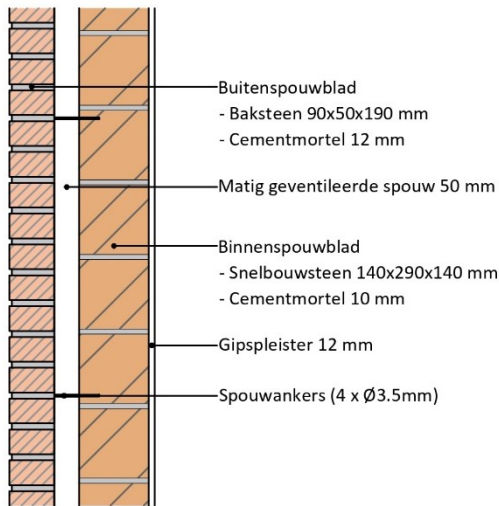
Er wordt verondersteld dat er natuurlijke ventilatie aanwezig is in de woning via roosters aan de ramen en deuren. De m-factor van het ventilatiesysteem is 1,35. Deze factor geeft een matige uitvoeringskwaliteit weer. Volgens de FOD Economie (2021) is de gascondensatieketel de meest voorkomende opwekker voor verwarming in Belgische woningen. Daarom wordt ook in deze casestudy aangenomen dat een gascondensatieketel de woning voorziet van warm water voor RVW en sanitair warm water. De warmteafgifte gebeurt aan de hand van radiatoren en er wordt een temperatuurregime van 90/70°C verondersteld. De woning wordt dus verwarmd op hoge temperatuur en de condenserende werking van de condensatieketel zal nog niet benut kunnen worden. Er wordt verondersteld dat er geen koelinstallatie aanwezig is.

De oppervlaktes van elk van de gebouwschildelen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

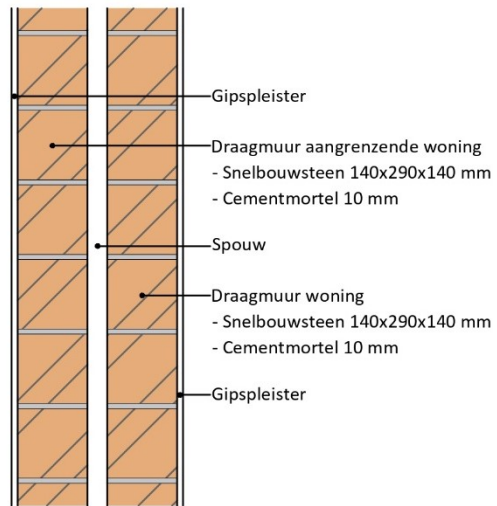
Gebouwschildeel	Oppervlakte [m ²]
Gevel	67,2
Gemene muur	133,2
Plat dak	12,0
Hellend dak	46,8
Raam	12,6
Buitendeur	4,2
Vloer op volle grond	47,0

Tabel 9: Oppervlaktes gebouwschildelen

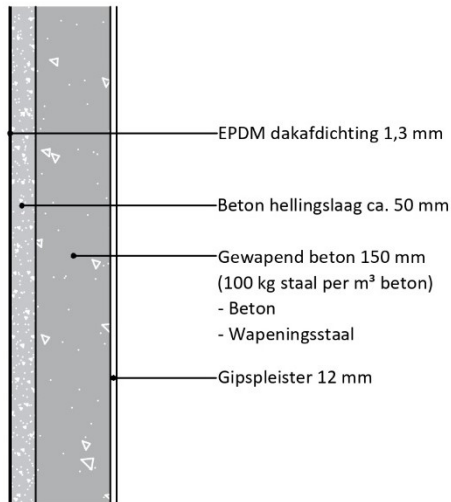
Gevel: $U = 1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$



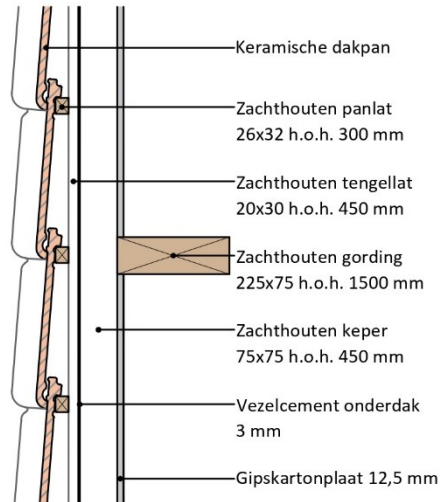
Gemene muur: $U = 1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$



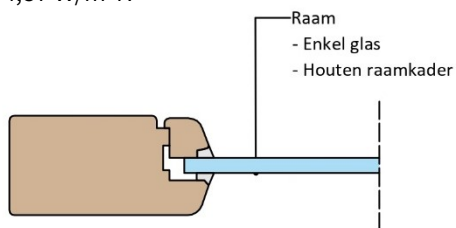
Plat dak: $U = 3,45 \text{ W/m}^2\text{K}$



Hellend dak: $U = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$

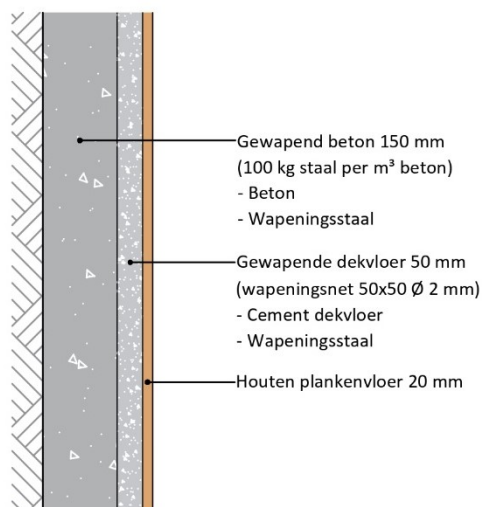


Raam: $U = 4,87 \text{ W/m}^2\text{K}$



Deur: $U = 2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vloer op volle grond: $U = 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$



Figuur 21: Opbouw schildelen casestudy - bestaande toestand

5.2 Randvoorwaarden

Voordat de renovatiescenario's vastgelegd kunnen worden, moeten er eerst een aantal keuzes gemaakt worden in verband met de randvoorwaarden. In die onderdeel wordt een antwoord geformuleerd om de volgende drie vragen:

1. Aan welke eisen moeten de voorgestelde renovatiemaatregelen voldoen?
2. Op welke manier zullen de extra warmteverliezen doorheen bouwknopen berekend worden?
3. Welke luchtdichtheid kan er redelijkerwijze aangenomen worden?

5.2.1 Eisen

Zoals in hoofdstuk 2 beschreven is, kunnen er twee types eisen in verband met een energetische renovatie van een woning worden gedefinieerd. Enerzijds zijn er de geldende eisen op het moment van renovatie, deze zijn vastgelegd in de regelgeving voor Energieprestatie en Binnenklimaat (EPB). Anderzijds zal er op langere termijn voldaan moeten worden aan de doelstellingen die gesteld zijn in de 'Vlaamse langetermijnrenovatiestrategie voor gebouwen 2050' (Vlaamse Regering, 2020). In de volgende paragrafen worden beide types onderzocht.

A. EPB-eisen

In 2006 is in België de EPB-regelgeving ingevoerd om de overgang naar koolstofneutrale woningen tegen 2050 te ondersteunen. Alle gebouwen in Vlaanderen waarvoor een stedenbouwkundige vergunning wordt gevraagd of een melding wordt gedaan, moeten aan de EPB-eisen voldoen. Deze eisen zijn afhankelijk van de bestemming van het gebouw, de aard van de werken en het jaar van de aanvraag van de stedenbouwkundige vergunning of de melding. Zo moet een nieuwbouwwoning aan strengere eisen voldoen als een gerenoveerde woning en worden de eisen om de paar jaar strenger. De relevante eisen en definities kunnen worden teruggevonden op EPB-pedia (s.d.).

Bij de totaalrenovatie zijn de eisen voor een ingrijpende energetische renovatie (IER) van kracht. Dit wordt gedefinieerd als een renovatie waarbij aan de volgende twee voorwaarden voldaan wordt:

- minstens 75% van de bestaande en nieuwe scheidingsconstructies die het beschermd volume omhullen worden geïsoleerd,
- minstens de opwekkers om een specifiek binnenklimaat te realiseren worden volledig vervangen. Onder deze opwekkers worden de installaties voor verwarming, koeling, sanitair warm water, etc. verstaan. In de praktijk wordt er echter al over een IER gesproken wanneer enkel de verwarmingsinstallatie vervangen is.

De eisen die vanaf 2023 bij een IER gelden, zijn de volgende:

- er moet een E60-peil gehaald worden,
- er moet er een ventilatiesysteem aanwezig zijn,
- voor nieuwe en na-geïsoleerde schildelen mag de maximale U-waarde niet overschreden worden,
- er moet jaarlijks minstens 20kWh/m² aan hernieuwbare energie geproduceerd worden. Voor ingrijpende energetische renovaties die niet voldoen aan de eis op het minimumaandeel hernieuwbare energie, verstrengt het maximale E-peil met 10%. Dit wil zeggen dat het E-peil maximum E54 mag bedragen in plaats van E60.

Bij een gefaseerde renovatie worden de verschillende renovatiestappen niet gezien als een IER, maar als een gewone renovatie. Hierbij zijn de eisen minder streng (EPB-pedia, s.d.):

- De maximale mag niet worden overschreden bij nieuwe en na-geïsoleerde schildelen
- De nieuwe of vernieuwde installaties moeten voldoen aan de minimale installatie-eisen
- In nieuwe ruimtes en in bestaande ruimtes bij de vervanging van vensters moeten er minimale ventilatievoorzieningen zijn

B. Langetermijndoelstelling Vlaanderen

In de 'Vlaamse langetermijnrenovatiestrategie voor gebouwen 2050' (Vlaamse Regering, 2020) worden de doelstellingen qua energie-efficiëntie voor gebouwen tegen 2050 beschreven. Volgens deze beschrijving kan een woning op twee manieren aan het ambitieniveau voldoen.

- Ofwel dient de volledige gebouwschil geïsoleerd te zijn volgens de geldende eisen en moet er een efficiënte verwarmingsinstallatie aanwezig zijn. Dit kan een condensatieketel, een warmtekrachtkoppeling (WKK), decentrale verwarmingstoestellen met een totaal maximaal vermogen van 5 W/m², een efficiënt warmtenet of een verwarmingssysteem op basis van een hernieuwbare energiebron zijn.
- Ofwel moet de woning een E-peil van E60 of een EPC-label A behalen. EPC-label A komt overeen met een karakteristiek energiegebruik van 100 kWh/m².

C. Relevante eisen voor bepaling maatregelenpakketten

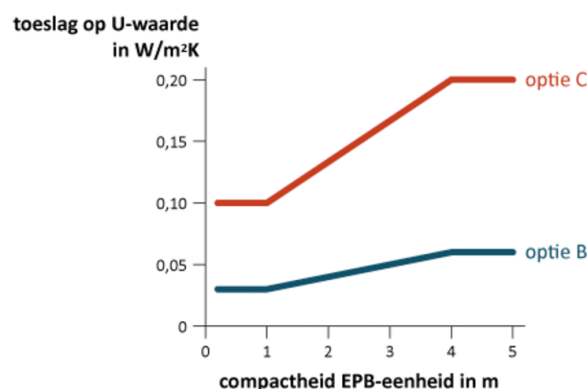
Aangezien deze masterproef met een studieperiode van 60 jaar werkt, moet in elk scenario voldoen aan de eisen die gesteld worden tegen 2050. De scenario's voor totaalrenovatie worden gedefinieerd als ingrijpende energetische renovaties, dus deze moeten ook voldoen aan de eisen voor een IER. De scenario's voor gefaseerde renovatie moeten in principe enkel aan de minder strenge EPB-eisen voor gewone renovaties voldoen en niet aan deze voor een IER. Om echter een eerlijke vergelijking te maken tussen de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie zal in deze masterproef enkel gewerkt worden met pakketten van renovatiemaatregelen die voldoen aan alle eisen: zowel de strenge EPB-eisen voor IER als de Vlaamse langetermijndoelstellingen.

5.2.2 Bouwknopen

In een gebouw zijn er heel wat bouwknopen. Dit zijn plaatsen in de gebouwschil waar extra warmteverliezen kunnen optreden omwille van een onderbreking of dikteverandering van de isolatielaag is of een connectie tussen twee scheidingsconstructies. Wanneer het karakteristiek energiegebruik van het gebouw berekend wordt aan de hand van de EPB-software, moet er ook voor de bouwknopen een berekeningsmethode gekozen worden. Men kan kiezen tussen drie opties:

- A: gedetailleerde methode
- B: EPB-aanvaarde bouwknopen
- C: forfaitaire toeslag

Optie A omvat het afzonderlijk inrekenen van elke bouwknop of het numeriek doorrekenen van het hele gebouw. Zo krijgt men een beeld van de reële invloed van de bouwknopen, maar dit proces is wel zeer arbeidsintensief. Door voor optie B te kiezen kan de invloed van de bouwknopen op een meer vereenvoudigde manier in rekening worden gebracht. Dan moet men aantonen dat de bouwknopen EPB-aanvaard zijn. Voor de EPB-aanvaarde bouwknopen wordt er een forfaitaire toeslag op de U-waarde van 0,03 tot 0,06 W/m²K toegepast. De grootte van deze toeslag is afhankelijk van de compactheid van het gebouw, zoals geïllustreerd is in Figuur 22. Enkel de niet-EPB-aanvaarde bouwknopen moeten nog apart ingerekend worden. Wanneer men ervoor kiest om optie C te volgen, wordt de invloed van de bouwknopen op het totale warmteverlies ingeschat op basis van een forfaitaire toeslag op de U-waarde van 0,10 tot 0,20 W/m²K. Zoals weergegeven in Figuur 22 is deze toeslag opnieuw afhankelijk van de compactheid van het gebouw. Voor de beschouwde casestudy zou optie B resulteren in een forfaitaire toeslag op de U-waarde van 0,041 W/m²K. Indien er voor optie C gekozen wordt, zou de forfaitaire toeslag op de U-waarde 0,137 W/m²K bedragen.



Figuur 22: Forfaitaire toeslag op de U-waarde van de gebouwschil omwille van extra warmteverlies ter plaatse van bouwknopen. In functie van compactheid van het gebouw en gekozen berekeningsmethode

In deze masterproef wordt er verondersteld dat er bij de renovatie van de casestudy geen speciale aandacht gaat naar de koudebrugarme uitvoering van de bouwknopen. De extra warmteverliezen door de bouwknopen worden uitgerekend op basis van optie C, de forfaitaire toeslag. Bij een renovatie is het namelijk niet altijd eenvoudig om het warmteverlies doorheen bouwknopen te

minimaliseren en om koudebruggen te vermijden. Bovendien zou men voor het EPB-aanvaard maken van de bouwknopen extra materialen nodig hebben en hier wordt in deze masterproef geen rekening mee gehouden. In sectie 9.1 wordt in een gevoeligheidsanalyse nagegaan in welke mate deze aanname de resultaten beïnvloedt. Mogelijk zijn de bouwknopen namelijk wel EPB-aanvaard bij de totaalrenovatie, maar niet bij een gefaseerde renovatie. Zoals beschreven in sectie 2.2 is er daar namelijk nog een extra risico op *lock-in* op het niveau van de bouwknopen, waardoor het moeilijker kan zijn om EPB-aanvaarde bouwknopen te bekomen.

5.2.3 Luchtdichtheid

Na de renovatie van de gebouwschil, zal ook de luchtdichtheid van de woning toenemen. Bij de totaalrenovatie gebeurt dit in één keer, maar bij de gefaseerde renovatie zal de luchtdichtheid in stappen verbeteren. Over de wijze waarop de luchtdichtheid verbetert bij de gefaseerde renovatie van de gebouwschil is echter geen éénduidig antwoord te vinden in de literatuur.

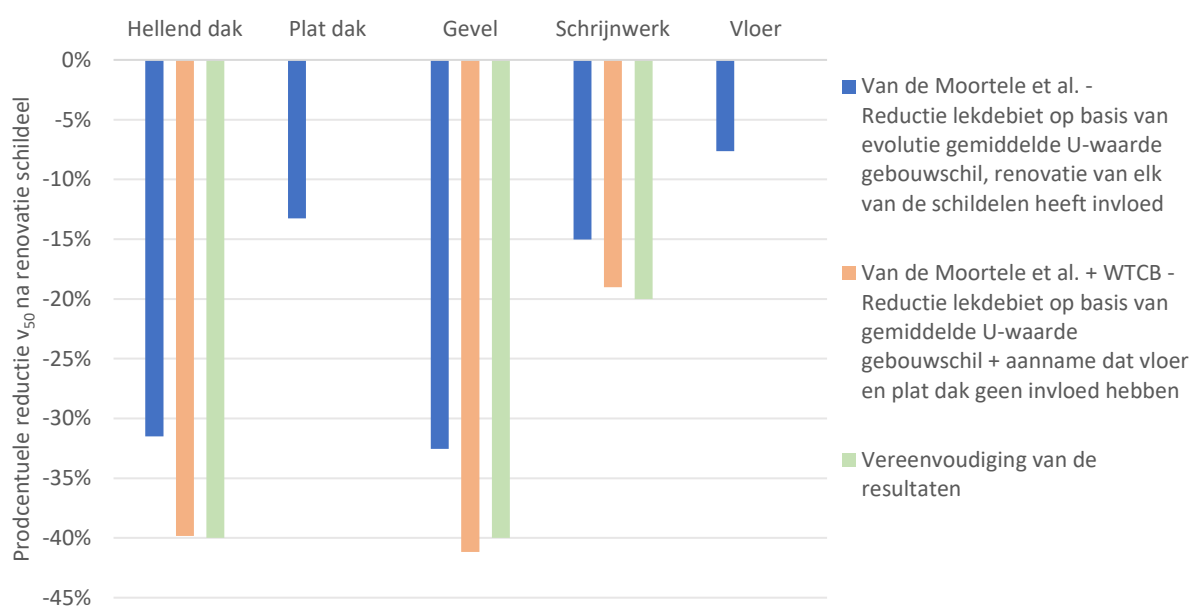
Het WTCB (2015) suggereert in TV255 dat sommige bouwknopen meer invloed hebben op de luchtdichtheid van de gebouwschil dan andere. Dit wil zeggen dat ook de renovatie van sommige schildelen meer invloed heeft op de luchtdichtheid van de gebouwschil dan de renovatie van andere. Hoeveel elk schildeel of elke bouwknop echter bijdraagt aan de luchtdichtheid van het gebouw, wordt niet kwantitatief beschreven. Uit Figuur 23 wordt wel duidelijk dat de bouwdetails aan het hellend dak en aan de gevel zorgen voor (zeer) aanzienlijke lekken. De bouwdetails aan het schrijnwerk zorgen voor aanzienlijke tot onbelangrijke lekken en deze aan het plat dak en de muurvoet zorgen voor onbelangrijke tot marginale luchtlekken. Deze conclusies gelden enkel voor gebouwen uit metselwerk. Voor houtskeletbouw is een andere tabel terug te vinden in TV255.

	Bouwdetail	Prioriteit (*)
Muren uit metselwerk	Muurvoet	④ → ③
	Aansluiting van een dwarsmuur op de gevel	④
	Aansluiting van een tussenvloer of een plat dak (betonnen vloerplaat) op de gevel	④
	Aansluiting van een tussenvloer of een plat dak (welfsel) op de gevel	③
	Aansluiting van een tussenvloer of een plat dak (licht timmerwerk) op de gevel	③ → ②
	Aansluiting van een tussenvloer op de gevel	③
	Aansluiting op de gordingen	② → ①
	Aansluiting van een hellend dak op een puntgevel	①
	Aansluiting van een hellend dak op de gevel	② → ①
	Aansluiting van een hellend dak op een dwarsmuur	② → ①
	Doorboring van het dak door leidingen	②
	Integratie van het schrijnwerk in de ruwbouw	③ → ②
	(*) ① Zeer aanzienlijke lekken – ② Aanzienlijke lekken – ③ Onbelangrijke lekken – ④ Marginale lekken.	

Figuur 23: Prioritair te behandelen bouwdetails op basis van luchtdichtheid (WTCB, 2015)

Van de moortel et al. (2022) veronderstellen in hun onderzoek dat de evolutie van het oorspronkelijke lekdebiet tot het lekdebiet na renovatie lineair met de gemiddelde U-waarde van de gebouwschil verloopt. Wanneer dit uitgerekend wordt voor deze casestudy, bekomt men de blauwe balken in Figuur 24. Bij renovatie van de gevel zou 33% van de daling van het lekdebiet gerealiseerd worden. Bij de renovatie van het hellend dak en de vervanging van het schrijnwerk zou dat respectievelijk 32% en 15% zijn. De grote invloed van de gevel en het hellend dak op de luchtdichtheid strookt met de tabel van het WTCB. Ook de kleinere invloed van het schrijnwerk op de reductie van het lekdebiet komt overeen met de resultaten van het WTCB. De renovatie van het plat dak en de vloer zouden volgens de theorie van Van de moortel et al. (2022) zorgen voor een daling van het lekdebiet met respectievelijk 13% en 8%, terwijl het WTCB (2015) stelt dat de bouwknopen aan deze schildelen slechts zorgen voor onbelangrijke tot marginale luchtlekken. Er is dus een verschil tussen beide theorieën.

Wanneer beide methodes gecombineerd worden, kan aangenomen worden dat de renovatie van het plat dak en de vloer een verwaarloosbare invloed heeft op de luchtdichtheid van het gebouw, zoals in het WTCB-rapport gesteld wordt. Vervolgens kan de invloed van de renovatie van de overige schildelen op het lekdebiet opnieuw bepaald worden volgens de methode van Van de moortel et al. (2022). Dit is in het oranje aangegeven in Figuur 24. Dit keer zorgt de renovatie van de gevel, het hellend dak en het schrijnwerk voor respectievelijk 40%, 41% en 19% van de totale daling van het lekdebiet. De invloed van de gevel en het hellend dak op de luchtdichtheid zou dus zeer gelijkaardig zijn en zou dubbel zo groot zijn als de invloed van het schrijnwerk op de luchtdichtheid van de woning. In deze materproef worden de resultaten ietwat vereenvoudigd en wordt er voor de beschouwde casestudy gesteld dat zowel de renovatie van het hellend dak als van de gevel zorgen voor 40% van de daling van het lekdebiet v_{50} . De vervanging van het schrijnwerk zorgt dan voor 20% van de reductie van het lekdebiet. Deze aannames zijn in het groen in Figuur 24 aangegeven.



Figuur 24: Invloed van de renovatie van schildelen op de reductie van het lekdebiet bij een drukverschil van 50 Pa (v_{50})

5.3 Referentiescenario

In het referentiescenario wordt er vanuit gegaan dat er geen energiebesparende maatregelen gedaan worden. Het gebouw zal echter wel onderhouden worden en dit houdt enkele vervangingen van schildelen en technische installaties in. Aan het begin van de studiekeperiode worden alle elementen met een theoretische levensduur die kleiner is dan of gelijk is aan 60 jaar vervangen. Indien deze elementen later in de studiekeperiode opnieuw het einde van hun levensduur bereiken en de resterende studiekeperiode is langer dan de helft van de theoretische levensduur van het element, worden ze opnieuw vervangen. In deze masterproef wordt hierbij uitgegaan van een theoretisch scenario waarbij bestaande componenten telkens door een identieke component vervangen worden.

In het referentiescenario is de woning niet geïsoleerd en zullen de bouwknopen dus ook niet EPB-aanvaard zijn. De extra warmteverliezen door de bouwknopen zullen in de EPB-software berekend worden op basis van optie C, de forfaitaire toeslag. De woning wordt verondersteld niet erg luchtdicht te zijn: het lekdebiet (v_{50}) is gelijk aan $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, dit is de waarde bij ontsteltenis uit de EPB-software.

5.4 Renovatiescenario's

5.4.1 Renovatiemaatregelen

De renovatiescenario's moeten voldoen aan de eisen voor 2050 en aan de eisen die gesteld worden aan een energetische ingrijpende renovatie. In dit onderdeel worden de verschillende renovatiemaatregelen toegelicht waarmee dit ambitieniveau bereikt zal worden. Zo een vooraf bepaalde combinatie aan renovatiemaatregelen wordt in het verdere verloop van deze masterproef een maatregelenpakket genoemd.

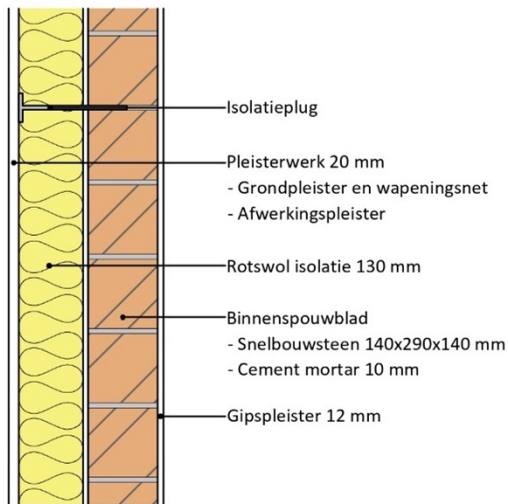
A. Opbouw renoveerde gebouwschil

De gebouwschil wordt telkens geïsoleerd tot de EPB-norm. Om de vergelijking van de milieu-impact van de renovatie van verschillende schildelen zo eerlijk mogelijk te houden, wordt er gekozen om alle schildelen met eenzelfde isolatiemateriaal te isoleren. In deze masterproef wordt gewerkt met rotswol. Hieronder worden de renovatiemaatregelen van de gebouwschil beschreven. In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** wordt de opbouw na renovatie van elk van de schildelen weergegeven.

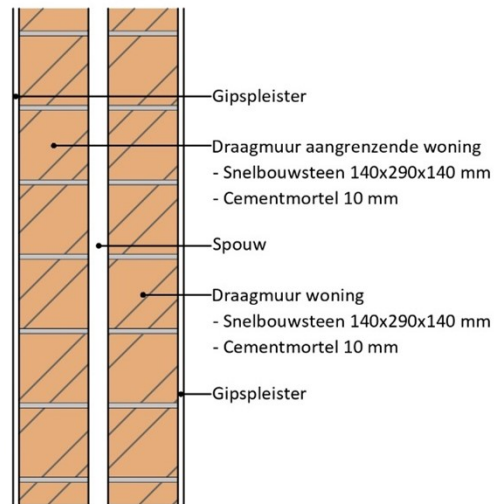
Bij de na-isolatie van de gevel worden de gevelstenen afgebroken en wordt er buitenisolatie bestaande uit rotswol (130 mm) geplaatst. De gevel wordt afgewerkt met pleisterwerk (20 mm). In deze masterproef is ervoor gekozen om de gemene muur in de renovatiescenario's niet bijkomend te

isoleren. Dit omwille van het feit dat de afstand tussen de gemene muur en de tegenoverliggende perceelsgrens kleiner is dan 6 meter, waardoor er geen U-waarde-eis geldt.

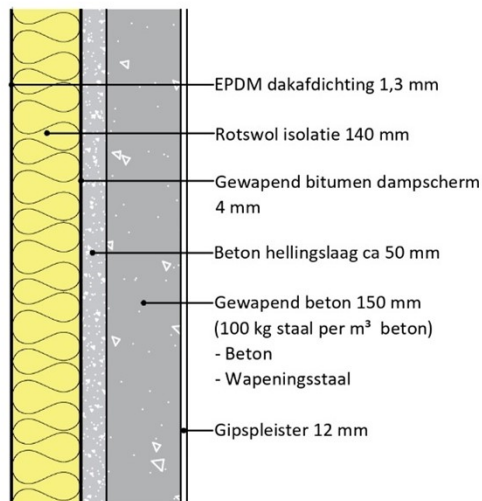
Gevel: $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$



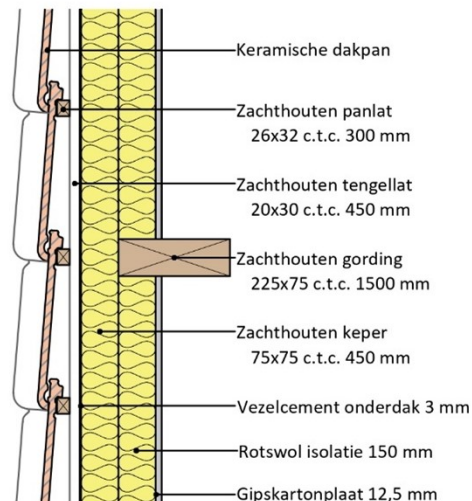
Gemene muur: $U = 1,04 \text{ W/m}^2\text{K}$



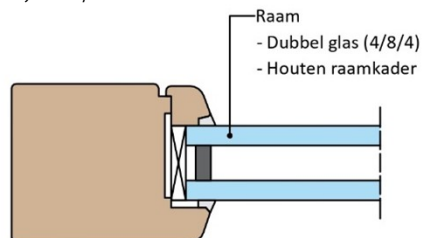
Plat dak: $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$



Hellend dak: $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

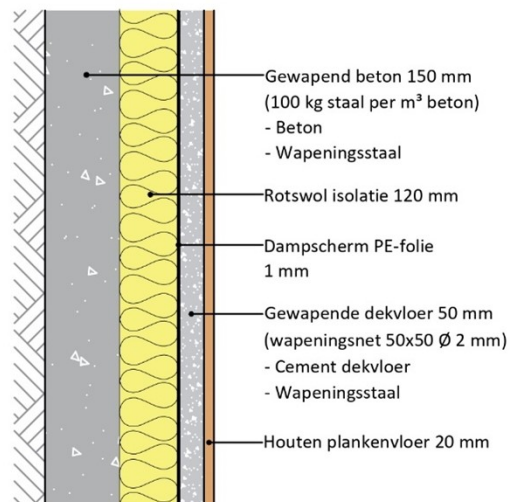


Raam: $U = 1,38 \text{ W/m}^2\text{K}$



Buitendeur: $U = 2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vloer op volle grond: $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$



Figuur 25: Opbouw schildelen casestudy - gerenoveerde toestand

Het hellend dak wordt van binnenuit geïsoleerd (150 mm). Er wordt isolatie geplaatst tussen de kepers en ook de ruimte tussen de gordingen wordt deels opgevuld met isolatie om de beoogde U-waarde te bereiken. De isolatielaag wordt afgewerkt met een gipskartonplaat (12 mm).

Bij de renovatie van het plat dak wordt de dakafdichting verwijderd. Vervolgens wordt er op de afschotlaag een damp scherm geplaatst, hierop komt rotswol (14 mm) en een EPDM afdichting. Op basis van TV215 van het WTCB (2000) kan bepaald worden dat het damp scherm van de klasse E3 moet zijn. Hiervoor wordt een bitumineus materiaal gekozen.

Bij de renovatie van de vloer op volle grond worden de bestaande vloerafwerking en dekvloer weggenomen. Op de bestaande betonplaat wordt drukvaste isolatie geplaatst, waarna de vloer wordt afgewerkt met een PE-folie, een gewapende dekvloer en een eikenhouten plankenvloer.

De ramen worden vervangen door nieuwe eikenhouten raamkaders met dubbel glas. De deuren voldoen reeds aan de geldende U-waarde-eis en zullen in de renovatiescenario's vervangen worden door identieke elementen.

B. Technische installaties

De maatregelenpakketten worden vervolledigd met een selectie van technische installaties. Voor de verwarmingsinstallatie wordt er gewerkt met een gascondensatieketel of een lucht-water warmtepomp. De hygiënische ventilatie wordt voorzien aan de hand van een ventilatiesysteem C+ of een ventilatiesysteem D. Het afgiftesysteem voor RVW wijzigt niet na renovatie, er blijft dus gewerkt worden met radiatoren. Het temperatuurregime verandert echter wel: de aanvoertemperatuur wordt 40°C en de retourtemperatuur 30°C. Op die manier wordt de condenserende werking van de condensatieketel benut en verhoogt de efficiëntie ervan. Een warmtepomp kan pas efficiënt werken bij lage watertemperaturen. De dimensionering van de technische installaties en de gekozen specificaties in de EPB-software zijn terug te vinden in bijlage F.

Om de complexiteit van het onderzoek te beperken is ervoor gekozen om geen extra technische installaties zoals PV-panelen of thermische zonnepanelen mee te nemen in de analyse. Het gestelde ambitieniveau wordt reeds bereikt aan de hand van de hierboven beschreven technische installaties in combinatie met de na-isolatie van de volledige gebouwschil.

C. Beschouwde maatregelenpakketten

In dit onderzoek zal de milieu-impact van een totaalrenovatie en gefaseerde renovatiescenario's met vier verschillende maatregelenpakketten bepaald worden. Het E-peil, het EPC-label en het energiegebruik ervan zijn telkens aan de hand van de EPB-software berekend. In de het verdere verloop van deze masterproef zullen de maatregelenpakketten afgekort worden met de afkorting 'Pak' gevolgd door een nummer van 1 tot en met 4. De beschouwde maatregelenpakketten, het overeenkomstige E-peil en EPC-label en de gebruikte afkorting worden weergegeven in Tabel 10.

			E-peil	EPC-label	Afkorting
Isolatie volgens EPB-eisen	Condensatieketel	Ventilatie C+	53	A	Pak1
		Ventilatie D	43	A	Pak2
	Warmtepomp	Ventilatie C+	34	A	Pak3
		Ventilatie D	29	A	Pak4

Tabel 10: E-peil, EPC-label en afkorting voor de beschouwde maatregelenpakketten

D. Aannames voor finale luchtdichtheid en bouwknopen

Na de renovatie van de gebouwschil zal ook de luchtdichtheid verbeteren. Er wordt verondersteld dat het lekdebiet zowel voor de gefaseerde renovatiescenario's als voor de scenario's met totaalrenovatie verlaagt van 12 m³/m²h naar 6 m³/m²h. Dit is een matige luchtdichtheid. In een gevoeligheidsanalyse (sectie 9.2) zal de invloed van deze aanname op de resultaten onderzocht worden. Zoals reeds vermeld in sectie 5.2.2, worden de warmteverliezen doorheen bouwknopen uitgerekend aan de hand van een forfaitaire toeslag op de U-waarde (Optie C) en zal ook hiervan de invloed bepaald worden in een gevoeligheidsanalyse (sectie 9.1).

5.4.2 Planning gefaseerde renovatie

Om de milieu-impact van een totaalrenovatie te berekenen heeft men enkel het maatregelenpakket nodig. Bij de berekening van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie moeten er echter ook aannames gemaakt worden over hoe die gefaseerde renovatie wordt uitgevoerd in de tijd. Zoals in sectie 1.3 aangegeven werd, zijn er verschillende variabelen bij de planning van een gefaseerde renovatie: de uitvoeringsvolgorde en de periode tussen de uitvoering van verschillende renovatiemaatregelen kan verschillen. Bovendien kunnen renovatiemaatregelen al dan niet tegelijk uitgevoerd worden. In deze masterproef zullen er eerst basisaannames in verband met de planning van de gefaseerde renovatie vooropgesteld worden. Deze worden in dit onderdeel uiteengezet.

A. Uitvoeringsvolgorde van de renovatiemaatregelen

Wanneer men de volgorde van de uit te voeren renovatiemaatregelen bepaalt, wordt algemeen uitgegaan van het principe van de Trias Energetica: men zal eerst de prestaties van de gebouwschil verbeteren alvorens de installaties aan te pakken, de dimensionering van de installaties wordt namelijk bepaald door de gebouwschil. In sectie 2.3 werd echter wel genuanceerd dat de optimale renovatievolgorde vaak projectafhankelijk is.

In deze masterproef wordt in eerste instantie de volgorde op basis van de Trias Energetica aangenomen. De renovatie van de verschillende schildelen gebeurt volgens algemene stelregels die door de Vlaamse Overheid in het initiatief 'BENOveren' naar voren geschoven wordt: eerst wordt het dak geïsoleerd, dan de gevels, vervolgens het schrijnwerk en als laatste de vloer (mijnbenovatie.be, s.d.). Daarna worden de technische installaties aangepakt: eerst wordt er een nieuw ventilatiesysteem geïnstalleerd. Vervolgens wordt ook de verwarmingsinstallatie veranderd.

B. Tegelijk uitvoeren van renovatiemaatregelen

In eerste instantie wordt verondersteld dat er maatregel per maatregel gerenoveerd wordt. Dit wilt zeggen dat elk van de onderdelen van de gebouwschil apart gerenoveerd worden. Ook de technische installaties worden op opeenvolgende momenten geïnstalleerd.

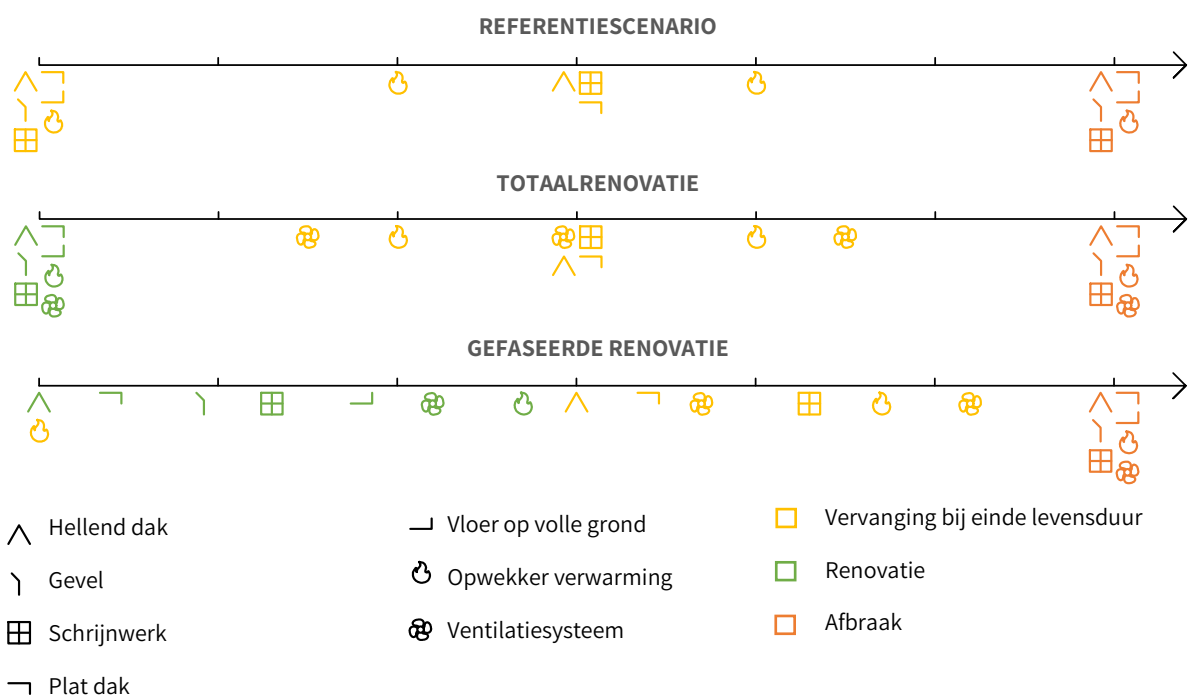
C. Periode tussen uitvoering van renovatiemaatregelen

Een veronderstelling die hier gemaakt wordt, is dat de periode tussen de uitvoering van de verschillende renovatiemaatregelen gelijk is. Eerder werd al vastgelegd dat de renovatie voltooid moet zijn in 2050 en dat de eerste renovatiemaatregel uitgevoerd wordt in 2023. De beschikbare renovatieperiode is dus 27 jaar. Er zijn zeven renovatiestappen, dus om de 4,5 jaar wordt één stap uitgevoerd. In de berekeningen wordt dit vereenvoudigd naar afwisselend vier of vijf jaar tussen elke renovatiestap.

5.4.3 Tijdljn referentiescenario en renovatiescenario's bij basisaannames

In onderstaande figuur wordt geïllustreerd wanneer de renovatie- of vervangingswerken gebeuren in elk scenario. Hierbij gebeurt de gefaseerde renovatie volgens de basisaannames in het vorige onderdeel beschreven werden.

Zoals eerder aangegeven, worden in het referentiescenario alle elementen met een levensduur die kleiner dan of gelijk aan 60 jaar is, vervangen aan het begin van de studieperiode. Nadien gebeuren er nog enkele vervangingen. Bij de totaalrenovatie wordt elke component aan het begin van de studieperiode. Bij de gefaseerde renovatie wordt er afwisselend om de vier of vijf jaar een gebouwcomponent gerenoveerd. De aanwezige gascondensatieketel wordt aan het begin van de studieperiode nog vervangen, aangezien de renovatie ervan pas na 27 jaar gebeurt.



Figuur 27: Tijdljn referentiescenario en renovatiescenario's bij basisaannames

5.5 Besluit

Nadat in hoofdstuk 4 de te hanteren methodologie is bepaald en alle aannames over de casestudy vastgelegd zijn in dit hoofdstuk, is het voorbereidende werk gedaan. In het vervolg van het onderzoek wordt de milieu-impact van de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie bepaald worden. In hoofdstuk 6 zal verondersteld worden dat de gefaseerde renovatie uitgevoerd wordt volgens de basisaannames die in sectie 5.4.2 beschreven zijn. Vervolgens zal de invloed van een andere planning op de milieu-impact van een gefaseerde renovatie onderzocht worden in hoofdstuk 7.

6 Milieu-impact van de bestudeerde scenario's bij basisaannames

In dit hoofdstuk wordt de milieu-impact van het referentiescenario en de verschillende renovatiescenario's berekend. Hierbij wordt aangenomen dat de gefaseerde renovaties uitgevoerd worden volgens de basisaannames die in sectie 5.4.2 beschreven zijn. In eerste instantie zal de materiaalimpact van de gebouwschil en van de technische installaties bepaald worden over een studieperiode van 60 jaar. Vervolgens zal ook de milieu-impact van het operationeel energiegebruik meegenomen worden in de berekening.

6.1 Milieu-impact van de materialen

Bij de bepaling van de milieu-impact van de materialen wordt er een onderscheid gemaakt tussen het referentiescenario, waarbij enkel noodzakelijke vervangingen gebeuren, en de totaalrenovatiescenario's, waarbij de schildelen aan het begin van de studieperiode thermisch verbeterd worden. Met het specifieke scenario van een gefaseerde renovatie wordt nog geen rekening gehouden. Het zou namelijk kunnen dat sommige materialen minder vaak vervangen moeten worden, de vervanging van elementen die het einde van hun levensduur bereikt hebben, kan namelijk uitgesteld worden tot het moment waarop een renovatiestap gepland is. De mate waarin dit gebeurt, zal afhankelijk zijn van de planning van de gefaseerde renovatie.

6.1.1 Gebouwschil

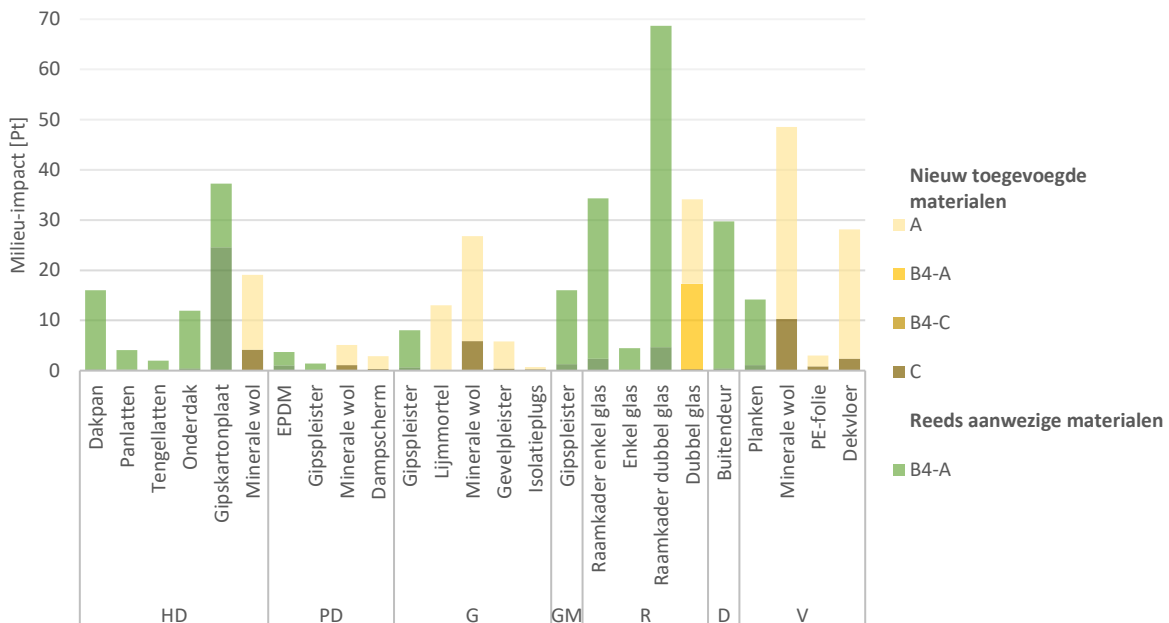
In dit onderdeel wordt de materiaalimpact van de gebouwschil onderverdeeld in twee categorieën: de impact van de materialen die initieel al aanwezig waren in het gebouw en enkel vervangen worden en de impact van de materialen die nieuw toegevoegd worden tijdens de na-isolatie van de schildelen. De gebruikte afkorting voor elk van de gebouwschildelen wordt weergegeven in Tabel 11.

HD	Hellend dak	R	Ramen
PD	Plat dak	D	Buitendeuren
G	Gevel	V	Vloer op volle grond
GM	Gemene muur		

Tabel 11: Gebruikte afkortingen gebouwschildelen

A. Materiaalimpact van de schildelen op elementniveau

Eerst wordt de materiaalimpact op elementniveau berekend. Dit betekent dat per schildeel de materiaalimpact voor alle benodigde materialen afzonderlijk bepaald wordt (Figuur 28).



Figuur 28: Milieu-impact per schildeel op elementniveau

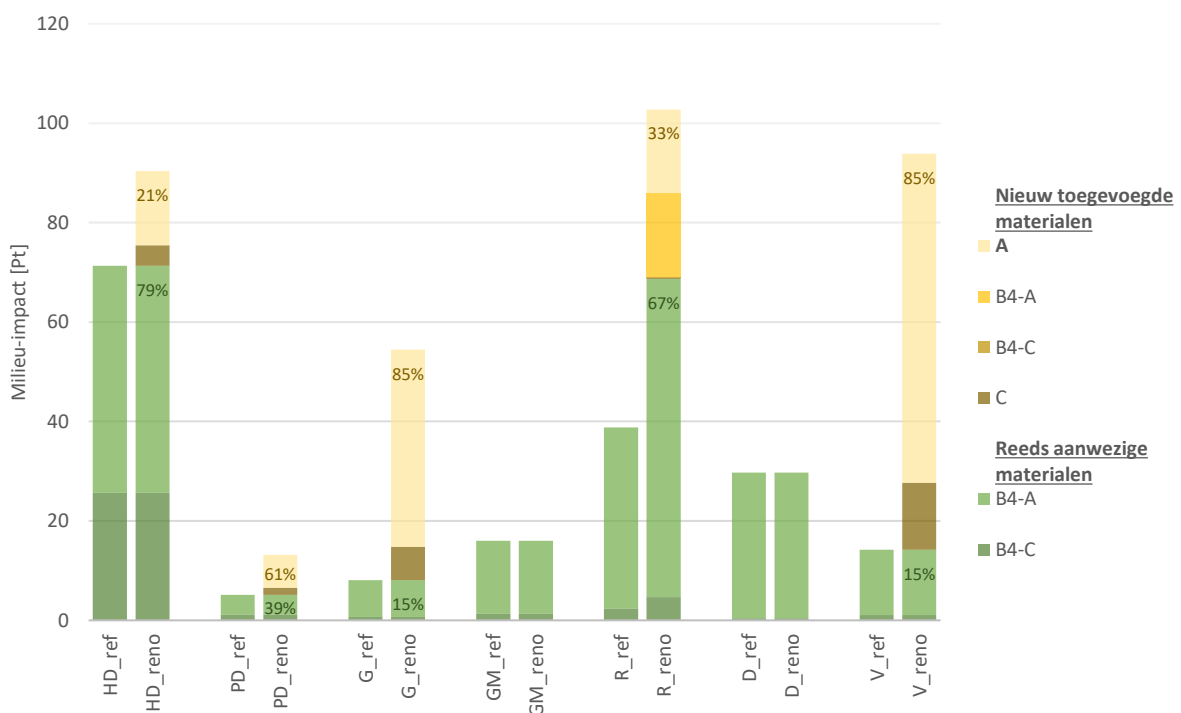
De elementen van het schrijnwerk hebben een grote materiaalimpact, ondanks het feit dat de oppervlakte van de ramen en deuren beperkt is (cfr. Tabel 9). De materiaalimpact van het raamkader voor dubbel glas is dubbel zo hoog als deze van het raamkader voor enkel glas. Dit heeft alles te maken met de veronderstelde theoretische levensduur van elk element en met de methodologische keuze voor het uitvoeren van vervangingen. De theoretische levensduur van een raamkader is 40 jaar en deze van enkel en dubbel glas is respectievelijk 60 en 30 jaar. Een raam met enkel glas zou dus enkel aan het begin van de studieperiode worden vervangen, terwijl het raam met dubbel glas na 30 jaar opnieuw moet worden vervangen.

De minerale wol in de vloer op volle grond heeft een 2,5 keer hogere materiaalimpact dan deze in het hellend dak, terwijl beide schildelen een gelijkaardige oppervlakte hebben. Ook de isolatielaag in de gevel en het plat dak hebben per vierkante meter een 2,5 keer lagere impact dan de vloerisolatie. Dit omdat de isolatielaag in de vloer drukvast moet zijn, ze heeft dus een massadichtheid van 120 kg/m^3 . In de andere schildelen wordt er gewerkt met een massadichtheid van 40 kg/m^3 , een factor drie verschil dus. De vereiste isolatiedikte in de vloer is echter kleiner dan in de andere schildelen, waardoor de materiaalimpact slechts 2,5 keer hoger is.

Verder valt het op dat de milieu-impact in module C telkens relatief laag is ten opzichte de milieu-impact in module A. Enkel bij minerale wol (21%), PE-folie (28%) en gipskartonplaat (66%) zorgt de eindelevensduurfase voor een aanzienlijk aandeel in de totale materiaalimpact. Bij minerale wol en PE-folie kan dit verklaard worden op basis van de aannames voor de afvalverwerking door OVAM, zoals beschreven in bijlage D. Er wordt verondersteld dat respectievelijk 50% en 85% van de minerale wol en van de PE-folie wordt verbrand, wat voor een hoge milieu-impact zorgt. De hoge impact bij de afvalverwerkingsfase van de gipskartonplaat is dan weer te wijten aan de 30% die op een *sanitary landfill* terecht komt.

B. Materiaalimpact schildelen op componentniveau

Vervolgens wordt de materiaalimpact van de schildelen op componentniveau berekend. Dit zowel voor het referentiescenario (ref) als voor de renovatiescenario's (reno). De totale milieu-impact van de gebouwschil in het referentiescenario is 183,3 Pt. Voor de renovatiescenario's bedraagt de milieu-impact van de gebouwschil 400,0 Pt. In het referentiescenario worden enkel reeds aanwezige materialen vervangen. In het renovatiescenario is de impact van de reeds aanwezige materialen bij alle schildelen behalve bij de ramen gelijk aan de impact in de referentietoestand, maar zorgen ook de nieuw toegevoegde materialen voor een bepaalde materiaalimpact. Bij de gerenoveerde schildelen is er telkens aangegeven welk aandeel van de milieu-impact te wijten is aan de nieuw toegevoegde elementen en aan de reeds aanwezige elementen.



Figuur 29: Materiaalimpact van de gebouwschilonderdelen in referentie en renovatiescenario

In het referentiescenario heeft het hellend dak (71,3 Pt) de grootste materiaalimpact, gevolgd door het schrijnwerk (68,6 Pt). Samen zijn ze goed voor 76,3% van de totale materiaalimpact van de gebouwschil. Het plat dak, de gevel en de vloer hebben een beduidend kleinere impact, deze is respectievelijk 2,8%, 4,4% en 7,7% van de totale materiaalimpact. Wanneer de gebouwschil tot een U-waarde van 0,24W/m²K wordt geïsoleerd, hebben de ramen, de vloer en het hellend dak de grootste materiaalimpact. Ze zorgen respectievelijk voor 25,7%, 23,4% en 22,6% van de totale materiaalimpact van de gebouwschil. Bij de ramen kan dit verklaard worden doordat de ramen zowel in jaar 0 als in jaar 30 volledig vervangen worden. Vooral de raamkaders hebben een grote impact. Bij de vloer is de grote materiaalimpact vooral te wijten aan de nieuwe chape en de drukvaste minerale wol. De nieuw toegevoegde materialen zorgen voor 85% van de totale milieu-impact van de vloer. De grote materiaalimpact van het hellend dak komt voor 79% door vervangingen die ook in het

referentiescenario uitgevoerd worden. De panlatten, de tengellatten en het onderdak hebben namelijk een levensduur van 30 jaar en moeten sowieso 2 keer vervangen worden. Ook de vervanging van de dakpannen aan het begin van de studieperiode zorgt voor een relatief grote milieu-impact. De minerale wol draagt slechts 21% bij aan de totale materiaal-impact.

Wanneer er dus onderzocht wordt welke maatregelen de minste materiaalimpact met zich meebrengen, moet er niet gekeken worden naar de totale materiaalimpact na renovatie, maar wel naar het verschil tussen de materiaalimpact in het renovatie- en het referentiescenario. Hieruit blijkt dat de na-isolatie van het plat dak de minste extra materiaalimpact met zich meebrengt (8 Pt), gevolgd door de renovatie van het hellend dak (19,1 Pt) en de gevel (46,4 Pt). De renovatie van het schrijnwerk zorgt voor een toename van de impact van 64 Pt en de na-isolatie van de vloer op volle grond zorgt voor de grootste toename van materiaalimpact (79,7 Pt).

Het is echter belangrijk op te merken dat de maatregelen die de kleinste materiaalimpact met zich meebrengen niet noodzakelijk het meest interessant zijn op vlak van milieu-impact. Ook de daling in het operationeel energiegebruik die door de renovatiemaatregelen bekomen wordt, is belangrijk in de afweging. Beide zijn lineair afhankelijk van de oppervlakte van het schildeel: bij een grotere oppervlakte zal niet alleen de toename van de materiaalimpact, maar ook de daling van het operationeel energiegebruik stijgen.

6.1.2 Technische installaties

In dit onderdeel wordt de milieu-impact van de beschouwde technische installaties geanalyseerd. De studies van Spriet (2021) en Bontridder (2022) tonen aan dat de data in de ecoinvent databank niet altijd strookt met de werkelijkheid: de gewichten van de technische installaties blijken telkens overschat te worden. Daarom wordt in beide onderzoeken voorgesteld om de gewichten van de materialen uit de ecoinvent-processen lineair te verscalen totdat het gewicht van commercieel beschikbare installaties wordt bereikt. Op basis van deze veronderstelling en de beschikbare processen in de ecoinvent databank wordt de milieu-impact tijdens de productiefase (A1-3) bepaald. Het is echter belangrijk om op te merken dat het gewicht van alle materialen mogelijk niet evenredig verschaalt met het totaalgewicht van de installatie. Dit wordt in deze thesis buiten beschouwing gelaten, maar vormt een onzekerheid in het onderzoek.

Voor de berekening van de milieu-impact van de eindelevensduurfase (C1-4) van de technische installaties wordt in deze masterproef een vereenvoudigde aanname gemaakt: er wordt verondersteld dat de volledige installatie bestaat uit het materiaal dat qua gewicht het meest aanwezig is in de installatie. Bij de meeste installaties zal dit resulteren in de veronderstelling dat de volledige installatie uit staal gemaakt is. Dit zal waarschijnlijk tot een onderschatting van de milieu-impact leiden, want staal wordt verondersteld om voor 95% gerecycleerd te worden. Deze onderschatting wordt echter aanvaard omdat de milieu-impact van de eindelevensduurfase in de regel zeer klein is ten opzichte van de totale milieu-impact.

De dimensionering van de opwekkers, buffervaten en ventilatiesystemen is beschreven in bijlage F.

A. Opwekker ruimteverwarming (RVW) en sanitair warm water (SWW)

De twee opwekkers die in deze masterproef beschouwd worden, zijn een gascondensatieketel en een lucht/water-warmtepomp. In de renovatiescenario's werken beide met een temperatuurregime voor RVW van 40/30 en gebeurt de warmteafgifte met radiatoren.

In de ecoinvent databank wordt de milieu-impact van een gascondensatieketel gemodelleerd als een olieketel. Een lucht/water-warmtepomp wordt gemodelleerd op basis van een grond/water-warmtepomp. De verschillen tussen beide types warmtepompen worden in rekening gebracht met een schaalfactor. Een lucht/water-warmtepomp zou ongeveer 1,6 keer zwaarder zijn en 1,6 keer zoveel koelvloeistof gebruiken in vergelijking met een grond/water-warmtepomp. Tabel 12 geeft de gewichten van de opwekkers volgens de ecoinvent databank en het gemiddelde gewicht van een commercieel beschikbare gascondensatieketels en lucht/water-warmtepompen volgens Spriet (2021) weer. De milieu-impact van beide installaties wordt bepaald door de installaties uit de ecoinvent databank te verscalen naar het reële gewicht volgens Spriet (2021).

	Gewicht ecoinvent	Reëel gewicht (Spriet, 2021)
	[kg]	[kg]
Gascondensatieketel	144,7	38,6
Lucht/water-warmtepomp	212,5	119,3

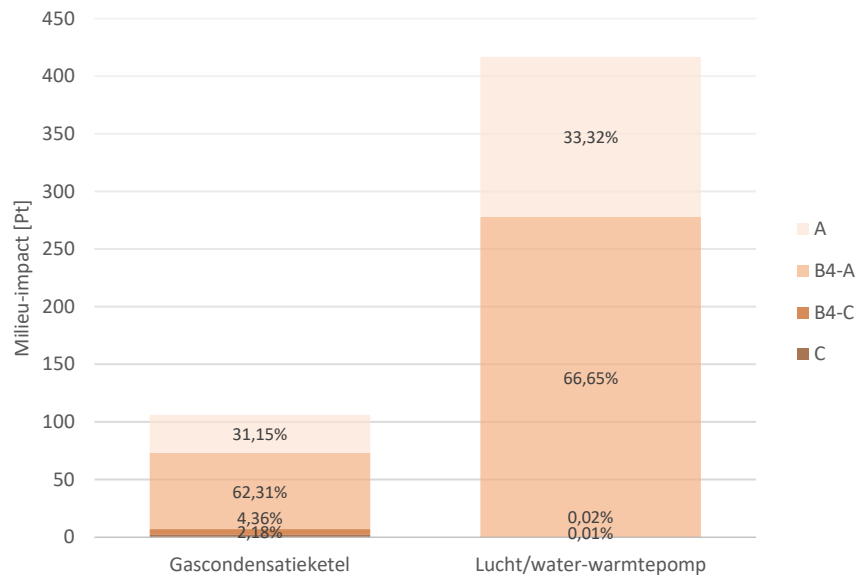
Tabel 12: Vergelijking gewicht opwekkers voor RVW en sanitair warm water uit de ecoinvent databank en van commercieel beschikbare installaties (Spriet, 2021)

Spriet (2021) heeft ook opgemerkt dat het gewicht van een gascondensatieketel en een lucht/water-warmtepomp niet rechtstreeks afhankelijk is van het vermogen ervan. Bijgevolg is de milieu-impact van de opwekkers enkel berekend voor een vermogen van 10 kW. Er wordt verondersteld dat de milieu-impact gelijk blijft wanneer de warmtevraag wijzigt.

Om de milieu-impact van de opwekkers te vervolledigen, wordt er telkens een buffervat van 140 l en een expansievat van 8 l aan toegevoegd. Bij de gascondensatieketel wordt ook de milieu-impact van een schouw berekend. Aangezien de focus van deze masterproef niet ligt op de gedetailleerde analyse van technische installaties is ervoor gekozen om de milieu-impact van het distributie- en afgiftesysteem niet te kwantificeren. Dit is ook te verantwoorden omdat er slechts kleine verschillen zullen zijn in de milieu-impact van het distributie- en afgiftesysteem.

Figuur 30 geeft de milieu-impact van de gascondensatieketel en een lucht/water-warmtepomp weer over een studieperiode van 60 jaar. De materiaalimpact van de gascondensatieketel is 3,9 keer kleiner dan deze van de lucht/water-warmtepomp. Beide opwekkers moeten twee keer vervangen worden en de productiefase (A en B4-A) beslaat telkens het grootste deel van de milieu-impact. De impact van de eindelevensduurfase (B4-C en C) is verwaarloosbaar klein bij de lucht/water-

warmtepomp. Bij de gascondensatieketel zorgt deze voor 6,5% van de totale milieu-impact. Dit is vooral te wijten aan de schouw die aanwezig is in het scenario met de gascondensatieketel, maar overbodig is wanneer er een lucht/water-warmtepomp geplaatst wordt.



Figuur 30: Vergelijking van de milieu-impact van de opwekkers en opslagvaten voor RVW en sanitair warm water

B. Ventilatiesysteem

In deze masterproef worden drie types ventilatiesystemen beschouwd, namelijk een volledig natuurlijk systeem (type A), een systeem met mechanische afvoerventilatie en vraagsturing (type C+) en een volledig mechanisch systeem met warmteterugwinning (type D). Het benodigde ventilatiedebiet in de casestudy is 230 m³/h.

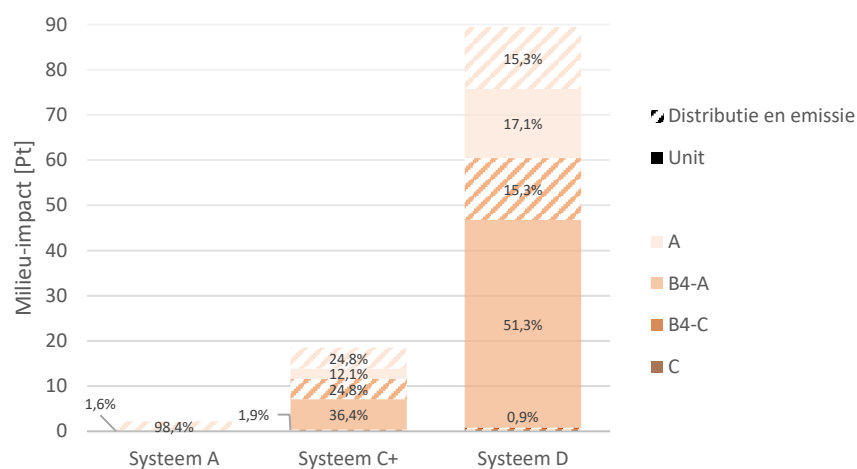
In de ecoinvent databank zijn enkel ventilatie-units voor ventilatiesysteem D beschikbaar, niet voor een ventilatiesysteem C of C+. Net zoals Spriet (2021) bij de warmtepompwekkers, merkt Bontridder (2022) op dat het gewicht van een ventilatiesysteem overschat wordt in de ecoinvent databank. Dit keer blijkt het gewicht van een commercieel beschikbaar ventilatiesysteem wel afhankelijk te zijn van het ventilatiedebiet. Bijgevolg stelt Bontridder (2022) een vergelijking op die het lineair verband beschrijft tussen het nominaal debiet (X) en het gewicht (Y) van een ventilatie-unit type D en type C+.

- Voor ventilatiesysteem type D: $Y = 0,0672 \cdot X + 12,21$
- Voor ventilatiesysteem type C+: $Y = 0,0018 \cdot X + 3,64$

In een woning met een ventilatiedebiet van 230 m³/h zou een ventilatiesysteem C+ dus 4,05 kg wegen en een ventilatiesysteem D zou 27,7 kg wegen. Om de materiaalimpact van het ventilatiesysteem voor deze specifieke casestudy wordt het gewicht van het ventilatiesysteem uit de ecoinvent databank verschaald naar deze gewichten.

Figuur 31 geeft de milieu-impact van de drie beschouwde ventilatiesystemen over een studieperiode van 60 jaar weer. De totale materiaalimpact van ventilatiesysteem C+ is 8,4 keer groter dan deze van

ventilatiesysteem A. Dit is deels te verklaren omdat er verondersteld wordt dat de ramen in het referentiescenario, waar systeem A gebruikt wordt, enkel vervangen zullen worden aan het begin van de studieperiode. Ook de ventilatieroosters zullen dus enkel aan het begin van de studieperiode vervangen worden. De materiaalimpact van ventilatiesysteem type D is dan weer 4,8 keer groter dan deze van ventilatiesysteem type C+. De productie-impact (A en B4-A) is bij ventilatiesysteem C+ voor 50% gerelateerd aan het distributie- en emissiesysteem en voor 50% aan de ventilatie-unit. Bij ventilatiesysteem D zorgt het distributie- en emissiesysteem slechts voor 33% van de impact tijdens de productiefases. De ventilatie-unit zorgt voor 67% van de materiaalimpact. Bij alle systemen blijft de materiaalimpact uit de eindelevensduurfase (B4-C en C1-4) beperkt tot maximaal 2% van de totale materiaalimpact. Impact van de eindelevensduurfase is dus beperkt.



Figuur 31: Vergelijking van de milieu-impact van de verschillende ventilatiesystemen

6.1.3 Besluit

In verband met de technische installaties blijkt de materiaalimpact van een gascondensatieketel lager te zijn dan deze van een lucht/water-warmtepomp. De materiaalimpact van ventilatiesysteem A is dan weer lager dan deze van ventilatiesysteem C+. Ventilatiesysteem D zorgt voor de hoogste materiaalimpact. Ook bij de renovatie van de gebouwschil zijn er grote verschillen op te merken in de toename van de materiaalimpact bij de verschillende schildelen.

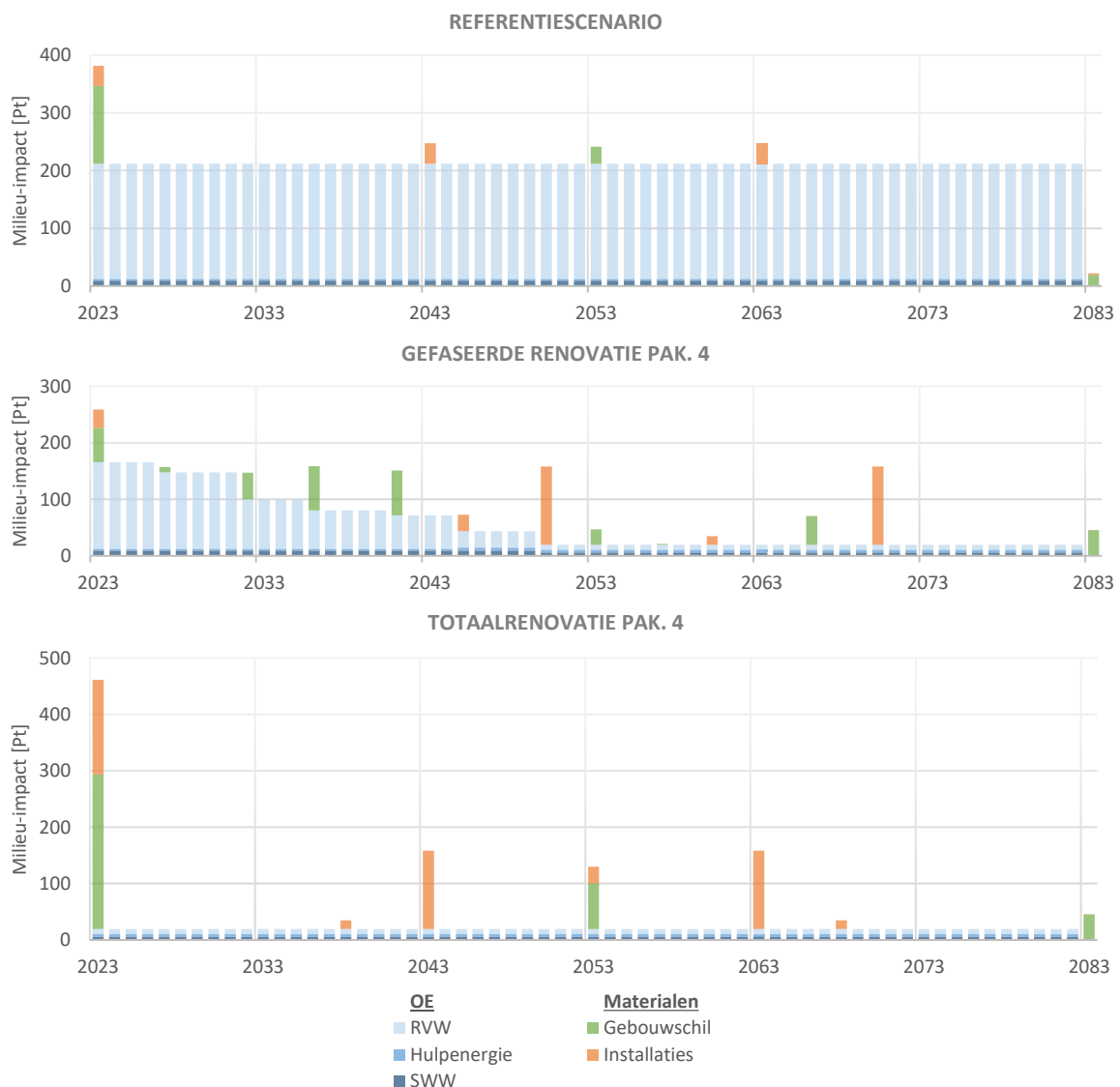
Zoals reeds in sectie 6.1.1 aangehaald werd, is het echter niet mogelijk om enkel op basis van de materiaalimpact iets over de efficiëntie van bepaalde maatregelen te zeggen. De invloed van deze maatregelen op het operationeel energiegebruik moet ook beschouwd worden. Dit komt aan bod in het volgende onderdeel.

6.2 Milieu-impact van de materialen en het operationeel energiegebruik

In dit onderdeel wordt de milieu-impact van de materialen en het operationeel energiegebruik over een studierperiode van 60 jaar bepaald voor de verschillende scenario's, waarbij telkens verondersteld wordt dat de gefaseerde renovatie wordt uitgevoerd volgens de basisaannames uit sectie 5.4.2. Eerst is de jaarlijkse milieu-impact weergegeven en vervolgens wordt de cumulatieve milieu-impact besproken. Als laatste wordt de totale milieu-impact na 60 jaar bepaald.

6.2.1 Jaarlijkse milieu-impact

Figuur 32 illustreert de jaarlijkse milieu-impact als gevolg van het operationeel energiegebruik en eventuele vervangingen of renovaties voor de verschillende scenario's. Bij de renovaties wordt er gewerkt met een ventilatiesysteem D en een lucht/water-warmtepomp (Pak4).



Figuur 32: Jaarlijkse milieu-impact bij referentiescenario, totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames. De renovatiescenario's worden uitgevoerd met maatregelenpakket 4

Bij het referentiescenario en de totaalrenovatie blijft het operationeel energiegebruik (OE) constant over de volledige studieperiode. Bij de gefaseerde renovatie neemt het operationeel energiegebruik stapsgewijs af tijdens de renovatieperiode, totdat het overeenkomt met het operationeel energiegebruik van de totaalrenovatie. Dit betekent dat de impact van het operationeel energiegebruik altijd hoger zal zijn bij een gefaseerde renovatie dan bij een totaalrenovatie, wanneer dezelfde set aan renovatiemaatregelen beschouwd wordt.

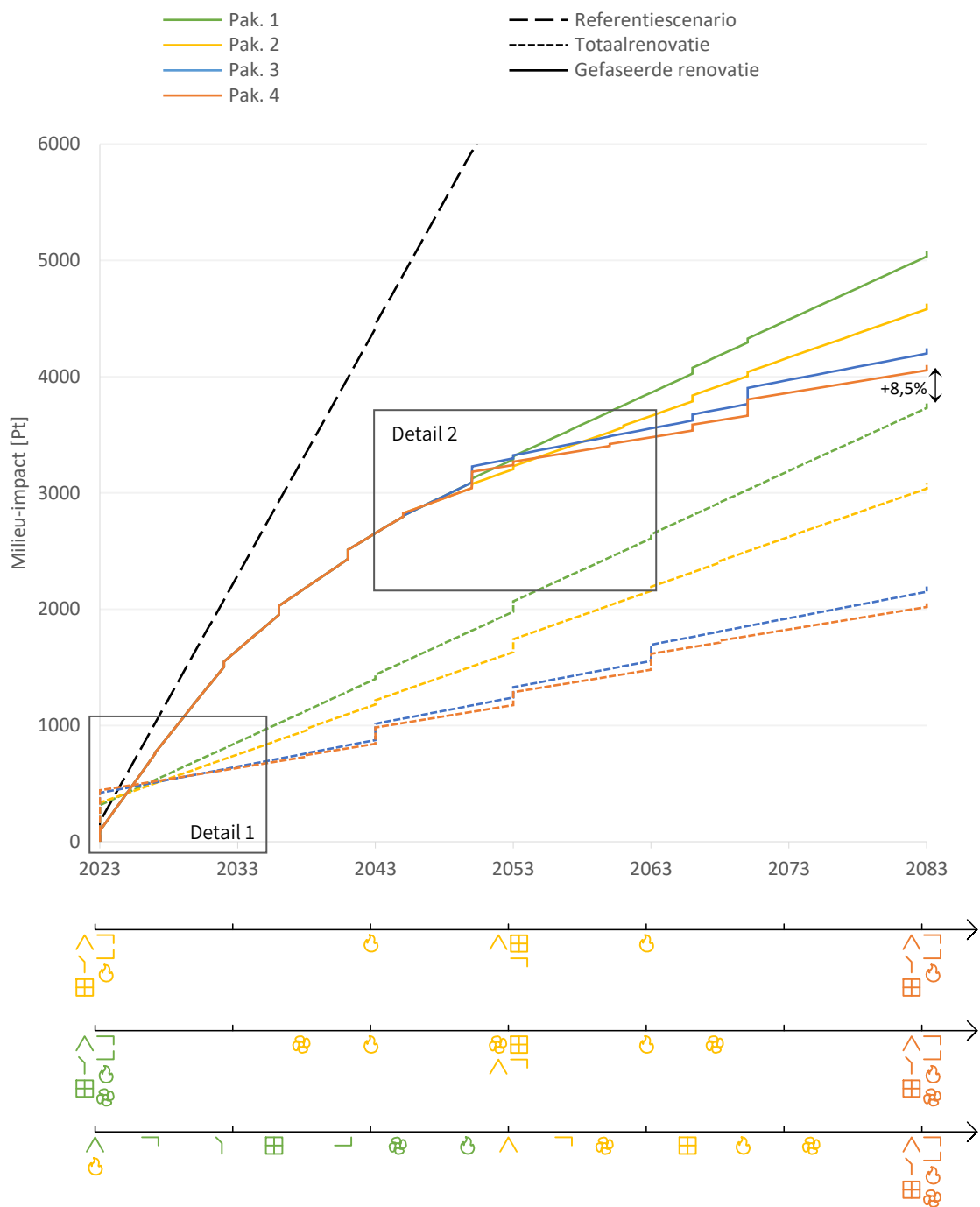
Elke vervanging of renovatie resulteert in een piek in de materiaalimpact. In het referentie- en het totaalrenovatiescenario wordt de grootste materiaalimpact (134,3 Pt en 442 Pt) bereikt aan het begin van de studieperiode en zijn er slechts enkele kleine pieken aanwezig in het verdere verloop. In het gefaseerde renovatiescenario is de grootte van de hoogste pieken (139,0 Pt) gelijkaardig aan het referentiescenario, maar is er op meer regelmatige basis een relatief grote materiaalimpact. Een afname in het operationeel energiegebruik gaat altijd gepaard met een piek in de materiaalimpact.

6.2.2 Cumulatieve milieu-impact

In Figuur 33 wordt de cumulatieve milieu-impact bij het referentiescenario, de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie met de verschillende maatregelenpakketten weergegeven. De verschillende maatregelenpakketten worden met verschillende kleuren weergegeven.

De grootte van het operationeel energiegebruik, wordt zichtbaar in de helling van de cumulatieve grafiek. Hoe groter de milieu-impact van het operationeel energiegebruik, hoe steiler de helling. In het referentiescenario is de helling het steilste. Aangezien de cumulatieve milieu-impact tijdens het renovatiescenario zo snel oploopt, wordt de grafiek ervan afgebroken na 27 jaar, in 2050. In de totaalrenovatiescenario's is de helling kleiner. Bij de gefaseerde renovatiescenario's buigt de grafiek stapsgewijs af tijdens de renovatieperiode, tot ze evenwijdig loopt met het overeenkomstige totaalrenovatiescenario.

De materiaalimpact, die als sporadische pieken zichtbaar is in Figuur 32, resulteert in sprongen op de cumulatieve grafiek. Bij de totaalrenovatie is de materiaalimpact telkens groot, de sprongen zijn dan ook duidelijk zichtbaar. In het referentiescenario, waarbij vooral het operationeel energiegebruik doorweegt, zijn de kleine sprongen slechts beperkt zichtbaar op de grafiek.



Legende tijdslijn: zie Figuur 27

Figuur 33: Cumulatieve milieu-impact bij referentiescenario, totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames

In 2083, na 60 jaar, wordt de totale milieu-impact tijdens de studieperiode bereikt. De milieu-impact van het gefaseerde renovatiescenario met de laagste impact (Pak4, 4100 Pt) is nog 8,5% hoger dan deze van het totaalrenovatiescenario met de hoogste milieu-impact (Pak1, 3779 Pt). Voor de beschouwde maatregelenpakketten en de veronderstelde planning van de gefaseerde renovatie resulteert een totaalrenovatie dus altijd in de laagste milieu-impact over een periode van 60 jaar. Enkel indien de totaalrenovatie uitgesteld wordt of wanneer de gefaseerde renovatie op een andere

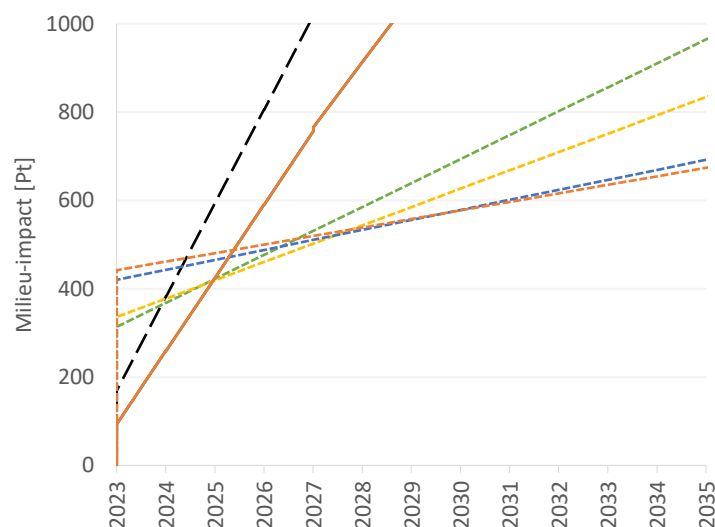
manier gepland wordt, kan het zijn dat een gefaseerde renovatie zorgt voor een lagere milieu-impact dan een totaalrenovatie. In Tabel 13 is weergegeven hoe lang een totaalrenovatie moet uitgesteld worden opdat de milieu-impact ervan gelijk zou zijn aan een gefaseerde renovatiescenario met hetzelfde of een ander maatregelenpakket. Zolang een totaalrenovatie uitgevoerd wordt voor deze termijn, zal de totaalrenovatie zorgen voor de laagste milieu-impact. Indien niet, wordt de gefaseerde renovatie interessanter. In hoofdstuk 7 wordt de invloed van de planning van de gefaseerde renovatie bestudeerd.

		Uitsteltermijn totaalrenovatie			
		Pak1	Pak2	Pak3	Pak4
Milieu-impact gelijk aan gefaseerde renovatie	Pak1	8j, 3m	11j, 9m	15j, 3m	15j, 8m
	Pak2	5j, 5m	9j, 1m	12j, 10m	13j, 4m
	Pak3	3j, 0m	6j, 10m	10j, 10m	11j, 4m
	Pak4	2j, 1m	6j, 0m	10j, 1m	10j, 7m

Tabel 13: Periode waarover een totaalrenovatie uitgesteld moet worden zodat milieu-impact totaalrenovatie gelijk wordt aan de milieu-impact van een gefaseerde renovatie.

Zowel bij gefaseerde renovatie als bij totaalrenovatie resulteren de scenario's met warmtepomp in een lagere milieu-impact dan de scenario's met gascondensatieketel. Bij eenzelfde opwekker voor RVW en sanitair warm water heeft een scenario met ventilatiesysteem D een lagere milieu-impact dan een scenario met ventilatiesysteem C+. De technische installaties met een hogere materiaalimpact (cfr. sectie 6.1.2) zorgen dus telkens voor een nog grotere reductie van de impact van het operationeel energiegebruik en lijken te verkiezen boven de installaties met een lagere materiaalimpact.

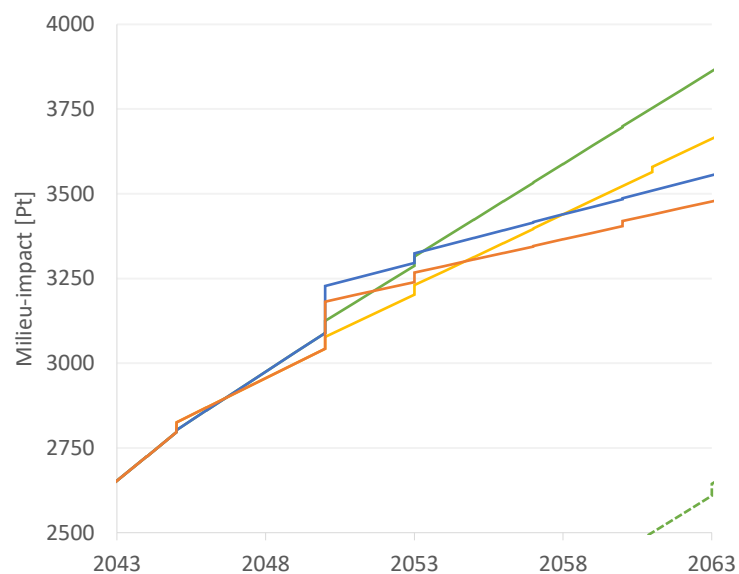
De periode die nodig is om de grotere materiaalimpact te compenseren, varieert echter. Aan de hand van twee details uit Figuur 33, wordt de 'terugverdientermijn' op vlak van milieu-impact geanalyseerd.



Figuur 34: Detail 1 uit Figuur 33 (voor legende: zie Figuur 33)

Bij een meer gedetailleerde analyse van de eerste jaren van de studieperiode (cfr. Figuur 34), wordt vastgesteld dat de milieu-impact van de totaalrenovatiescenario's in 2023 hoger is dan deze van de gefaseerde renovatiescenario's en het referentiescenario. Deze hoge initiële materiaalimpact wordt snel gecompenseerd door een lager operationeel energiegebruik: na 1 tot 1,5 jaar is de milieu-impact van de totaalrenovatiescenario's lager dan in het referentiescenario en na 1,5 tot 2,5 jaar daalt de milieu-impact van de totaalrenovaties ook onder deze van de gefaseerde renovatiescenario's. De terugverdientijd op vlak van milieu-impact is telkens iets langer bij de scenario's met een warmtepomp vanwege de hogere initiële materiaalimpact ervan. De hogere milieu-impact van het ventilatiesysteem D lijkt weinig invloed te hebben. Bij de totaalrenovatiescenario's onderling duurt het zes tot tien jaar voordat de grotere materiaalimpact van de warmtepomp en het ventilatiesysteem D gecompenseerd wordt door het lagere energiegebruik. Dit komt omdat het operationeel energiegebruik relatief laag is in alle totaalrenovatiescenario's.

De initiële materiaalimpact van de gefaseerde renovatiescenario's is lager dan deze van het referentiescenario. Dit omdat de vervangingen van de gebouwschil uitgesteld worden tot aan de renovatie van dat gebouwschildeel.

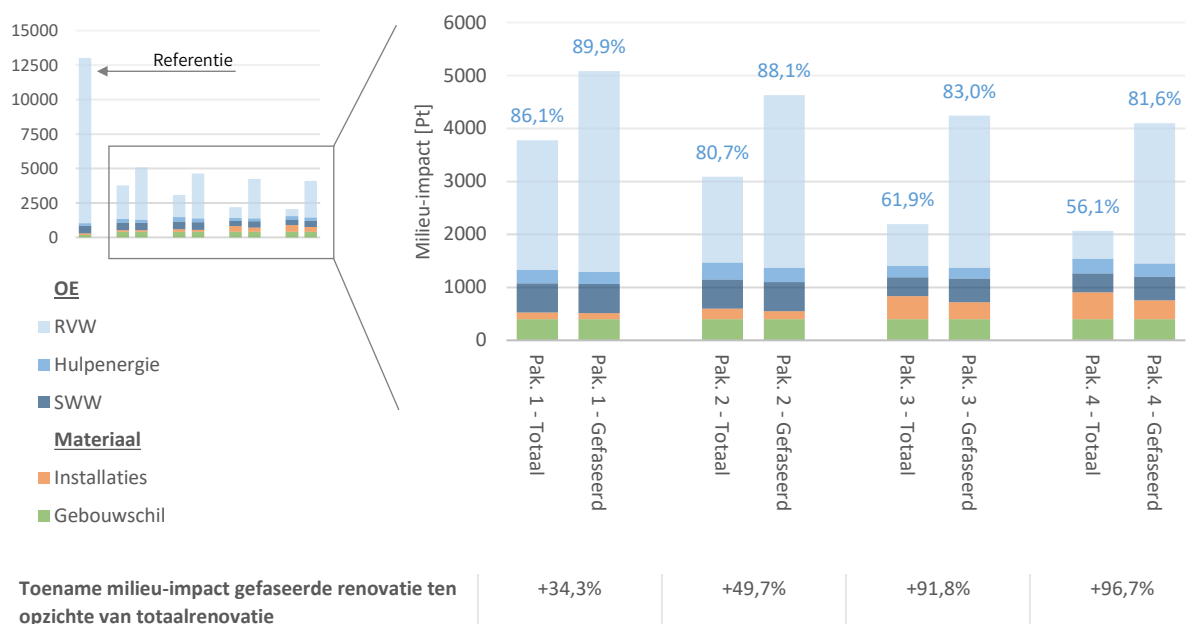


Figuur 35: Detail 2 uit Figuur 33 (voor legende: zie Figuur 33)

In Figuur 35 wordt voor de gefaseerde renovatiescenario's onderling weergegeven hoe snel een hogere materiaalimpact is gecompenseerd door een lager operationeel energiegebruik. Tot aan de implementatie van het ventilatiesysteem blijft de milieu-impact van de gefaseerde renovatiescenario's bij de verschillende maatregelenpakketten gelijk. Wanneer het ventilatiesysteem na 23 jaar geïmplementeerd wordt, duurt het twee jaar voordat de hogere materiaalimpact van het ventilatiesysteem D is gecompenseerd door het lagere energiegebruik. Bij de implementatie van lage temperatuurverwarming met een warmtepomp of nieuwe condensatieketel, duurt het twee tot acht jaar voordat de scenario's met warmtepomp tot een lagere milieu-impact leiden.

6.2.3 Totale milieu-impact

In Figuur 36 wordt de totale milieu-impact van het referentiescenario, de totaalrenovatiescenario's en de gefaseerde renovatiescenario's weergegeven.



Figuur 36: Totale milieu-impact bij totaalrenovatie en gefaseerde renovatie volgens de basisaannames

De milieu-impact van het referentiescenario is 3,4 tot 6,2 keer groter dan de milieu-impact van de totaalrenovatiescenario's. Omwille van het *direct rebound effect* zal de milieu-impact van het operationeel energiegebruik in het referentiescenario echter een overschatting zijn. Verschillende onderzoekers hebben namelijk aangetoond dat het effectieve operationeel energiegebruik in slecht geïsoleerde woningen meestal lager is dan de berekende waarde (Hens et al., 2010; Lambie et al., 2017). Het verschil in milieu-impact tussen het referentiescenario en de renovatiescenario's zal dus waarschijnlijk kleiner zijn. Omwille van het *rebound effect* kan ook de impact van de gefaseerde renovatiescenario's kleiner zijn dan uit de berekeningen blijkt. In deze masterproef wordt hier echter geen rekening mee gehouden.

Totaalrenovatie

In de totaalrenovatiescenario's met condensatieketel is het operationeel energiegebruik goed voor respectievelijk 85,9% en 80,4% van de totale milieu-impact bij gebruik van een ventilatiesysteem C+ en D. Bij de scenario's met warmtepomp is dit respectievelijk 61,2% en 55,3%. Bij de scenario's met warmtepomp is het operationeel energiegebruik minder doorslaggevend dan bij de scenario's met condensatieketel.

De toename van de materiaalimpact (+328 Pt) in de scenario's met een warmtepomp ten opzichte van deze met een condensatieketel is 4,0 tot 5,8 keer kleiner dan de afname van het operationeel

energiegebruik (-1335 Pt tot -1895 Pt). Het is dus duidelijk dat de lagere materiaalimpact van de condensatieketel niet opweegt tegen de hogere impact van het operationeel energiegebruik.

Totaalrenovatie vs. gefaseerde renovatie

De totale materiaalimpact van de gebouwschil (400,4 Pt) is gelijk bij beide renovatiestrategieën en voor alle beschouwde maatregelenpakketten, want de opbouw van de gebouwschil is in elk renovatiescenario dezelfde en ook het aantal vervangingen blijft gelijk. Echter, de materiaalimpact van de technische installaties is telkens lager bij de gefaseerde renovatie dan bij de totaalrenovatie. Dit komt omdat de installaties pas laat in het renovatieproces worden geplaatst en een korte levensduur hebben. Bij een totaalrenovatie moeten ze dus vaker worden vervangen. Het verschil is respectievelijk 7,4%, 23,0%, 26,8% en 30,0% bij de scenario's met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+ of D en bij de scenario's met een warmtepomp en ventilatiesysteem C+ of D.

Zoals duidelijk wordt uit Figuur 32, is de milieu-impact van het operationeel energiegebruik telkens hoger in het gefaseerde renovatiescenario dan in het overeenkomstige totaalrenovatiescenario. Indien er gewerkt wordt met een condensatieketel ligt het operationeel energiegebruik 40,3% of 63,7% hoger, afhankelijk van het type ventilatiesysteem. Bij de scenario's met een warmtepomp stijgt het operationeel energiegebruik met 159,2% of 188,7%, afhankelijk van het type ventilatiesysteem. De kleinere materiaalimpact bij de gefaseerde renovatiescenario's wordt dus ruimschoots gecompenseerd door een hogere milieu-impact van het operationeel energiegebruik. Het aandeel van het operationeel energiegebruik is ook telkens groter bij een gefaseerde renovatie ten opzichte van de totaalrenovatie die uitgevoerd wordt met hetzelfde maatregelenpakket.

Opmerkelijk is dat het totale verschil in milieu-impact tussen een totaalrenovatie en de overeenkomstige gefaseerde renovatie groter is wanneer er gebruik gemaakt wordt van meer energie-efficiënte installaties. De gefaseerde renovaties met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+ en D hebben een milieu-impact die respectievelijk 34,4% en 49,9% groter is dan deze van de overeenkomstige totaalrenovaties. Bij de gefaseerde renovaties met een warmtepomp en ventilatiesysteem C+ en D is dit respectievelijk 93,3% en 98,5%. Dit is logisch, want wanneer de renovatiemaatregelen meer energie-efficiënt zijn, zal de impact in de gerenoveerde toestand lager zijn. Hierdoor wordt het verschil tussen de jaarlijkse impact in de reeds gerenoveerde toestand en de niet-gerenoveerde toestand groter. Bijgevolg is ook het verschil in milieu-impact tussen de verschillende gefaseerde renovatiescenario's onderling kleiner dan tussen de totaalrenovatiescenario's.

6.3 Besluit

De lucht/water-warmtepomp en het ventilatiesysteem D hebben een materiaalimpact die vier à vijf keer groter is dan de materiaalimpact van de gascondensatieketel en ventilatiesysteem C+. Ze zorgen echter ook voor een grotere reductie van het operationeel energiegebruik, waardoor ze in een lagere totale milieu-impact resulteren

Het verschil in milieu-impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie is voornamelijk afkomstig van het operationeel energiegebruik. De totale materiaalimpact van de gebouwschil is dezelfde in alle scenario's, terwijl de materiaalimpact van de technische installaties bij de gefaseerde renovaties licht daalt ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatiescenario's.

De totale milieu-impact van een gefaseerde renovatie zal altijd hoger zijn dan deze van een totaalrenovatie die wordt uitgevoerd aan het begin van de studieperiode en waarbij hetzelfde maatregelenpakket wordt gebruikt. Sterker nog: in dit hoofdstuk leidt een totaalrenovatie die aan het begin van de studieperiode uitgevoerd wordt altijd tot een lagere milieu-impact dan gefaseerde renovatie, ongeacht het beschouwde maatregelenpakket. Er worden twee pistes gedefinieerd waarbij de gefaseerde renovatie wél tot een lagere milieu-impact kan leiden. Enerzijds kan dit indien de totaalrenovatie uitgesteld zou worden naar een later tijdstip in de studieperiode, deze piste is onderzocht in sectie 6.2.2. Anderzijds zou dit misschien mogelijk zijn indien de planning van de gefaseerde renovatie geoptimaliseerd wordt, dit zal onderzocht worden in het volgende hoofdstuk.

Ten slotte is ook opgemerkt dat verschil in milieu-impact tussen gefaseerde renovatie en totaalrenovatie groter wordt wanneer er met meer energie-efficiënte maatregelen gewerkt wordt.

7 Milieu-impact van gefaseerde renovatie bij afwijken van basisaannames

Zoals in hoofdstuk 2 opgemerkt is, zijn er moeilijkheden om aan de hand van de beschikbare data een beeld te krijgen van hoe er in de praktijk gerenoveerd wordt. Bovendien stellen verschillende instanties dat de optimale planning van een gefaseerde renovatie heel projectafhankelijk is. De basisaannames voor de uitvoering van gefaseerde renovatie die in sectie 5.4.2 gedefinieerd werden, zijn dus ook enkel dat: aannames. In dit hoofdstuk zal de invloed van een afwijkende renovatieplanning op de milieu-impact van een gefaseerde renovatie van de casestudy onderzocht worden. Er worden drie variabelen in de planning van de gefaseerde renovatie onderscheiden: de uitvoeringsvolgorde, het aantal renovatiestappen en de tijd tussen de uitvoering van renovatiemaatregelen. In eerste instantie wordt de invloed van elk van deze variabelen apart onderzocht, in de veronderstelling dat voor de andere variabelen de basisaannames blijven gelden. Vervolgens wordt ook de milieu-impact van de gefaseerde renovatie bestudeerd als meerdere variabelen afwijken van de basisaannames.

7.1 Variabele 1: de uitvoeringsvolgorde

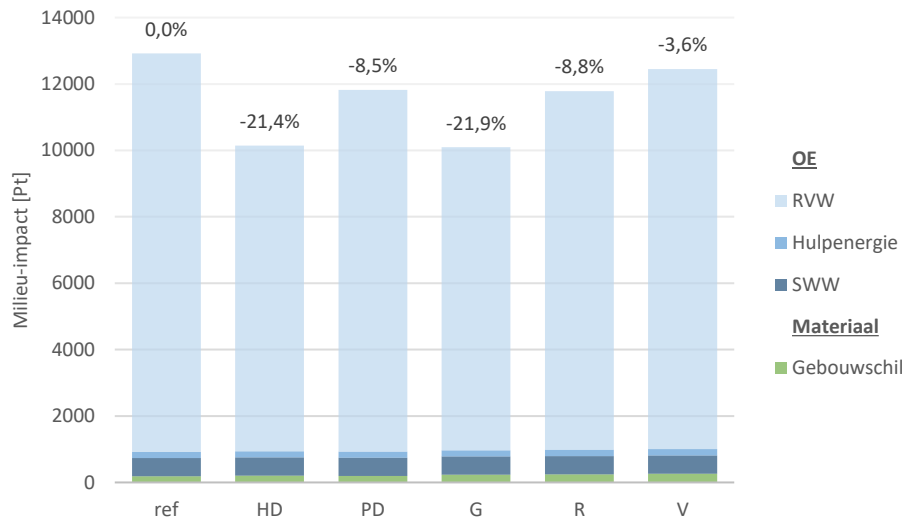
De eerste variabele die onderzocht wordt, is de uitvoeringsvolgorde. In dit onderdeel wordt verondersteld dat de renovatie maatregel per maatregel gebeurt. Aangezien er zeven verschillende renovatiemaatregelen worden beschouwd, zijn er 5 040 mogelijke uitvoeringsvolgordes. Er wordt dus niet gepoogd om de milieu-impact van elk van deze uitvoeringsvolgordes te bepalen, maar wel om een *worst case* en een *best case* scenario vast te leggen. Zo kan onderzocht worden in welk bereik de milieu-impact zal liggen wanneer er afgeweken wordt van de volgorde uit de basisaannames.

Eerst wordt de optimale uitvoeringsvolgorde voor de renovatie van de gebouwschil bepaald, deze zal namelijk dezelfde zijn bij alle maatregelenpakketten, en wordt vastgelegd wanneer de overstap naar lage temperatuurverwarming gemaakt kan worden. Daarna wordt voor elke renovatiestap bekeken welke maatregel leidt tot de grootste of kleinste reductie in milieu-impact. Zo komt men tot de meest optimale en de minst optimale renovatievolgorde.

7.1.1 Bepaling van de optimale uitvoeringsvolgorde van de renovatie van de gebouwschil

De optimale uitvoeringsvolgorde voor de renovatie van de gebouwschil wordt bepaald door de milieu-impact van de casestudy te berekenen over een studieperiode van 60 jaar, waarbij telkens één

van de gebouwschildelen gerenoveerd is. Bij de andere schildelen worden enkel noodzakelijke vervangingen uitgevoerd. De technische installaties worden buiten beschouwing gelaten. In Figuur 37 is de procentuele reductie in milieu-impact ten opzichte van het niet-gerenoveerde scenario (ref) weergegeven. De meest prioritair te renoveren schildelen, zijn deze die zorgen voor de grootste reductie in de milieu-impact. Zo kan er namelijk langer van deze reductie ‘genoten’ worden.



Figuur 37: Milieu-impact casestudy over 60 jaar na isolatie van één van de schildelen aan het begin van de studieperiode

Op vlak van milieu-impact is de ideale renovatievolgorde van de gebouwschil dus de volgende:

1. Gevel
2. Hellend dak
3. Schrijnwerk
4. Plat dak
5. Vloer

De invloed van de na-isolatie van de gevel en het hellend dak op de milieu-impact is echter zeer gelijkaardig, waardoor deze renovatiemaatregelen van volgorde zouden kunnen wisselen. Hetzelfde is het geval voor de renovatie van de ramen en het plat dak.

Het verschil in milieu-impact tussen de scenario's blijkt vooral bepaald te worden door de impact van het energiegebruik voor RVW. De meest optimale renovatievolgorde van de gebouwschil kan dus ook vereenvoudigd bepaald worden door de reductie van de warmteverliezen ΔQ doorheen een bepaald scheidel te berekenen met de volgende formule.

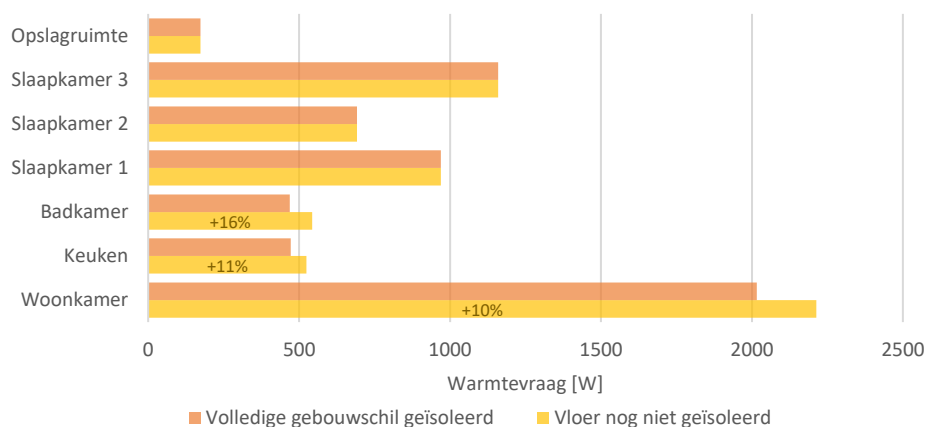
$$\Delta Q = A \cdot \Delta T \cdot \Delta U$$

Hierbij is A de oppervlakte van het scheidel (m^2), ΔT het temperatuurverschil tussen binnen- en buitenomgeving (K) en ΔU het verschil in U-waarde voor en na de renovatie van het scheidel (W/m^2K). Er wordt een uniforme binnentemperatuur verondersteld, het temperatuurverschil over elk scheidel is dus gelijk. Zo bekomt men dezelfde optimale renovatievolgorde.

7.1.2 Randvoorwaarden voor de overstap naar lage temperatuurverwarming

De implementatie van de lucht/water-warmtepomp of een nieuwe condensatieketel gaat gepaard met een overstap naar lage temperatuurverwarming (LTV) met een waterregime van 40/30°C. In het basisscenario gebeurt dit als laatste stap, op het moment dat de warmtevraag al op haar laagste punt is. Het zou echter kunnen dat de implementatie van LTV bij een optimale renovatieplanning vroeger in het renovatieproces moet gebeuren. Om dit te onderzoeken, moet eerst bepaald worden vanaf wanneer dit mogelijk is.

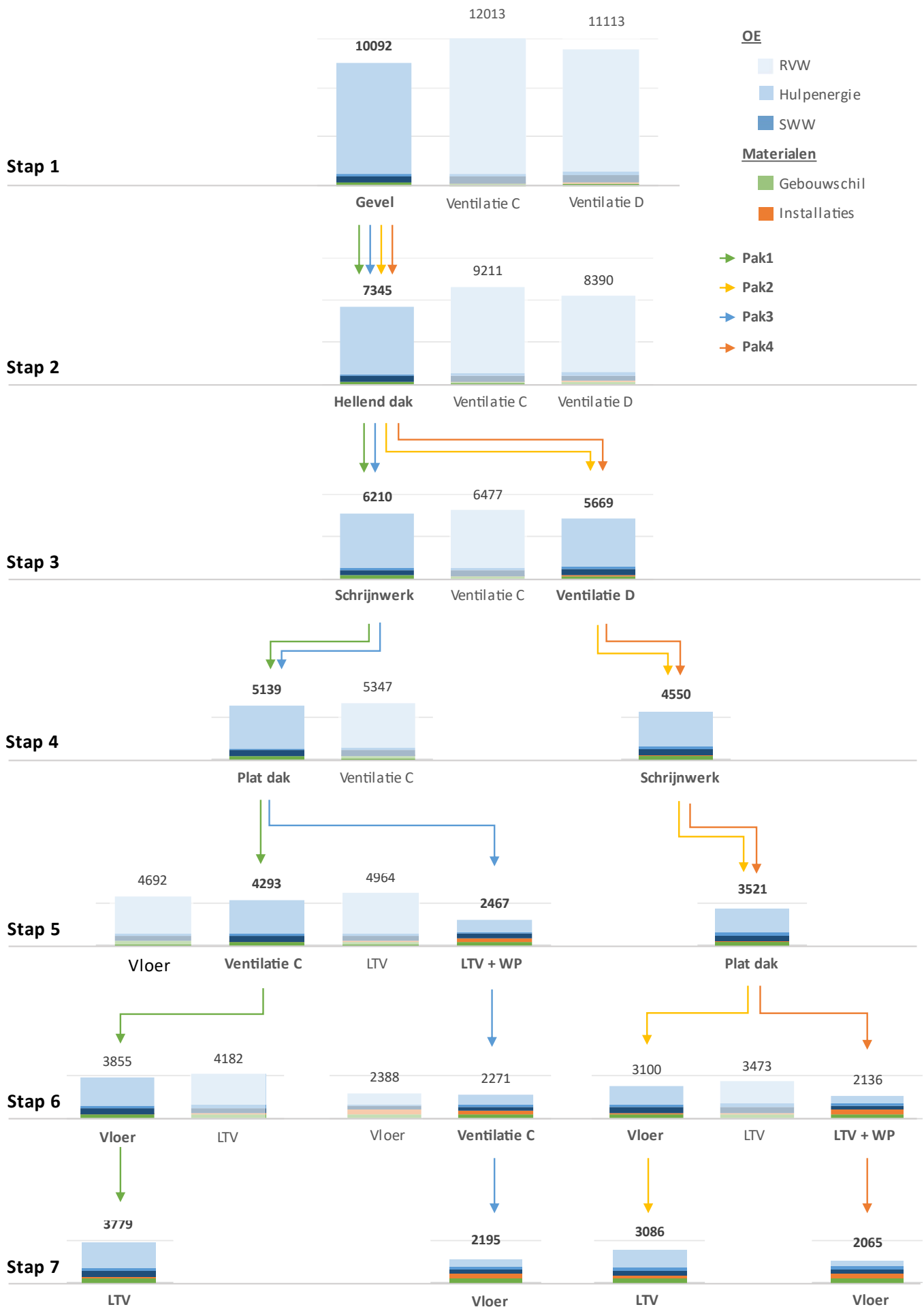
In een gebouw met een hoge warmtevraag is LTV mogelijk door afgifte-elementen te plaatsen met een grotere oppervlakte en efficiëntie. Wanneer de gebouwschil daarna nog verder geïsoleerd wordt, zouden deze verwarmingslichamen overgedimensioneerd worden, wat niet de bedoeling is. In deze masterproef is er dus besloten om de overstap naar LTV pas toe te laten de warmtebehoefte voldoende gedaald is. Volgens het Vlaams Energie- en Klimaatagentschap (VEKA) kan dit slechts wanneer de isolatie van elk schildeel aan de EPB-eisen voldoet (Vlaanderen.be, s.d.-b). In dit onderzoek wordt echter verondersteld dat de overstap naar LTV ook al mogelijk is wanneer elk schildeel behalve de vloer geïsoleerd is. In Figuur 38 is te zien dat de warmtebehoefte dan in de meeste ruimtes niet meer zal dalen en dat ze in de ruimtes op de gelijkvloerse verdieping maximaal 16% groter is dan wanneer de gebouwschil volledig geïsoleerd zou zijn. De verwarmingslichamen zouden amper overgedimensioneerd moeten worden.



Figuur 38: Vergelijking warmtevraag in ruimtes wanneer gebouwschil volledig geïsoleerd is ten opzichte van situatie waarin elk schildeel behalve de vloer geïsoleerd is

7.1.3 Bepaling van de optimale uitvoeringsvolgorde van de volledige renovatie

In dit onderdeel wordt de renovatievolgorde bepaald die resulteert in de kleinste totale milieu-impact over een studieperiode van 60 jaar. In Figuur 40 wordt bij elke renovatiestap nagegaan welke renovatiemaatregelen potentieel als volgende kunnen worden uitgevoerd. Daarvoor wordt voor elk van deze renovatiemaatregelen de milieu-impact van de casestudy bepaald over een periode van 60 jaar, deze is telkens weergegeven in milieupunten. De renovatiemaatregel die zorgt voor de grootste reductie in milieu-impact, is de meest optimale volgende stap in het renovatieproces.



Figuur 39: Beslissingsproces optimale renovatievolgorde in functie van milieu-impact

Voor de volgende stap, is er telkens keuze uit deze renovatiemaatregelen:

- de na-isolatie van het volgende schildeel. De ideale volgorde voor na-isolatie van de schildelen is bepaald in paragraaf 7.1.1;
- de implementatie van het ventilatiesysteem;
- de vervanging van de opwekker en overstap naar LTV. Zoals bepaald in sectie 7.1.2 is dit pas mogelijk nadat alle schildelen behalve de vloer geïsoleerd zijn.

De optimale renovatievolgorde blijkt afhankelijk te zijn van het maatregelenpakket en is weergegeven in Tabel 14. De renovaties aan de gebouwschil zijn in het groen weergegeven, de vernieuwde technische installaties in het oranje.

	Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5	Stap 6	Stap 7
Pak1	↘	^	⊞	↖	⊞	↘	⊞
Pak2	↘	^	⊞	⊞	↖	↘	⊞
Pak3	↘	^	⊞	↖	⊞	⊞	↘
Pak4	↘	^	⊞	⊞	↖	⊞	↘

Tabel 14: Optimale renovatievolgorde in functie van milieu-impact (legende: zie Figuur 27)

Het lijkt aangewezen om een ventilatiesysteem D al vroeg in het renovatieproces, na de isolatie van het hellend dak, te implementeren. Een ventilatiesysteem C+ heeft een kleinere invloed op de milieu-impact en zal idealiter wat later geïnstalleerd worden. Een lucht/water-warmtepomp in combinatie met LTV zorgt voor een grote reductie van de milieu-impact wordt idealiter zo snel als mogelijk geïnstalleerd. De overstap naar LTV bij gebruik van een condensatieketel zorgt voor de laagste reductie in milieu-impact.

Deze optimale volgorde is enkel bepaald in functie van de milieu-impact en houdt geen rekening met enkele praktische aspecten bij een renovatie. Om met een meer logische volgorde te werken, wordt in deze masterproef voorgesteld om het hellend dak als eerste te renoveren en daarna pas de gevel. Omwille van de eenvoud en de kostenefficiëntie, is de isolatie van het hellend dak namelijk aantrekkelijker dan deze van de gevel. Bovendien wordt zo de ‘top-down’-aanpak die in het rapport van RenoFase (2017) beschreven wordt, gerespecteerd. Het ventilatiesysteem C+ kan beter geïnstalleerd worden vlak na de renovatie van het schrijnwerk, want dan is de verbetering in luchtdichtheid van de gebouwschil volledig gerealiseerd. Een geschikt ventilatiesysteem is dan noodzakelijk. De aangepaste volgorde wordt hieronder weergegeven.

	Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5	Stap 6	Stap 7
Pak1	^	↘	⊞	⊞	↖	↘	⊞
Pak2	^	↘	⊞	⊞	↖	↘	⊞
Pak3	^	↘	⊞	⊞	↖	⊞	↘
Pak4	^	↘	⊞	⊞	↖	⊞	↘

Tabel 15: Optimale renovatievolgorde met praktische aanpassingen (legende: zie Figuur 27)

Deze aanpassingen zorgen voor een toename van de milieu-impact van 4,72% bij de renovatie met warmtepomp en ventilatiesysteem C+. Bij de andere maatregelenpakketten is de milieu-impact in het scenario met praktische aanpassingen maximaal 0,45% hoger dan in het scenario waarin de volgorde enkel bepaald is op basis van de milieu-impact. Het grotere verschil bij de renovatie met maatregelenpakket drie is te verklaren omdat de implementatie van de warmtepomp enkele jaren uitgesteld werd door het ventilatiesysteem vroeger te implementeren. In het verdere verloop van deze masterproef wordt telkens met de optimale renovatievolgorde met praktische aanpassingen gewerkt.

7.1.4 Bepaling van de meest negatieve uitvoeringsvolgorde van de volledige renovatie

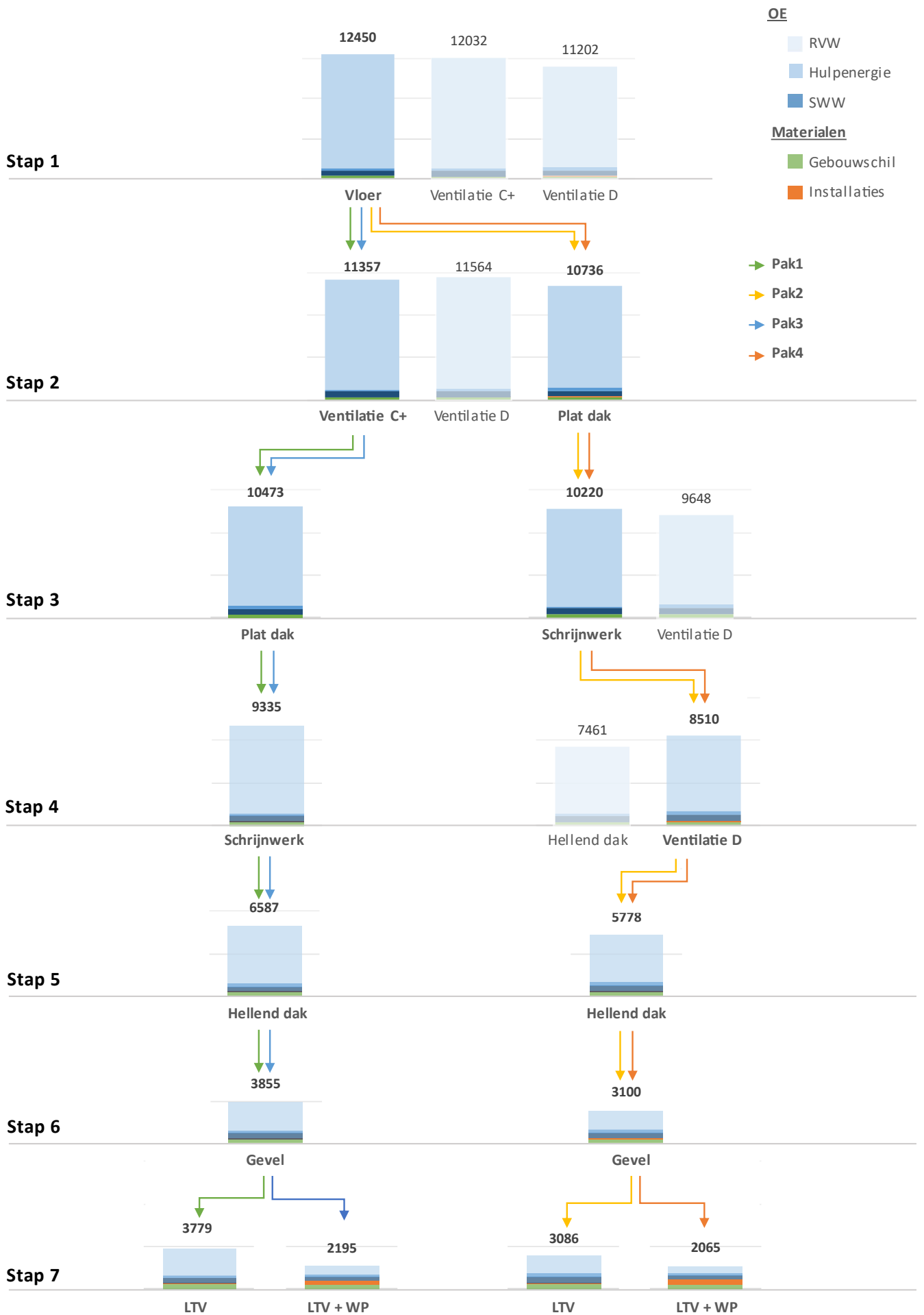
In dit onderdeel wordt de renovatievolgorde die resulteert in de grootste totale milieu-impact over een studieperiode van 60 jaar bepaald. Dit is een eerder theoretische oefening, aangezien het weinig waarschijnlijk is dat deze renovatievolgorde in de praktijk gehanteerd zal worden. Om de minst optimale volgende stap te bepalen, wordt er in Figuur 41 telkens gezocht naar de renovatiemaatregel die zorgt voor de kleinste reductie van de milieu-impact. Ook hier is de totale milieu-impact over een periode van 60 jaar bij elke renovatie maatregel weergegeven in milieupunten boven elke mogelijke stap. Hierbij wordt telkens gekozen tussen:

- de na-isolatie van een volgend schildeel, waarbij de volgorde uit sectie 7.1.1 omgedraaid is;
- de plaatsing van een ventilatiesysteem;
- de vervanging van de opwekker en overstap naar LTV. Dit is, bij gebruik van de meest negatieve renovatievolgorde, pas mogelijk wanneer de volledige gebouwschil geïsoleerd is.

Ook de meest negatieve renovatievolgorde blijkt afhankelijk te zijn van het maatregelenpakket en is weergegeven in Tabel 16. De renovaties aan de gebouwschil zijn in het groen weergegeven, de vernieuwde technische installaties in het oranje.

	Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5	Stap 6	Stap 7
Pak1	└	⊗	└	⊞	^	┘	⊗
Pak2	└	└	⊞	⊗	^	┘	⊗
Pak3	└	⊗	└	⊞	^	┘	⊗
Pak4	└	└	⊞	⊗	^	┘	⊗

Tabel 16: Meest negatieve renovatievolgorde in functie van milieu-impact (legende: zie Figuur 27)



Figuur 41: Beslissingsproces slechtste renovatievolgorde in functie van milieu-impact

Wanneer er rekening gehouden wordt met de praktische aspecten van het renoveren, wordt er opnieuw een aanpassing voorgesteld aan deze meest negatieve volgorde. De implementatie van het ventilatiesysteem C wordt uitgesteld totdat de ramen vervangen zijn. Dit gaat namelijk gepaard met het plaatsen van andere ventilatioosters in de ramen, wat pas kan gebeuren bij de vervanging ervan.

	Stap 1	Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5	Stap 6	Stap 7
Pak1	┘	┘	田	⊗	^	∩	⊗
Pak2	┘	┘	田	⊗	^	∩	⊗
Pak3	┘	┘	田	⊗	^	∩	⊗
Pak4	┘	┘	田	⊗	^	∩	⊗

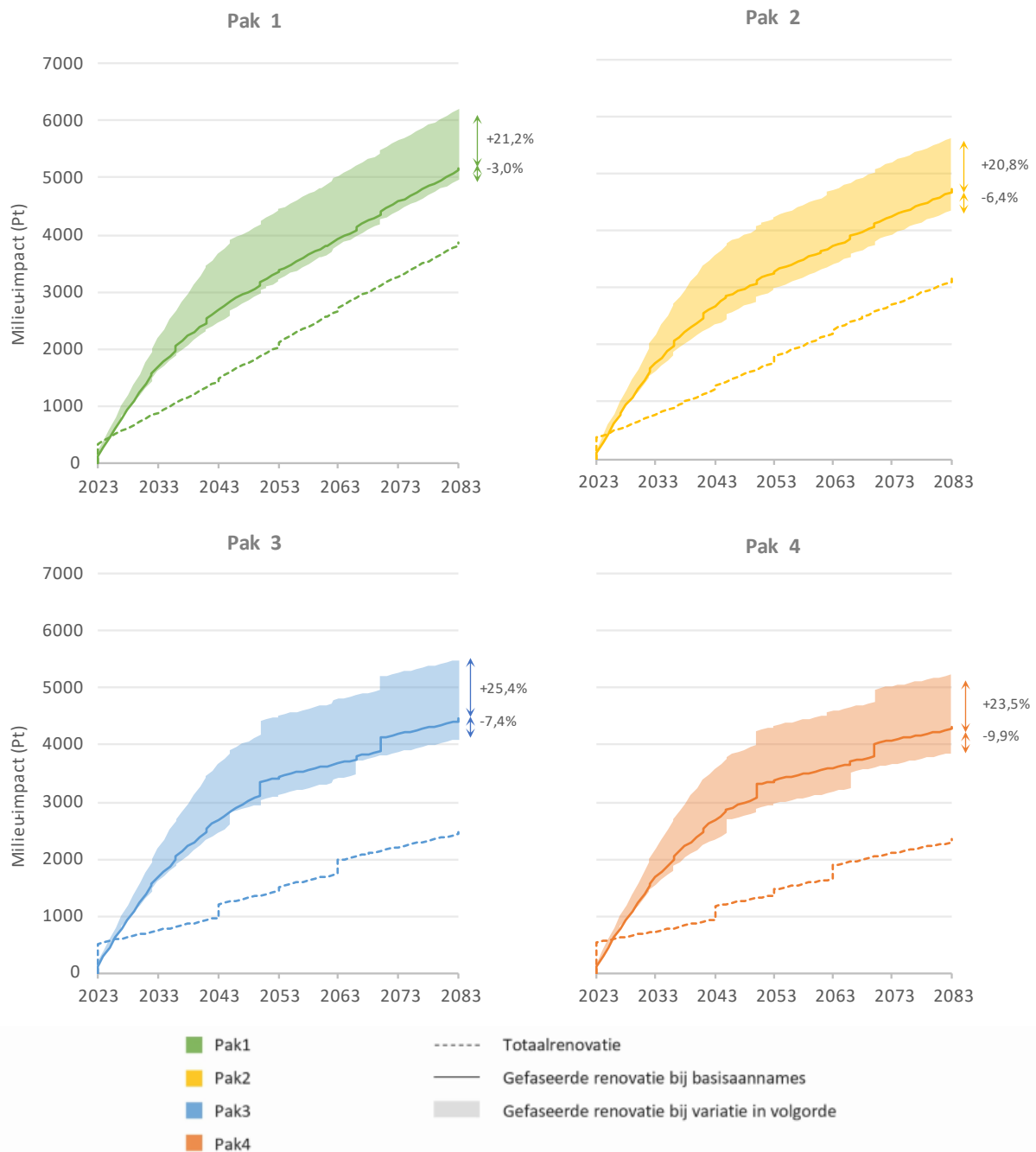
Tabel 17: Meest negatieve renovatievolgorde met praktische aanpassingen (legende: zie Figuur 27)

Deze praktische aanpassing zorgt voor een afname van de milieu-impact met maximaal 0,72%, dit is verwaarloosbaar klein. In het verdere verloop van deze masterproef wordt telkens met de meest negatieve renovatievolgorde met praktische aanpassingen gewerkt.

7.1.5 Resultaat

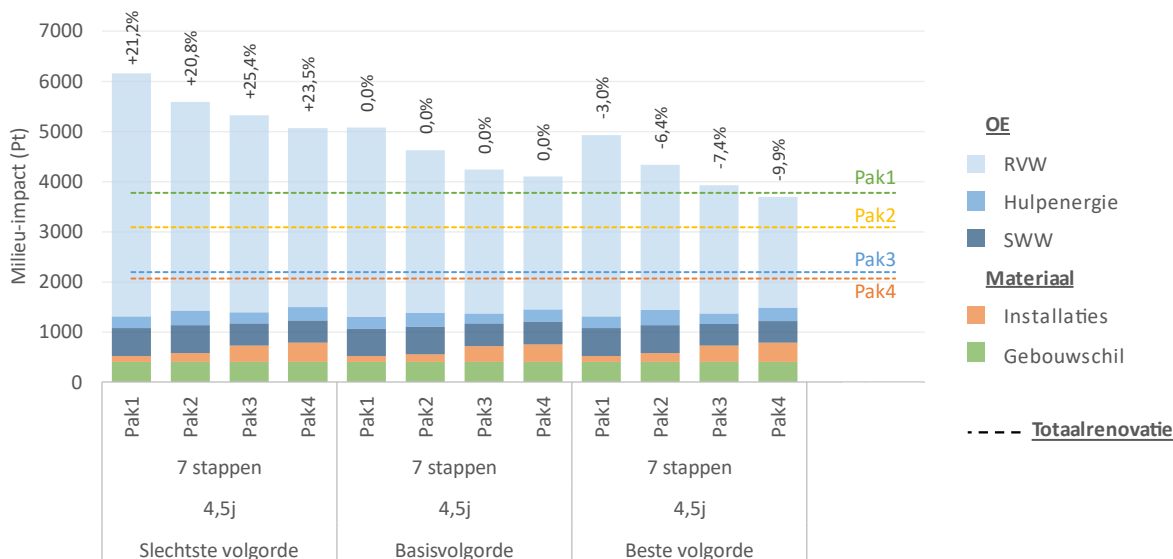
Figuur 42 geeft per maatregelenpakket de cumulatieve milieu-impact van de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie weer, waarbij de gefaseerde renovatie kan uitgevoerd worden volgens de meest negatieve en de meest optimale uitvoeringsvolgorde, zoals deze in de vorige secties bepaald is. Daaruit kan besloten worden dat de aanbeveling vanuit 'BENOveren', waarop de uitvoeringsvolgorde in de basisaanname gebaseerd is, vrij goed is. Opvallend is dat ze het meest accuraat is voor het scenario met een ventilatiesysteem C+ en een gascondensatieketel. Indien er gebruik gemaakt wordt van meer energie-efficiënte installaties zoals een lucht/water-warmtepomp of een ventilatiesysteem D, kan het op vlak van milieu-impact interessanter zijn om deze vroeger in het renovatieproces te implementeren. Door te opteren voor een beter aangepaste uitvoeringsvolgorde, kan de milieu-impact over een studieperiode van 60 jaar tot 9,9% lager worden dan bij de uitvoering van de gefaseerde renovatie volgens de basisaanname.

Indien er voor een zeer inefficiënte uitvoeringsvolgorde gekozen wordt waarbij eerst de minst energie-efficiënte maatregelen uitgevoerd worden, zal de totale milieu-impact over een periode van 60 jaar 20 tot 25% hoger zijn dan wanneer men de volgorde uit de basisaanname hanteert.



Figuur 42: Invloed van de uitvoeringsvolgorde op de cumulatieve milieu-impact van een gefaseerde renovatie

Vervolgens wordt in Figuur 43 de totale milieu-impact van de gefaseerde renovatie (in de kolommen) en totaalrenovatie (de streeplijnen) over een periode van 60 jaar weergegeven. De procentuele toename van de milieu-impact van de gefaseerde renovatie ten opzichte van de totaalrenovatie met hetzelfde maatregelenpakket is weergegeven boven elke kolom.



Figuur 43: Vergelijking van de totale milieu-impact van totaalrenovatie en gefaseerde renovatie met meest optimale en de meest negatieve uitvoeringsvolgorde van de renovatiemaatregelen

De uitvoeringsvolgorde heeft geen invloed op de materiaalimpact van de gebouwschil en de technische installaties, enkel op de milieu-impact van het operationeel energiegebruik. Vooral de milieu-impact van het energiegebruik voor RVW varieert: het neemt met 28,0% tot 34,6% toe wanneer de meest negatieve uitvoeringsvolgorde gehanteerd wordt en daalt met 4,5% tot 16,7% bij meest optimale uitvoeringsvolgorde. Het energiegebruik voor SWW daalt enkel in de scenario's met een warmtepomp licht (3,6%) wanneer er gerenoveerd volgens de meest optimale uitvoeringsmethode. Het energiegebruik voor hulpenergie stijgt telkens bij de meest optimale uitvoeringsvolgorde (4,2% tot 10,4%) omdat het ventilatiesysteem vroeger geplaatst wordt. Ook bij de meest negatieve uitvoeringsvolgorde stijgt het energiegebruik voor hulpenergie met 4,2% tot 7,8%.

Het best presterende renovatiescenario – waarbij de meest optimale uitvoeringsvolgorde gehanteerd wordt en met een warmtepomp en ventilatiesysteem D – heeft een milieu-impact van 3694 Pt. Dit is 2,2% lager dan de milieu-impact van het slechtst presterende totaalrenovatiescenario (3779 Pt). Door een goede renovatievolgorde te hanteren, maar wel elke renovatiemaatregel om de 4 à 5 jaar en als een aparte stap uit te voeren, kan de milieu-impact van een gefaseerde renovatie met energie-efficiëntere maatregelen resulteren in een lagere milieu-impact dan een totaalrenovatiescenario met een minder performant maatregelenpakket.

7.2 Variabele 2: het aantal renovatiestappen

Zoals Maia et al. (2021) vaststelden, gebeurt stapsgewijs renoveren niet altijd maatregel per maatregel. Soms kan het ook opportuun zijn om meerdere maatregelen tegelijk uit te voeren, dan wordt er stap voor stap gerenoveerd. Daarom wordt in dit onderdeel onderzocht in welke mate het bundelen van renovatiemaatregelen een invloed heeft op de totale milieu-impact van de casestudy over een studieperiode van 60 jaar. Hierbij wordt er nog altijd verondersteld dat de renovatiestappen gespreid worden over een periode van 27 jaar en dat de renovatie uitgevoerd wordt volgens de volgorde uit de basisaannames uit sectie 5.4.2.

7.2.1 Bepaling van de renovatiestappen

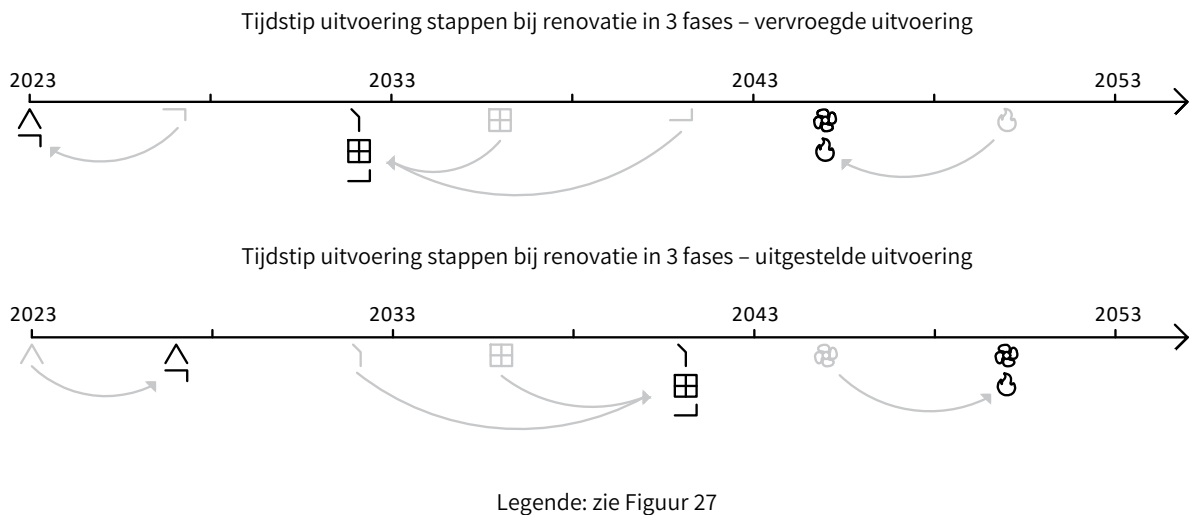
Om een idee te krijgen van de invloed van het bundelen van renovatiemaatregelen in renovatiestappen, wordt in deze masterproef aangenomen dat de renovatie in twee of in drie stappen uitgevoerd kan worden. Hierbij worden de renovatiemaatregelen telkens in stappen gegroepeerd zoals geïllustreerd in Figuur 44. Wanneer er in drie stappen gewerkt wordt, zullen de eerste twee renovatiemaatregelen één stap vormen, worden de volgende drie renovatiemaatregelen samengenomen en vormen ook de laatste twee maatregelen één stap. Bij een renovatie in twee fases, worden de eerste vier maatregelen in de eerste stap en de laatste drie maatregelen in de tweede stap uitgevoerd.

	Stap 1	Stap 2	Stap 3
3 stappen	∧ ¬	∩ ⊞ ⊥	⊗ ⊕
2 stappen	∧ ¬ ∩ ⊞	⊥ ⊗ ⊕	
	Stap 1		Stap 2

Legende: zie Figuur 27

Figuur 44: Groepering van renovatiemaatregelen tot renovatiestappen bij een gefaseerde renovatie

Renovatiemaatregelen worden dus in stappen samengenomen, maar het tijdstip waarop deze uitgevoerd worden kan zeer variabel zijn. Net zoals bij de renovatievolgorde, is ook hier een meest negatieve en een meest optimale scenario vastgelegd. Enerzijds is het mogelijk dat het hele pakket met renovatiemaatregelen uitgevoerd wordt wanneer de eerste renovatiemaatregel uit dat pakket zou moeten uitgevoerd worden, dit is het meest optimale scenario. Anderzijds kan het ook zijn dat het pakket pas uitgevoerd wordt wanneer de laatste renovatiemaatregel uitgevoerd zou moeten worden. Dit scenario houdt steek wanneer men bijvoorbeeld pas renovatiemaatregelen kan uitvoeren wanneer men voldoende gespaard heeft. Het wordt aanzien als het meest negatieve scenario. In het verdere verloop van deze masterproef wordt het meest optimale scenario beschreven als de ‘vervroegde uitvoering’ en het meest negatieve scenario als de ‘uitgestelde uitvoering’. In Figuur 45 worden de concepten van een vervroegde en een uitgestelde uitvoering grafisch geïllustreerd.



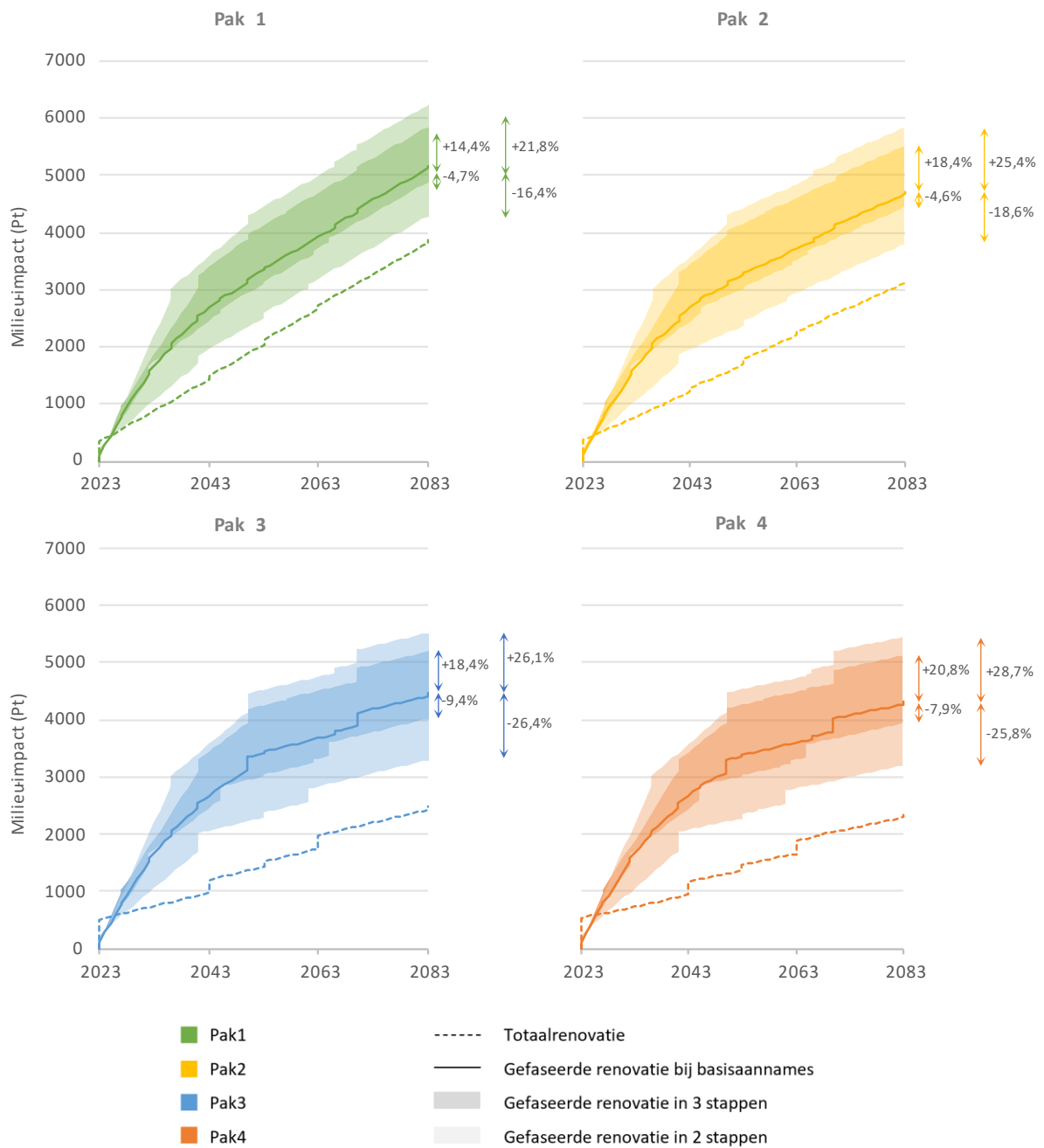
Figuur 45: Schematische planning gefaseerde renovatie waarbij renovatiemaatregelen samengenomen worden en vervroegd of uitgesteld uitgevoerd worden

7.2.2 Resultaat

Figuur 46 geeft per maatregelenpakket de cumulatieve milieu-impact van de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie weer, waarbij de gefaseerde renovatie kan worden uitgevoerd in twee of in drie stappen en met een uitgestelde of een vervroegde uitvoering, zoals in de vorige sectie bepaald is.

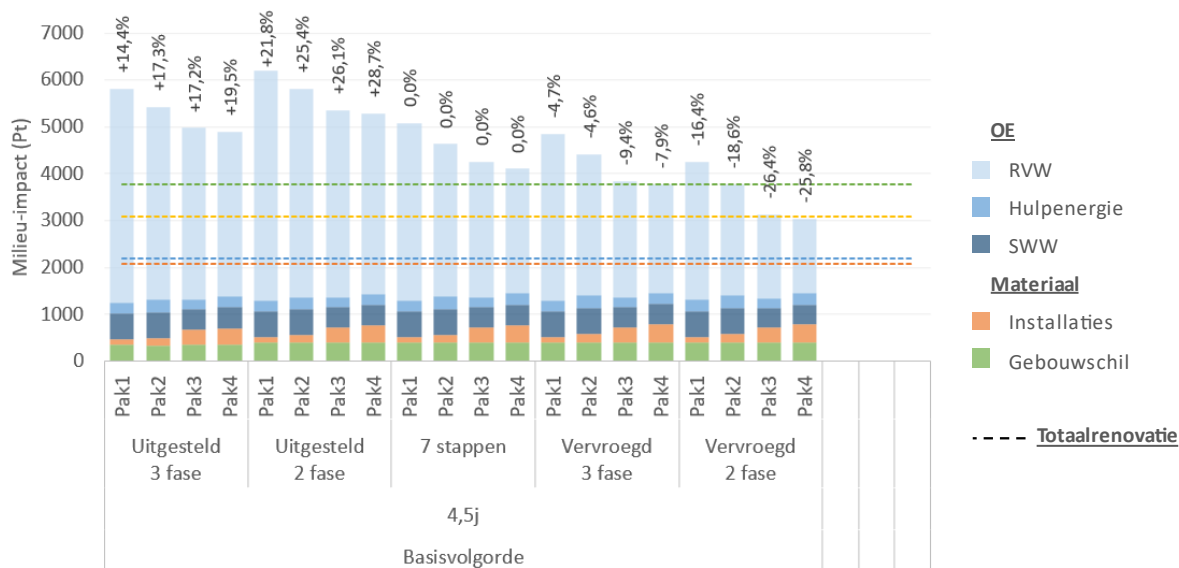
Zoals verwacht, daalt de milieu-impact wanneer de maatregelen vervroegd uitgevoerd worden. Wanneer de maatregelen uitgesteld uitgevoerd worden, stijgt de milieu-impact. De negatieve invloed van een uitgestelde renovatie op de totale milieu-impact is telkens groter dan de positieve van een vervroegde renovatie.

Uit deze figuur wordt bovendien duidelijk dat de milieu-impact meer afwijkt van de basisaanname wanneer er in twee stappen gerenoveerd wordt dan wanneer er in drie stappen gerenoveerd wordt, zowel bij een vervroegde als bij een uitgestelde uitvoering. Bij de vervroegde uitvoeringsmethode zorgt de renovatie in twee stappen voor een reductie in de milieu-impact die 3,5 tot 4 keer groter is dan bij de renovatie in drie stappen in een scenario met een gascondensatieketel. In een scenario met een warmtepomp is de reductie van de milieu-impact in een 2-stapsrenovatie 2,8 tot 3,3 keer groter dan in een 3-stapsrenovatie. Indien de renovatiestappen uitgesteld uitgevoerd worden, is de toename van de milieu-impact in het scenario met twee renovatiestappen 1,5 keer groter dan in het scenario met drie stappen. Hier is geen verschil te merken tussen de verschillende maatregelenpakketten.



Figuur 46: Invloed van het tegelijk uitvoeren van renovatiemaatregelen op de cumulatieve milieu-impact van een gefaseerde renovatie

In Figuur 47 is opnieuw de milieu-impact van de gefaseerde renovatie in kolommen weergegeven en de milieu-impact van de totaalrenovatie in streeplijnen. De toename van de milieu-impact van de gefaseerde renovatiescenario's ten opzichte van het totaalrenovatiescenario met hetzelfde maatregelenpakket is procentueel weergegeven boven elke kolom. Opnieuw wordt onderzocht waar de grootste bijdrages aan de



Figuur 47: Vergelijking milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie waarbij renovatiemaatregelen tegelijk uitgevoerd worden

Net zoals in deel 7.1, is ook hier de variatie in milieu-impact bijna louter toe te schrijven aan een verandering in het operationeel energiegebruik, en dan meer specifiek aan het energiegebruik voor RVW. De materiaalimpact van de gebouwschil en de technische installaties blijft echter niet helemaal even groot. In de scenario's waarin maatregelen vervroegd uitgevoerd worden, moet het ventilatiesysteem eens extra vervangen worden, waardoor de impact van de technische installaties licht stijgt. In de uitgestelde 3-stapsscenario's moeten de ramen een keer minder vervangen worden, waardoor de materiaalimpact van de gebouwschil wat daalt.

Bij een uitgestelde uitvoering zal de milieu-impact van de gefaseerde renovatie met condensatieketel 54% tot 88% hoger liggen dan deze van de totaalrenovatie. Bij de scenario's met warmtepomp is dit zelfs 127% tot 156%. Indien de renovatie echter vervroegd uitgevoerd wordt in twee stappen, zal de milieu-impact van het slechtste gefaseerde renovatiescenario slechts 12% tot 22% hoger liggen dan deze van de overeenkomstige totaalrenovatie, afhankelijk van het gebruikte ventilatiesysteem. Bij vervroegde 2-stapsrenovaties met een warmtepomp ligt dit cijfer op 41% tot 46%, afhankelijk van het gebruikte ventilatiesysteem.

Ook leren we dat elke gefaseerde renovatie nog steeds een hogere milieu-impact heeft dan de overeenkomstige totaalrenovatie. Bij verschillende vervroegde gefaseerde renovaties met warmtepomp zakt de milieu-impact wel onder deze van een totaalrenovatie met een condensatieketel met ventilatiesysteem C+ en zelfs met ventilatiesysteem D.

7.3 Variabele 3: periode tussen de renovatiestappen

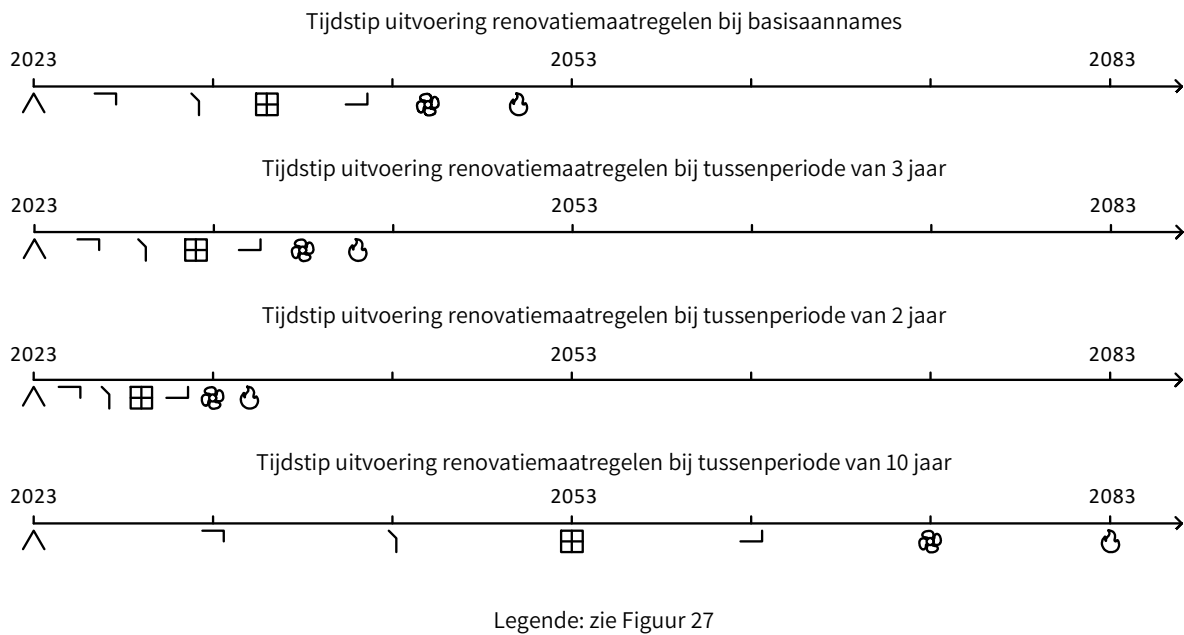
In het basisscenario wordt ervan uitgegaan dat er afwisselend om de vier en vijf jaar één renovatiemaatregel uitgevoerd wordt. Op die manier is het volledige renovatieproces afgerond in 2050, het moment dat alle woningen EPC-label A moeten hebben. Wanneer een gefaseerde renovatie echter sneller uitgevoerd wordt, zal het operationeel energiegebruik sneller dalen en zal ook de totale milieu-impact over een periode van 60 jaar dalen.

In dit onderdeel wordt onderzocht in welke mate de milieu-impact wordt beïnvloed door een kortere termijn tussen de verschillende renovatiestappen. Hierbij wordt telkens de veronderstelling gemaakt dat de termijn tussen de uitvoering van elke renovatiemaatregel gelijk is.

7.3.1 Bepaling van de tussenperiode

De milieu-impact van enkele scenario's met een verschillende periode tussen de renovatiestappen zal berekend worden. Bij de bepaling van de invloed van de termijn tussen renovatiestappen zal het niet voldoende zijn om, zoals in sectie en 7.1 en 7.2, een optimaal en een meest negatief scenario te definiëren. Het scenario dat leidt tot de laagste milieu-impact, het optimale dus, is namelijk het totaalrenovatiescenario waar er geen tijd tussen de renovatiestappen zit. Het meest negatieve scenario is ofwel het basisscenario, waarbij de laatste stap in 2050 uitgevoerd wordt. Bijgevolg wordt in dit onderdeel gepoogd om een verband te vinden tussen de tussenperiode van de verschillende renovatiestappen en de milieu-impact over een periode van 60 jaar.

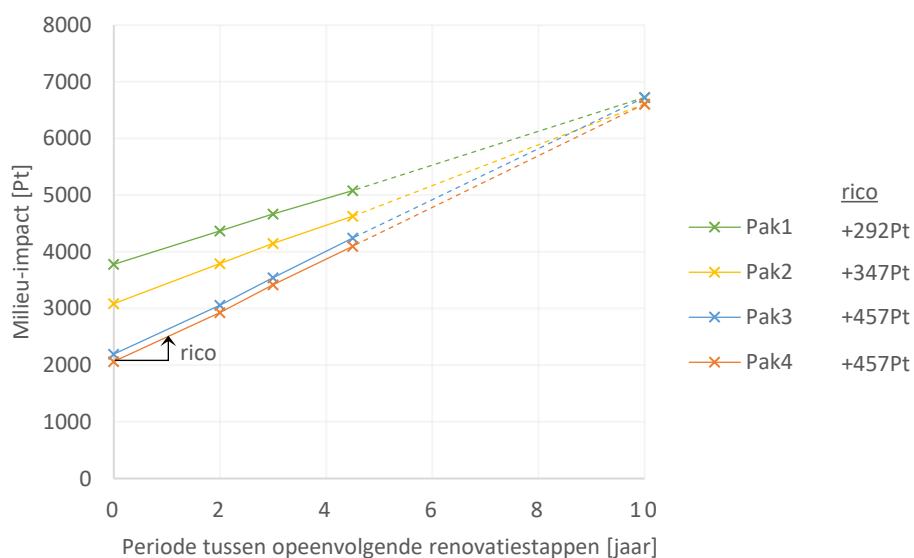
Daarom wordt de totale milieu-impact berekend voor een scenario waarbij er drie jaar tussen de renovatiestappen zit, een scenario waarbij die tussenperiode slechts twee jaar bedraagt en het scenario waarbij de gefaseerde renovatie uitgespreid wordt over de volledige studieperiode. De totale renovatieperiode wordt dus ingekort van 27 jaar tot respectievelijk 18 en 12 jaar en verlengd tot 60 jaar. Dit laatste scenario is weinig realistisch en de woning zal hierbij niet voldoen aan de langetermijndoelstelling voor gebouwen voor 2050. Ze wordt dus eerder als een theoretisch scenario meegenomen en zal helpen om het verband tussen de tussenperiode van de verschillende renovatiestappen en de milieu-impact over een periode van 60 jaar duidelijker te maken. De uitvoering van de renovatiemaatregelen gebeurt zoals geïllustreerd in Figuur 48.



Figuur 48: Schematische planning gefaseerde renovatie met een kortere periode tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen

7.3.2 Resultaat

De totale milieu-impact over een studieperiode van 60 jaar wordt uitgerekend voor de gefaseerde renovatiescenario's uit sectie 7.3.1. De milieu-impact van de scenario's wordt uitgezet op Figuur 49. Er lijkt een lineair verband te bestaan tussen de tussenperiodeperiode van de opeenvolgende renovatiestappen en de totale milieu-impact. Eens de tussenperiode groter wordt dan deze in het basisscenario, wordt er niet meer voldaan aan de doelstellingen voor 2050. In de figuur worden deze scenario's aangegeven met een streeplijn. Voor de scenario's waarin wel aan de doelstellingen wordt voldaan wordt, is een volle lijn gebruikt.



Figuur 49: Invloed van de renovatiesnelheid op de milieu-impact van een gefaseerde renovatie

In Figuur 49 is te zien dat de richtingscoëfficiënt (rico) van de renovaties met een condensatieketel en ventilatiesysteem D 20% groter is dan deze van de renovatie met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+. Ook de rico van de scenario's met een warmtepomp is 57% groter dan deze van het scenario met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+. Er kan dus geconcludeerd worden dat de milieu-impact van een renovatie met een minder performant maatregelenpakket minder sterk beïnvloed zal worden door de gehanteerde tussenperiode dan deze van renovatie met een meer performant maatregelenpakket. Bovendien valt het op dat de lijnen in Figuur 49 dichter bij elkaar komen te liggen naarmate de renovatieperiode langer wordt. Dan zal het belang van de maatregelenpakketten dus afnemen.

De milieu-impact van de gefaseerde renovaties met eenzelfde ventilatiesysteem is gelijk in het theoretische scenario met een periode tussen de opeenvolgende maatregelen van tien jaar. Ze bedraagt respectievelijk 6725 Pt en 6610 Pt voor de scenario's met een ventilatiesysteem C+ en D. Bij een tussenperiode van tien jaar zou de laatste stap, de implementatie van LTV en een nieuwe gascondensatieketel of een warmtepomp, namelijk pas na 60 jaar uitgevoerd worden. De invloed hiervan op het operationeel energiegebruik is niet meer te zien tijdens de studieperiode. De milieu-impact van het scenario met een warmtepomp en ventilatiesysteem C+ zou gelijk zijn aan de impact van het scenario met een condensatieketel en ventilatiesysteem D wanneer er een periode van 8 à 9 jaar tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiestappen zou zitten.

Het verschil in milieu-impact is opnieuw bijna volledig te wijten aan het operationeel energiegebruik. De materiaalimpact van de gebouwschil blijft dezelfde in elk scenario. Bij een tussenperiode van twee of drie jaar zal het ventilatiesysteem eens extra vervangen moeten worden. Dit zorgt dus voor een lichte stijging in de materiaalimpact van de technische installaties. Bij een tussenperiode van tien jaar moet het ventilatiesysteem niet vervangen worden en zal er geen warmtepomp geïnstalleerd worden. Dit zorgt dan weer voor een daling van de materiaalimpact van de technische installaties.

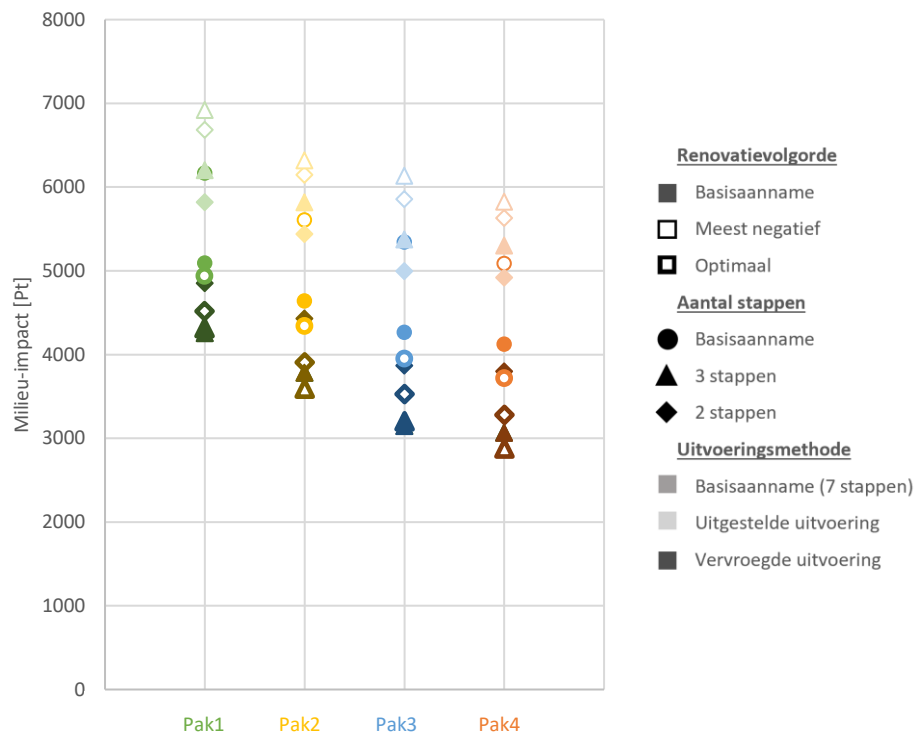
Opnieuw blijft de milieu-impact bij totaalrenovatie altijd lager dan de milieu-impact bij een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket. Wanneer renovatiestappen sneller na elkaar uitgevoerd worden, is het echter wel mogelijk dat de milieu-impact van een gefaseerde renovatie met een meer performant maatregelenpakket kleiner wordt dan de milieu-impact van een totaalrenovatie met een minder performant maatregelenpakket. Bij een tussenperiode van drie jaar daalt de milieu-impact van beide scenario's met een warmtepomp (3060 Pt en 2930 Pt) onder deze van de totaalrenovatie met condensatieketel en ventilatiesysteem C+ (3779 Pt). Wanneer de tussenperiode slechts twee jaar bedraagt, zou ook de milieu-impact van de gefaseerde renovatie met condensatieketel en ventilatiesysteem D (3791 Pt) hier quasi gelijk aan zijn. Bij een tussenperiode van twee jaar daalt de milieu-impact van een gefaseerde renovatie met warmtepomp (3060 Pt en 2065 Pt) onder deze van de totaalrenovatie met een condensatieketel en ventilatiesysteem D.

7.4 Relatie tussen de variabelen

In dit onderdeel wordt onderzocht hoe de milieu-impact beïnvloed wordt wanneer er bij de planning van een gefaseerde renovatie met verschillende variabelen tegelijk wordt afgeweken van de basisaannames. Hiervoor wordt enkel de totale milieu-impact van de verschillende scenario's in beschouwing genomen. Het aandeel ingebedde energie in de gebouwschil en de installaties en het aandeel operationeel energiegebruik door RVW, hulpenergie en SWW is voor elk van de beschouwde scenario's terug te vinden in de staafdiagrammen in bijlage H.

7.4.1 Uitvoeringsvolgorde in combinatie met aantal renovatiestappen

De uitvoeringsvolgorde kan zorgen voor een toe- of een afname in de milieu-impact. Ook het tegelijk uitvoeren van maatregelen zorgt voor een toename van de milieu-impact (wanneer ze uitgesteld uitgevoerd worden) of een afname ervan (wanneer de maatregelen vervroegd uitgevoerd worden). In onderstaande figuur wordt de totale milieu-impact weergegeven voor de gefaseerde renovatie met de vier verschillende maatregelenpakketten, waarbij zowel de volgorde als het aantal renovatiestappen kan afwijken van de basisaannames. Ook hier is gezocht naar een meest negatieve en een meest optimale scenario. De meest negatieve uitvoeringsvolgorde werd dus enkel gecombineerd met scenario's waarbij stappen uitgesteld uitgevoerd worden en de optimale uitvoeringsvolgorde met scenario's met een vervroegde uitvoering.



Figuur 50: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie

Het is duidelijk dat beide variabelen, de uitvoeringsvolgorde en het aantal stappen waarin de renovatie uitgevoerd wordt, elkaar beïnvloeden. Om de milieu-impact te bepalen van een scenario waarbij deze twee variabelen afwijken van de basisaannames kan de invloed van een variabele volgorde op de milieu-impact dus niet eenvoudigweg opgeteld worden bij de invloed van het samennemen van renovatiemaatregelen. Het is echter moeilijk om een verband op te stellen tussen twee variabelen.

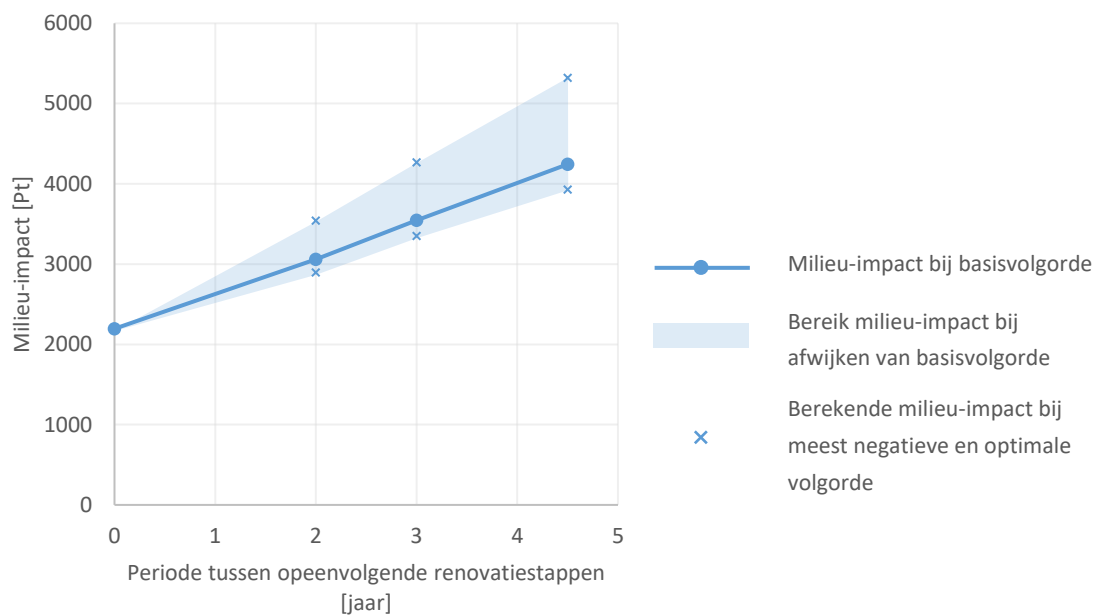
Zo blijkt een vervroegde tweestaprenovatie het potentieel van een betere uitvoeringsvolgorde beperkt te zijn. Enkel in de scenario's met een ventilatiesysteem D is er een verschil van 185 Pt op te merken. Dan wordt het ventilatiesysteem al aan het begin van de renovatieperiode geïmplementeerd bij de geoptimaliseerde volgorde, bij de volgorde uit de basisaannames wordt in de plaats hiervan het plat dak geïsoleerd. Indien de renovatie in drie stappen uitgevoerd wordt, blijkt het hanteren van de optimale uitvoeringsvolgorde dan weer wel een significant effect op de milieu-impact te hebben. Deze daalt met 6,6 tot 12,6 procentpunten meer dan wanneer de renovatie uitgevoerd zou worden volgens de basisvolgorde.

Een slechtere uitvoeringsvolgorde kan de milieu-impact van een tweestaprenovatie waarbij de renovatiemaatregelen uitgesteld uitgevoerd worden echter wel merkkelijk laten stijgen. Wanneer de meest negatieve renovatievolgorde gehanteerd wordt, stijgt de milieu-impact met 36% ten opzichte van de gefaseerde renovatie die volgens de basisaannames uitgevoerd wordt in de scenario's met een condensatieketel en met respectievelijk 44% en 41% in een scenario met een warmtepomp en ventilatiesysteem C+ en D. Dit is een verschil van 19 tot 20 procentpunten ten opzichte van de scenario's waarbij enkel de meest negatieve renovatievolgorde zou toegepast worden en een verschil van 15 tot 19 procentpunten ten opzichte van de scenario's met een uitgestelde tweestaprenovatie met de basisvolgorde. Ook bij een driestapsrenovatie is de stijging van de milieu-impact ten opzichte van het gefaseerde renovatiescenario uit hoofdstuk 6 significant wanneer zowel de meest negatieve uitvoeringsvolgorde als de uitgestelde uitvoering gehanteerd worden.

Ook al is een verband tussen de variabelen moeilijk vast te leggen, het is wel duidelijk dat het bereik waarin de milieu-impact van de gefaseerde renovatie kan liggen groter wordt wanneer beide variabelen tegelijk kunnen afwijken van de basisaannames. In het meest negatieve scenario is er een toename in milieu-impact van 36% tot 44% te merken, afhankelijk van het gekozen maatregelenpakket. In het meest positieve scenario daalt de milieu-impact met 15% tot 30%, afhankelijk van het gekozen maatregelenpakket. In absolute cijfers is het verschil tussen het meest negatieve en het meest positieve scenario gelijk aan 2920 Pt, 2997 Pt, 3563 Pt en 3442 Pt voor respectievelijk scenario's met condensatieketel en ventilatiesysteem C+ en D en scenario's met warmtepomp en ventilatiesysteem C+ en D. Ook worden de scenario's met meer energie-efficiënte renovatiemaatregelen sterker beïnvloed door een afwijking van de basisaannames.

7.4.2 Uitvoeringsvolgorde in combinatie met de periode tussen renovatiestappen

In Figuur 51 wordt de totale milieu-impact weergegeven voor één maatregelenpakket (Pak3), waarbij zowel de uitvoeringsvolgorde en de periode tussen de renovatiestappen kunnen afwijken van de basisaannames. Er is opnieuw een lineair verband op te merken, waarbij de milieu-impact voor een tussenperiode van 0 jaar, de totaalrenovatie dus, gelijk is voor alle uitvoeringsvolgordes.



Figuur 51: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij uitvoeringsvolgorde en de tijd tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie

Uit deze grafiek leren we dat het belang van een goede uitvoeringsvolgorde toeneemt naarmate de periode tussen opeenvolgende renovatiestappen langer wordt. Het bereik waarbinnen de milieu-impact kan liggen, wordt dan namelijk groter. Bovendien wordt duidelijk op basis van de helling van de lijnen duidelijk dat de meest negatieve renovatievolgorde sterker beïnvloed wordt door de renovatiesnelheid dan de meest optimale renovatievolgorde.

Doordat beide variabelen elkaar beïnvloeden, kan de invloed van een variabele volgorde niet opgeteld worden bij de invloed van een snellere opeenvolging van de renovatiestappen. Dit kan het best geïllustreerd worden met een voorbeeld:

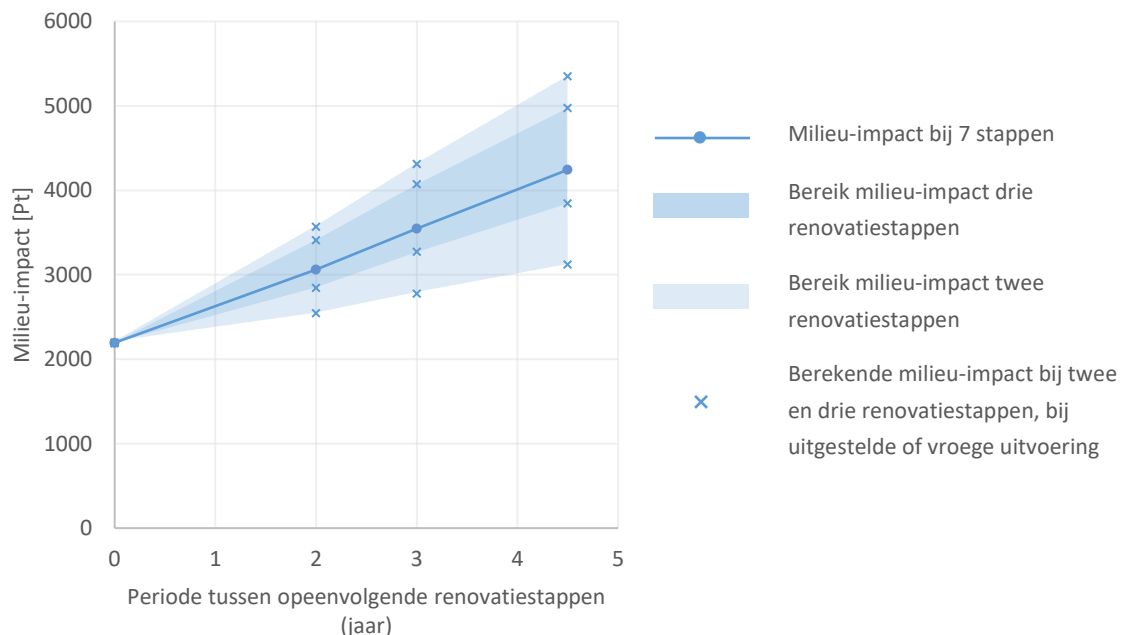
De meest negatieve renovatievolgorde zorgt voor een toename van de milieu-impact van 25,4%. Een periode van 3 jaar tussen de uitvoering van opeenvolgende maatregelen zorgt voor een afname van de milieu-impact met 16,4%. Indien de slechte volgorde echter gecombineerd wordt met de versnelde uitvoering van de renovatie, blijkt dat de milieu-impact slechts 0,6% hoger is dan deze wanneer de renovatie uitgevoerd zou worden volgens de basisaannames. Een slechte uitvoeringsvolgorde kan dus gecompenseerd worden door een snellere uitvoering.

Een goede volgorde en een snellere uitvoering zorgen allebei apart voor een reductie van de milieu-impact (-7,3% en -16,3%). Wanneer er gerenoveerd wordt met zowel een snellere uitvoering als een betere volgorde, zal de positieve invloed ervan op de milieu-impact beperkt blijven tot een afname van 21,0% ten opzichte van de basisaannames.

Het inkorten van de tijd tussen renovatiestappen zorgt ervoor dat men dichterbij een totaalrenovatie evolueert. Het optimaliseren van de uitvoeringsvolgorde zorgt er slechts voor dat de milieu-impact van een gefaseerde renovatie die een bepaalde periode in beslag neemt, geminimaliseerd wordt. De maatregelen die zorgen voor een betere benadering van de totaalrenovatie hebben een grotere invloed op de milieu-impact.

7.4.3 Het aantal renovatiestappen in combinatie met de periode tussen renovatiestappen

In Figuur 52 is de totale milieu-impact voor één maatregelenpakket (Pak3) weergegeven, waarbij zowel de tijd tussen de uitvoering opeenvolgende renovatiemaatregelen als het aantal stappen waarin de renovatie uitgevoerd wordt, afwijken van de basisaannames. Ook hier bestaat er een lineair verband tussen de tussenperiode tussen de opeenvolgende renovatiestappen en de totale milieu-impact. Bij een tussenperiode van 0 jaar, een totaalrenovatie dus, is de milieu-impact van de verschillende scenario's dezelfde.



Figuur 52: Milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij het aantal renovatiestappen en de tijd tussen uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen afwijken van de basisaannames voor gefaseerde renovatie

Ook hier wordt duidelijk dat de invloed van het bundelen van renovatiemaatregelen op de milieu-impact toeneemt naarmate de renovatie over een langere periode uitgespreid wordt. Geheel in lijn met de conclusies uit sectie 7.4.2 heeft de tijd tussen opeenvolgende renovatiestappen een grotere

invloed op de milieu-impact van een uitgestelde stapsgewijze gefaseerde renovatie dan bij een vervroegde.

Net zoals in sectie 7.4.2 beïnvloeden beide variabelen elkaar en kan de invloed ervan op de milieu-impact niet ingeschat worden door simpelweg de invloed van elk van de variabelen apart op te tellen. Zo zorgen een vervroegde uitvoering in twee stappen en een snellere uitvoering met een tussenperiode van drie jaar afzonderlijk voor een reductie van de milieu-impact van respectievelijk 26,2% en 16,3%. Wanneer beide gecombineerd worden, blijft de reductie van de milieu-impact beperkt tot 36,4% ten opzichte van de basisaannames.

7.5 Besluit

In dit hoofdstuk werd duidelijk dat de milieu-impact van de gefaseerde renovatie niet enkel bepaald wordt door de set aan renovatiemaatregelen waarmee gewerkt wordt, maar ook sterk afhankelijk is van de manier waarop de gefaseerde renovatie gepland is.

De sleutel tot het verlagen van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie lijkt te zitten in het zo snel mogelijk verlagen van de milieu-impact. De aangenomen volgorde uit het basisscenario blijkt een goede benadering voor de beste renovatievolgorde te zijn en zorgt ervoor dat de meest efficiënte renovatiemaatregelen als eerste uitgevoerd worden. Zowel het bundelen van renovatiemaatregelen in stappen als het verkorten van de periode tussen opeenvolgende renovatiemaatregelen kunnen er echter voor zorgen dat de gefaseerde renovatie meer gaat lijken op een totaalrenovatie. Deze variabelen kunnen dus leiden tot een grotere reductie van de milieu-impact.

Indien verschillende variabelen tegelijk afwijken van de basisaannames, beïnvloeden ze elkaar. Het effect dat elke variabele heeft op de reductie van de milieu-impact is dus afhankelijk van hoe er nog afgeweken wordt van de basisaannames. Een interessant verband hierbij is dat tussen de periode tussen de renovatiestappen en de andere twee variabelen. De invloed van de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen op de totale milieu-impact wordt namelijk lineair groter wanneer de periode tussen renovatiestappen groter wordt.

Concreet wordt deze trend aangetoond in sectie 7.4, waarbij we zien dat het bereik van de totale milieu-impact bij een variabele uitvoeringsvolgorde met 273 Pt tot 303 Pt stijgt per bijkomend jaar tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiestappen. Dat is 7,2% tot 14,4% van de milieu-impact van de totaalrenovatie met hetzelfde maatregelenpakket. Indien er in twee stappen gerenoveerd wordt, wordt het bereik van de totale milieu-impact 432 Pt tot 495 Pt groter per bijkomend jaar tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiestappen. Wanneer er in drie stappen gerenoveerd wordt is dat 210 Pt tot 224 Pt. Voor de tweestaprenovatie en de driestaprenovatie is dit een toename van respectievelijk 11,4% tot 23,7% en 5,5% tot 11,7% van de totale milieu-impact van de overeenkomstige totaalrenovatie.

8 Resultaten in context

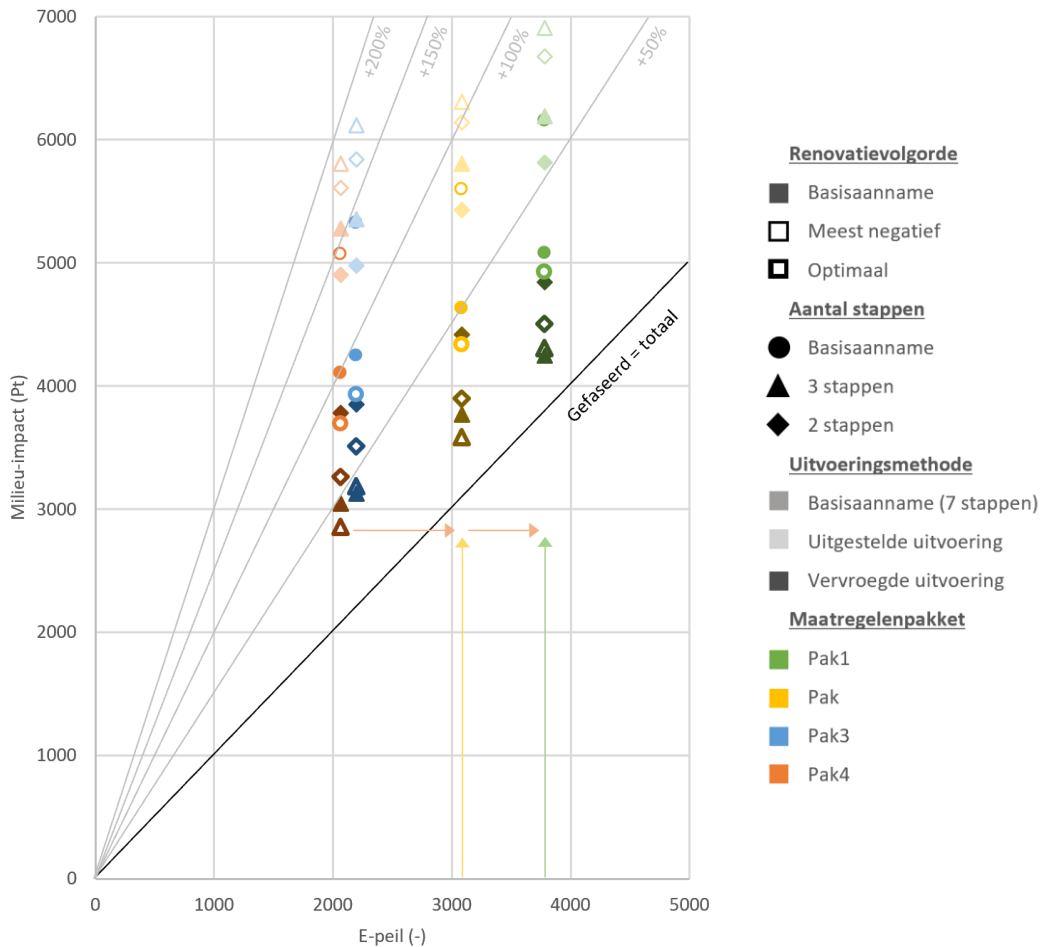
In hoofdstuk 6 werd een vergelijkende levenscyclusanalyse uitgevoerd voor een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens een aantal basisaannames. In hoofdstuk 7 werd vervolgens bepaald wat de invloed op de milieu-impact van de gefaseerde renovatie is wanneer er afgeweken wordt van deze basisaannames. In dit hoofdstuk wordt er teruggekoppeld naar het grotere plaatje en worden de resultaten in context geplaatst. Het eerste onderdeel behandelt de voorkeur voor de aanpak bij renovatiewerken. Hierbij wordt er niet enkel gekeken naar de invloed van de verschillende planningsvariabelen op de milieu-impact, maar ook naar een aantal factoren uit hoofdstuk 2 die de planning van de renovatie mogelijk sterk bepalen. Vervolgens zal de relatie tussen het behaalde E-peil en de totale milieu-impact van de woning besproken worden. Ten slotte worden de resultaten ook gesitueerd in de ruimere context van regelgeving: zullen de maatregelen die getroffen worden om meer energie-efficiënte woningen in 2050 te bekommen, ook resulteren in een lagere milieu-impact in de periode tussen nu en 2050?

8.1 Voorkeur bij renovatiewerken

In Figuur 53 wordt de milieu-impact van de totaalrenovatie weergegeven ten opzichte van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie met eenzelfde maatregelenpakket. Hierbij worden de verschillende opties voor de planning van de gefaseerde renovatie uit sectie 7.4.1 in beschouwing genomen. Voor scenario's die boven de lijn gefaseerd = totaal liggen, is de milieu-impact van de gefaseerde renovatie groter dan deze van de totaalrenovatie. Indien een scenario onder de lijn gefaseerd = totaal ligt, is de milieu-impact van de gefaseerde renovatie het kleinst.

Indien enkel naar de milieu-impact van een renovatie over een periode van 60 jaar gekeken wordt, is het duidelijk dat een totaalrenovatie altijd de voorkeur heeft wanneer deze vergeleken wordt met een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket, ongeacht de renovatieplanning die hiervoor gevolgd wordt. Dit is ook logisch want bij gefaseerde renovatie daalt het operationeel energiegebruik stapsgewijs, terwijl de materiaal-impact nagenoeg gelijk is bij een totaalrenovatie en een gefaseerde aanpak.

Zoals in hoofdstuk 2 aangehaald is, is de behaalde milieu-impact in de realiteit echter zelden de enige factor die meespeelt in het beslissingsproces voor een renovatie-aanpak. Ook de financiële drempel, de informatiedrempel en de drempel om grote beslissingen te maken zijn belangrijke factoren. Daarom zal de optimale renovatiestrategie sterk afhankelijk zijn van onder andere de beschikbare financiële middelen en de wensen van de eigenaar van de woning.



Figuur 53: Milieu-impact van een totaalrenovatie ten opzichte van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen kunnen afwijken van de basisaanname voor gefaseerde renovatie

Er zijn twee scenario's waarin een gefaseerde renovatie toch tot een lagere milieu-impact kan leiden dan een totaalrenovatie. Enerzijds kan dit wanneer de totaalrenovatie niet aan het begin van de renovatieperiode uitgevoerd zou worden. In hoofdstuk 6 is uitgerekend hoelang een totaalrenovatie mag uitgesteld worden voordat de milieu-impact ervan groter wordt dan deze van een gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaanname. Dit zou ook berekend kunnen worden voor een scenario met een andere renovatieplanning. Anderzijds kan dit in bepaalde gevallen ook wanneer er gekozen moet worden tussen een minder energie-efficiënte totaalrenovatie en een energie-efficiëntere gefaseerde renovatie, zoals met pijlen weergegeven is in Figuur 53. Voor welke gevallen dit geldt, is afhankelijk van het beschouwde maatregelenpakket voor totaalrenovatie en voor gefaseerde renovatie, maar ook van de planning waarmee de gefaseerde renovatie uitgevoerd zou worden. Beide scenario's zijn realistische dilemma's waarvoor men, omwille van beperkte financiële middelen bijvoorbeeld, zou kunnen komen te staan.

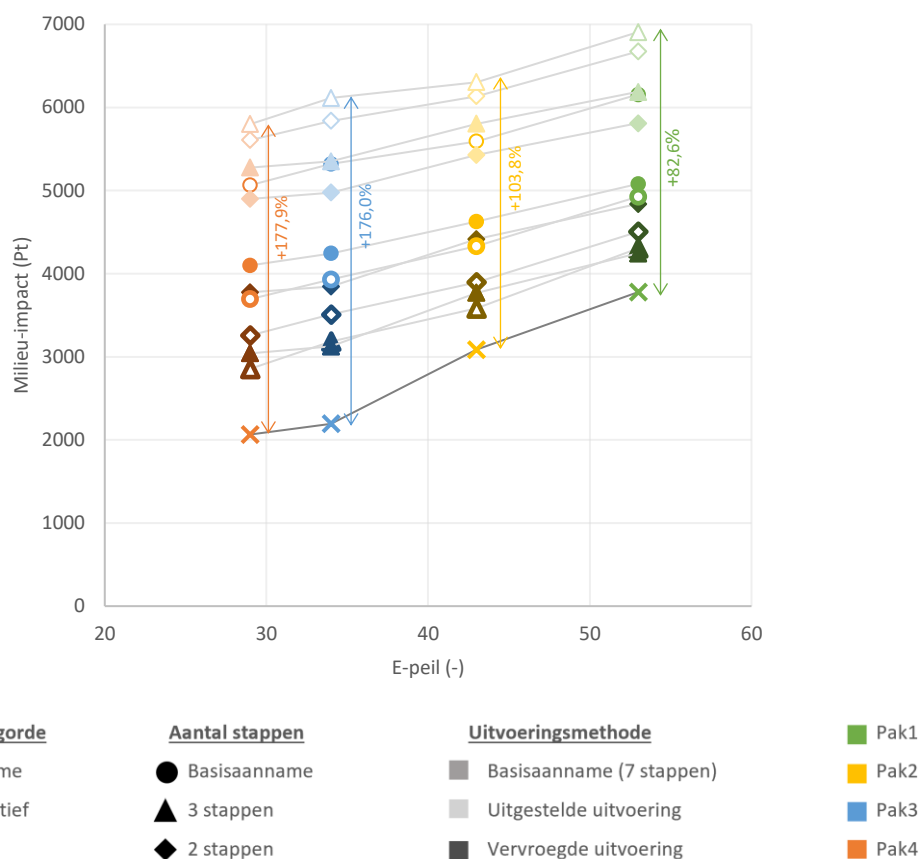
In het geval van een gefaseerde renovatie blijkt het opmaken van een renovatieplanning essentieel. Dit niet enkel om *lock-in* effecten te voorkomen, om de hinder door werken te minimaliseren en om eventueel een synergie-effect te bekomen door renovatiemaatregelen samen uit te voeren, zoals aangehaald werd in hoofdstuk 2, maar zeker ook om de milieu-impact te minimaliseren. Uit Figuur

53 blijkt namelijk dat de verhouding tussen de milieu-impact van een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie met hetzelfde maatregelenpakket sterk kan verschillen. Bij een tweestaprenovatie met een vervroegde uitvoering en een optimale renovatievolgorde is de milieu-impact van de gefaseerde renovatie 13,9%, 16%, 44% en 37% groter dan deze van de overeenkomstige totaalrenovatie indien er gewerkt wordt met respectievelijk een condensatieketel met ventilatiesysteem C+ of D of een warmtepomp met ventilatiesysteem C+ of D. Bij een tweestaprenovatie met uitgestelde uitvoering en de meest negatieve uitvoeringsvolgorde is de impact van de gefaseerde renovatie dan weer 82,6%, 103,8%, 176,0% en 177,9% groter dan deze van de overeenkomstige totaalrenovatie indien er gewerkt wordt met respectievelijk een condensatieketel met ventilatiesysteem C+ of D of een warmtepomp met ventilatiesysteem C+ of D.

De meest efficiënte manier om de milieu-impact van een gefaseerde renovatie te verminderen, is door de renovatiemaatregelen zo vroeg mogelijk in het proces uit te voeren. Dit kan door de periode tussen de uitvoering van opeenvolgende maatregelen te verminderen. Indien hier geen ruimte voor verbetering is, bijvoorbeeld omwille van de verschillende drempels voor energetische renovatie, moeten de andere twee variabelen geoptimaliseerd worden binnen de mate van het mogelijke. In hoofdstuk 7 werd namelijk aangetoond dat de invloed van de uitvoeringsvolgorde en het aantal renovatiestappen op de totale milieu-impact lineair vergroot bij een langere periode tussen renovatiestappen. De vuistregels voor een logische renovatievolgorde, die aangeraden worden via platformen als 'BENOveren', blijken een goede start te zijn om een optimale renovatievolgorde voor een specifiek project op te stellen.

8.2 Relatie tussen het behaalde E-peil en de totale milieu-impact

In dit onderdeel wordt nagegaan in welke mate het E-peil een indicatie geeft van de milieu-impact bij de gefaseerde renovatie van een woning. Figuur 54 geeft het E-peil van de woning in 2050, wanneer ze volledig gerenoveerd is, weer ten opzichte van de milieu-impact voor de verschillende maatregelenpakketten en renovatiescenario's die in deze masterproef onderzocht werden. In deze masterproef is gewerkt met vier maatregelenpakketten. Deze resulteren in vier verschillende E-peilen: E53, E43, E34 en E29 voor respectievelijk maatregelenpakket 1, 2, 3 en 4. De maatregelenpakketten zijn gekozen zodat ze voldoen aan de EPB-eisen voor ingrijpende energetische renovatie en aan de doelstellingen tegen 2050. Uit het onderzoek van onder andere Delem et al. (2020) en Bontridder (2022) kan besloten worden dat verschillende combinaties van renovatiemaatregelen tot eenzelfde E-peil kunnen leiden en dat de milieu-impact van elk van deze combinaties die tot hetzelfde E-peil leiden sterk kan verschillen. Aangezien in dit onderzoek elk maatregelenpakket een ander E-peil heeft, kan deze conclusie niet bevestigd noch ontkracht worden.



Figuur 54: Vergelijking E-peil en milieu-impact bij verschillende renovatiescenario's

Uit dit onderzoek blijkt echter dat niet alleen het maatregelenpakket waarmee het E-peil behaald wordt, maar ook de manier waarop dit gebeurt, een belangrijke invloed heeft op de milieu-impact van het gebouw over de komende 60 jaar. Zoals geïllustreerd in Figuur 54 zorgt de meest negatieve gefaseerde renovatie uit deze studie voor een milieu-impact die respectievelijk 82,6% of 103,8% hoger ligt dan de milieu-impact van de overeenkomstige totaalrenovatie bij het gebruik van een condensatieketel en ventilatiesysteem C+ of D. Bij het gebruik van een warmtepomp en ventilatiesysteem C+ of D was dit respectievelijk 176,0% of 177,9%. Dit verschil is groot. Een gedeeltelijke verklaring hiervoor is het feit dat het E-peil bij de totaalrenovatie al sneller behaald wordt dan bij de gefaseerde renovatiescenario's. Maar ook voor scenario's waarbij de renovatieperiode gelijk is, varieert de milieu-impact over een periode van 60 jaar. In sectie 7.4 is namelijk ondervonden dat de mogelijke afwijking van de milieu-impact ten opzichte van het scenario bij basisaannames recht evenredig toeneemt met de duur van de renovatieperiode. Hoe langer de renovatie dus duurt, hoe meer de milieu-impact van de woning afhankelijk is van de wijze waarop het E-peil behaald wordt.

In het onderzoek van Delem et al. (2020) en Bontridder (2022) wordt geconcludeerd dat de milieu-impact over het algemeen daalt bij een dalend E-peil. Voor de totaalrenovatiescenario's uit deze studie klopt dit: de richtingscoëfficiënt van de verbindingslijn tussen de totaalrenovatiescenario's in Figuur 54 is positief. Wanneer er echter ook rekening gehouden wordt met de mogelijkheid om

gefaseerd te renoveren, is dat niet noodzakelijk het geval: indien men willekeurig verschillende gefaseerde renovatiescenario's zou verbinden op de figuur, is de kans bestaande dat de verbindinglijn tussen twee scenario's dalend is. In dat geval daalt de milieu-impact bij een stijgend E-peil. Bijgevolg moet de conclusie van Delem et al. (2020) en Bontridder (2022) genuanceerd worden: de milieu-impact daalt over het algemeen bij een dalend E-peil, maar enkel indien scenario's met een gelijkaardige renovatieplanning met elkaar vergeleken worden. Inderdaad, wanneer de scenario's met een gelijkaardige renovatieplanning maar een verschillend maatregelenpakket met elkaar verbonden worden, is de richtingscoëfficiënt altijd positief.

8.3 Situering van de gefaseerde renovatiescenario's in de regelgeving tot 2050

Een regeling die de Vlaamse overheid in het leven heeft geroepen om ervoor te zorgen dat elke woning EPC-label A haalt in 2050, is de renovatieverplichting bij eigendomsoverdracht voor energie-inefficiënte woningen. Zoals in hoofdstuk 1 aangehaald is, moeten woningen binnen de 5 jaar na eigendomsoverdracht een bepaald EPC-label behalen. Het EPC-label dat behaald moet worden, verstrengd stapsgewijs. Indien op elk moment dat er een verstrenging doorgevoerd wordt, een eigendomsoverdracht verondersteld wordt, zou het EPC-label van een woning moeten evolueren zoals weergegeven in Tabel 18.

	2028	2033	2040	2045
Te behalen EPC-label	D	C	B	A

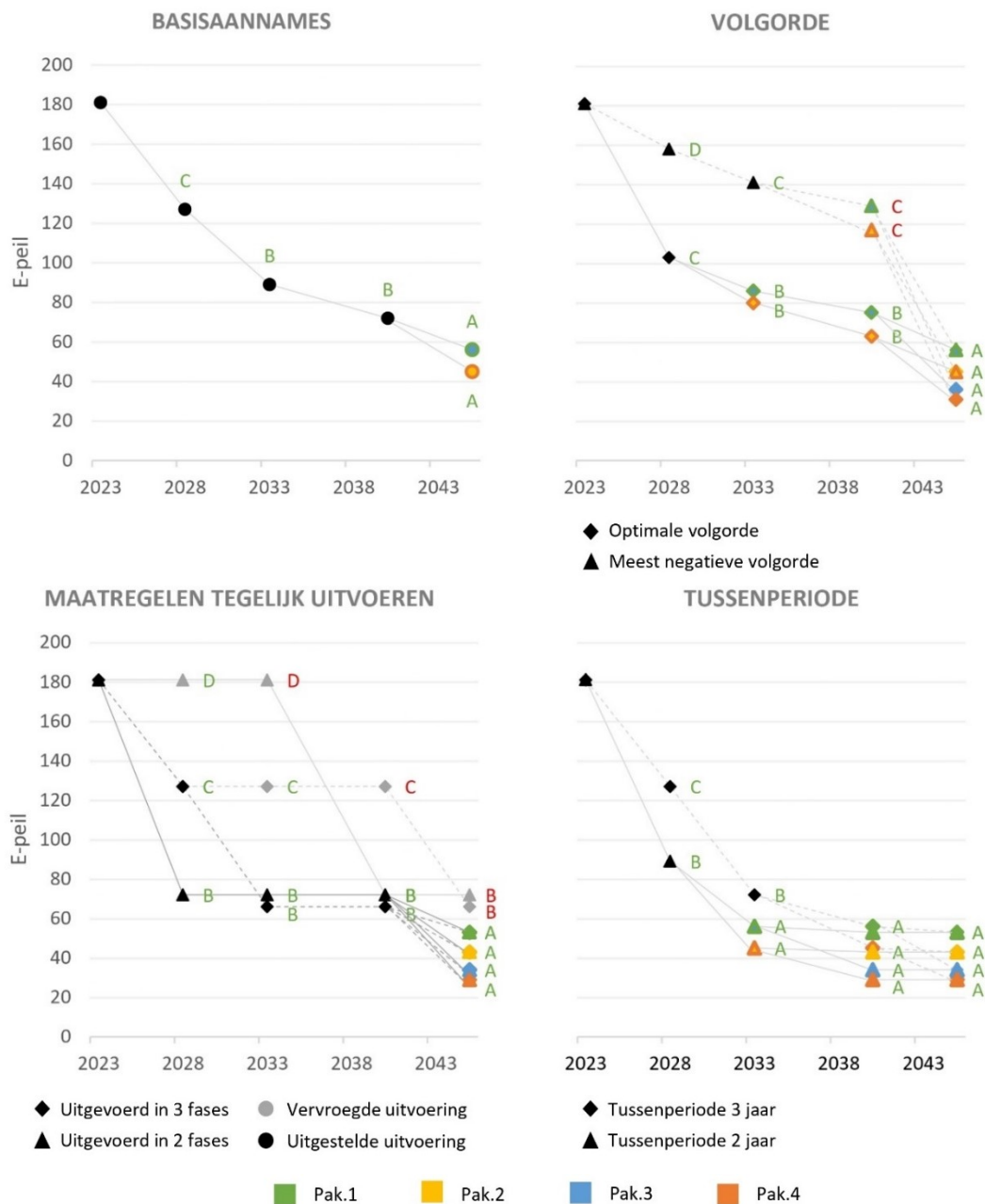
Tabel 18: Te behalen EPC-label na eigendomsoverdracht

In Figuur 55 is het E-peil en het overeenkomstige EPC-label op deze sleutelmomenten weergegeven voor de gefaseerde renovatie volgens de basisaannames die gedefinieerd werden in sectie 5.4.2 en voor gefaseerde renovaties waarbij telkens één van de planningsvariabelen afwijkt van de basisaannames. Het EPC-label is bij elk punt af te lezen. Indien er voldaan wordt aan de tijdlijn uit Tabel 18 is het EPC-label in het groen weergegeven. Indien niet, is het EPC-label in het rood weergegeven.

Uit de figuur kan geconcludeerd worden dat de woning op elk moment een EPC-label zal hebben dat gelijk is aan of beter is dan het EPC-label dat behaald moet worden na eigendomsoverdracht indien er gefaseerd gerenoveerd wordt volgens de basisaannames. Ook wanneer er een betere renovatievolgorde of hogere renovatiesnelheid gehanteerd wordt of wanneer er renovatiemaatregelen gebundeld worden en ze vervroegd uitgevoerd worden, heeft de woning op elk moment een voldoende laag EPC-label. Bij een gefaseerde renovatie volgens de meest negatieve uitvoeringsvolgorde of wanneer er renovatiemaatregelen gebundeld worden en deze uitgesteld uitgevoerd worden, is het EPC-label op minstens één moment hoger dan wat er vooropgesteld wordt

door de renovatieverplichting. Moest de woning op dat moment van eigenaar veranderen, zouden er extra renovatiemaatregelen genomen moeten worden.

De scenario's die niet voldoen aan het vooropgestelde traject, hebben in 2050 een milieu-impact die 731 Pt tot 1177 Pt hoger dan het gefaseerde renovatiescenario bij basisaannames. In de veronderstelling dat er op regelmatige basis een eigendomsoverdracht gebeurt, zou de renovatieverplichting wel degelijk helpen om de milieu-impact tijdens een renovatietraject te beperken. De milieu-impact van de scenario's waarin wel voldaan wordt aan dit traject, vertoont echter een grote variatie: zowel de gefaseerde renovatie volgens de basisaannames als de totaalrenovatie voldoen.



Figuur 55: Evolutie E-peil en EPC-label bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames of waarbij één variabele gewijzigd wordt

8.4 Besluit

In dit hoofdstuk zijn alle resultaten uit hoofdstukken 6 en 7 samengebracht en in context geplaatst. Hieruit kan besloten worden dat niet alleen het gebruikte maatregelenpakket, maar ook de renovatieplanning de milieu-impact van gefaseerde renovatie en totaalrenovatie sterk beïnvloedt. De voorkeur voor één van beide scenario's is echter niet enkel afhankelijk van de milieu-impact, maar ook van andere factoren zoals de financiële capaciteiten en voorkeuren van de eigenaars.

Een totaalrenovatie die aan het begin van de renovatieperiode wordt uitgevoerd, resulteert dan wel altijd in een lagere milieu-impact dan een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket, waardoor de totaalrenovatie dus altijd de voorkeur krijgen indien men enkel naar milieu-impact kijkt. Toch is dit, omwille van andere factoren die meespelen in het beslissingsproces, niet altijd een realistische keuze. Zo zal mogelijk de afweging gemaakt moeten worden tussen een gefaseerde renovatie waarvan de renovatieperiode onmiddellijk begint en een totaalrenovatie die wordt uitgesteld, of tussen een gefaseerde renovatie met een energie-efficiënt maatregelenpakket en een minder energie-efficiënte totaalrenovatie. In beide gevallen kan de gefaseerde renovatie, afhankelijk van de planning ervan, in een lagere totale milieu-impact resulteren.

Ook is er vastgesteld dat het behaalde E-peil enkel informatie geeft over het energiegebruik aan het einde van de renovatieperiode, het geeft echter geen volledig beeld van de periode tijdens de renovatiewerken. Hierdoor kan het moeilijk worden gebruikt als kwalitatieve indicatie van de milieu-impact bij een gefaseerde renovatie, zoals dat wel bij een totaalrenovatie: daar leidt een lager E-peil over het algemeen tot een lagere milieu-impact. In dit hoofdstuk is besloten dat het E-peil enkel als kwalitatieve indicatie van de milieu-impact gezien kan worden indien renovaties met eenzelfde renovatieplanning vergeleken worden.

Bovendien is aangetoond dat de regelgeving voor verplichte renovatie bij eigendomsoverdracht ervoor kan zorgen dat de totale milieu-impact van een woning tot 2050 beperkt blijft. De mogelijke variatie in milieu-impact blijft echter groot. Er zijn namelijk nog heel veel in de woningen dan wel zouden hebben, is echter veel onzekerheid. Ook dit is afhankelijk van de renovatieplanning die gevolgd wordt.

9 Gevoeligheidsanalyses

De methodologische keuzes die gemaakt werden in hoofdstuk 4 en 5 hebben een invloed op de resultaten uit hoofdstuk 6 en 7. In dit hoofdstuk wordt de robuustheid van de studie onderzocht. Eerst wordt in vijf deelonderzoeken de invloed van de berekeningsmethode voor de warmteverliezen doorheen bouwknopen, de luchtdichtheid, de gebouwtypologie, de dynamische energiemix en de gebruikte effectenbeoordelingsmethode op de resultaten nagegaan. Vervolgens worden ook de onzekerheden die inherent aanwezig zijn in dit onderzoek en waarvan de invloed moeilijker te begroten is, besproken. Hierbij wordt beredeneerd in welke mate ze de betrouwbaarheid van de studie beïnvloeden.

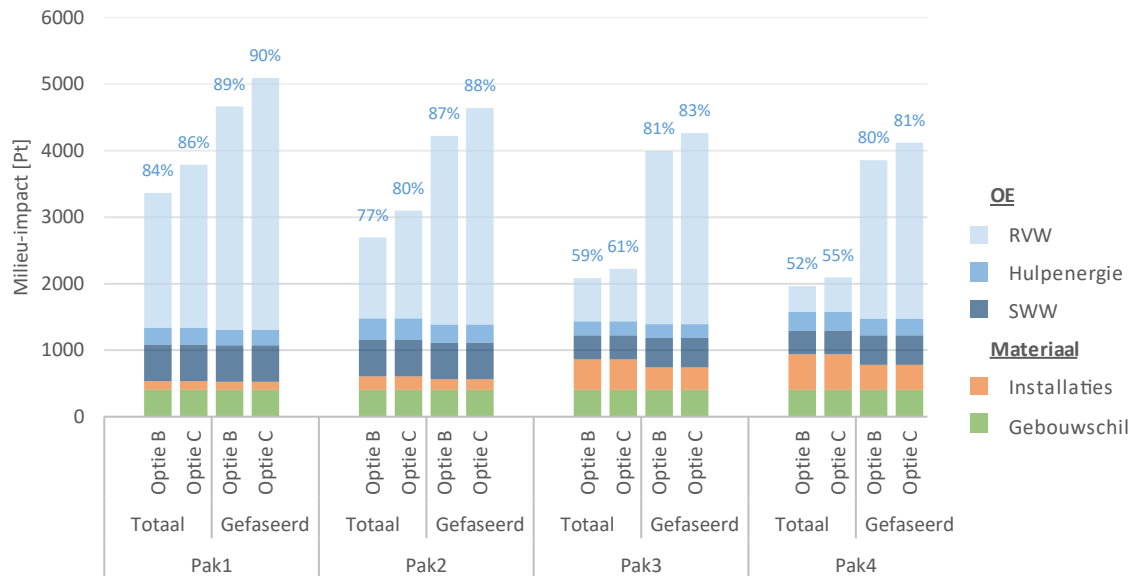
9.1 Warmteverliezen doorheen bouwknopen

In deze gevoeligheidsanalyse wordt onderzocht in welke mate de resultaten van de levenscyclusanalyse wijzigen indien er in de EPB-software gekozen wordt voor een andere berekeningsmethode voor de warmteverliezen doorheen bouwknopen. In het hoofdonderzoek is verondersteld dat er weinig of geen aandacht gaat naar de koudebrugarme uitvoering van bouwknopen. De warmteverliezen doorheen de bouwknopen zijn dus telkens berekend aan de hand van optie C: de forfaitaire toeslag op de U-waarde. In de gevoeligheidsanalyse wordt er verondersteld dat er wel aandacht gaat naar de koudebrugvrije uitvoering van bouwknopen en wordt het warmteverlies doorheen de bouwknopen berekend op basis van optie B: EPB-aanvaarde bouwknopen.

Het operationeel energiegebruik is opnieuw uitgerekend voor zowel de gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames als voor de totaalrenovatie. De materiaalimpact verandert niet, aangezien het eventuele extra materiaalgebruik in de bouwknopen buiten beschouwing wordt gelaten. De milieu-impact voor de scenario's die uitgerekend zijn met optie B en optie C wordt weergegeven in Figuur 56. Het aandeel operationeel energiegebruik wordt procentueel aangegeven boven elke kolom.

Het energiegebruik voor SWW en hulpenergie wordt niet beïnvloed door de gekozen berekeningsmethode. Het energiegebruik voor RVW wel. De toeslag op de U-waarde is $0,041 \text{ W/m}^2\text{K}$ wanneer er gewerkt wordt met EPB-aanvaarde bouwknopen, bij de forfaitaire toeslag (optie C) was dit $0,137 \text{ W/m}^2\text{K}$. De gebouwschil wordt dus energie-efficiënter, waardoor het energiegebruik voor RVW daalt met 404 Pt tot 428 Pt in de scenario's met een condensatieketel. Wanneer er een warmtepomp is, zal het operationeel energiegebruik minder sterk dalen: 130 Pt tot 137 Pt bij de totaalrenovatiescenario's en 265 Pt tot 270 Pt bij de gefaseerde renovatiescenario's. Het verschil in

milieu-impact tussen de scenario's met condensatieketel en de scenario's met warmtepomp wordt kleiner, maar de scenario's met warmtepomp resulteren nog altijd in de laagste milieu-impact.



Figuur 56: Milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie bij andere optie voor bouwknopen

A. Totaalrenovatie en gefaseerde renovatie met optie B

Mogelijkerwijze wordt er zowel bij de totaalrenovatie als bij de gefaseerde renovatie aandacht besteed aan de koudebrugarme uitvoering van bouwknopen, waardoor de bouwknopen in elk scenario EPB-aanvaard zijn. In dat geval wordt het verschil in milieu-impact tussen een totaalrenovatiescenario en een gefaseerd renovatiescenario kleiner. Bij de scenario's met een condensatieketel is deze evolutie verwaarloosbaar: het verschil in milieu-impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie wordt 5 Pt tot 12 Pt kleiner. Bij een renovatie met warmtepomp wordt het absolute verschil tussen de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie 134 Pt à 135 Pt kleiner.

B. Totaalrenovatie met optie B, gefaseerde renovatie met optie C

Uit de literatuurstudie kwam naar voren dat er aan een gefaseerde renovatie een groter risico op *lock-in* vasthangt. Het is dus waarschijnlijk dat de bouwknopen bij een gefaseerde renovatie thermisch niet even goed uitgevoerd worden dan de bouwknopen bij een totaalrenovatie. In dat geval wordt er voor de totaalrenovatiescenario's voor optie B gekozen, terwijl bij de gefaseerde renovatiescenario's de keuze voor optie C behouden blijft. Het verschil in milieu-impact tussen een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie met eenzelfde maatregelenpakket stijgt dan met 404 Pt tot 424 Pt of respectievelijk 32,5% en 26,3% wanneer er een condensatieketel gebruikt wordt. Voor de scenario's met een warmtepomp vergroot het verschil in milieu-impact met 130 Pt tot 137 Pt of respectievelijk 6,7% en 6,4%.

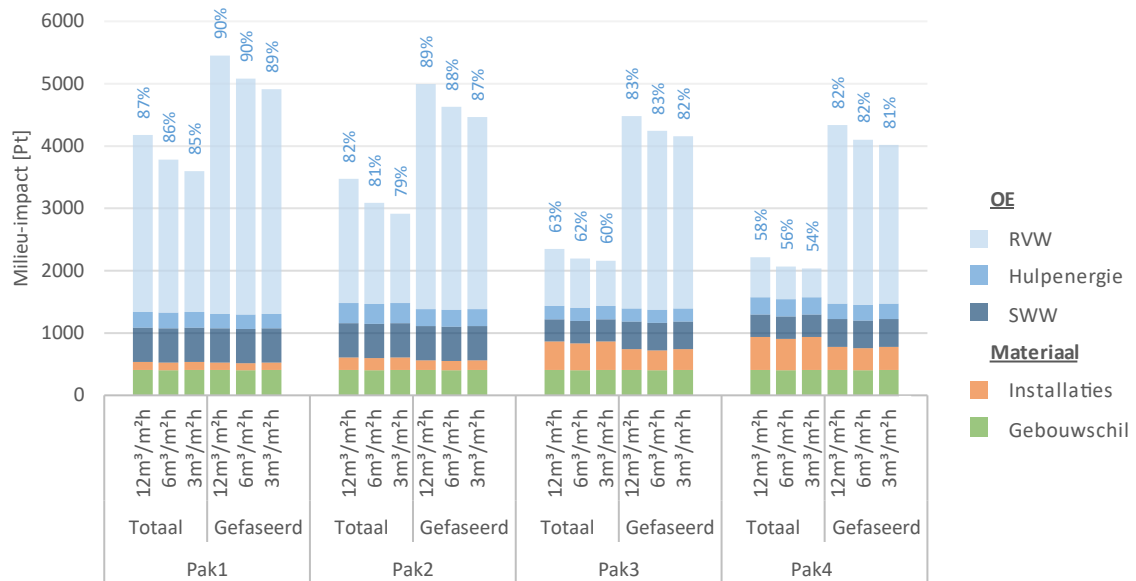
C. Conclusie

De algemene conclusies uit het hoofdonderzoek niet wijzigen indien de bouwknopen meer kwalitatief uitgevoerd zouden worden. Scenario's met een warmtepomp worden minder sterk beïnvloed door de uitvoering van de bouwknopen dan scenario's met een condensatieketel. Toch krijgen de scenario's met warmtepomp nog steeds de voorkeur vanuit milieu-oogpunt. Ongeacht de uitvoeringswijze van de bouwknopen blijft een totaalrenovatie resulteren in een lagere milieu-impact dan een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket. Indien er meer aandacht gaat naar de bouwknopen bij totaalrenovatie dan bij gefaseerde renovatie, wordt het verschil in milieu-impact enkel groter. Indien er bij beide renovatiestrategieën aandacht gaat naar de koudebrugvrije uitwerking van bouwknopen, wordt het absolute verschil in milieu-impact tussen de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie iets kleiner.

9.2 Luchtdichtheid

Ook de luchtdichtheid van de gebouwschil heeft een rechtstreekse invloed op het energiegebruik van het gebouw. Doorheen luchtlekken ontsnapt er namelijk lucht uit het gebouw (exfiltratie) en dringt buitenlucht het gebouw binnen (infiltratie). In de verwarmingsperiode moet die buitenlucht opnieuw opgewarmd worden, waardoor de warmtevraag groter wordt. In het hoofdonderzoek is aangenomen dat de lektheid na een renovatie daalt tot $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. In deze gevoeligheidsanalyse wordt er verondersteld dat het finale lekdebiet bij renovatie $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ of $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ is. Net zoals in sectie 9.1, wordt aangenomen dat de materiaalimpact onveranderd blijft. De milieu-impact voor de scenario's met een lekdebiet van $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ en $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ is weergegeven in Figuur 57. Het aandeel operationeel energiegebruik is opnieuw procentueel aangegeven boven elke kolom.

Ook hier wordt het energiegebruik voor zowel SWW als voor hulpenergie niet beïnvloed door een verandering in de aannames, het energiegebruik voor RVW wel: een daling van het lekdebiet tot $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ zorgt voor een daling van het energiegebruik voor RVW. Bij een totaalrenovatie is deze daling gelijk aan respectievelijk 192 Pt, 185 Pt, 62 Pt en 60 Pt bij gebruik van een condensatieketel met ventilatiesysteem C+ en D en met een lucht-water warmtepomp met ventilatiesysteem C+ en D. De invloed van de luchtdichtheid is kleiner op scenario's met een warmtepomp dan op scenario's met een condensatieketel. Bij een gefaseerde renovatie met een condensatieketel is de daling van het operationeel energiegebruik kleiner dan bij de overeenkomstige totaalrenovatie (179 Pt en 175 Pt), terwijl dit bij gefaseerde scenario's met een warmtepomp juist groter is (108 Pt en 106 Pt). Bij de gefaseerde scenario's met warmtepomp wordt er namelijk gedurende de eerste 27 jaar van de studieperiode nog gebruik gemaakt van een condensatieketel, die sterker afhankelijk is van de luchtdichtheid. Indien het finale lekdebiet gelijkgesteld wordt aan $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, stijgt het operationeel energiegebruik. De toename hiervan is dubbel zo groot als de daling die vastgesteld werd bij een verbetering van de luchtdichtheid van $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ tot $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.



Figuur 57: Milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie bij andere aanname voor finale luchtdichtheid

Net zoals in de gevoeligheidsanalyse van de bouwknopen wordt er naar twee mogelijke scenario's gekeken. In een eerste scenario wordt de mogelijkheid dat er zowel bij de totaalrenovatie als bij de gefaseerde renovatie meer of minder aandacht besteed wordt aan een luchtdichte afwerking in beschouwing genomen. De finale luchtdichtheid verandert dus, maar is wel gelijk voor de gefaseerde renovatie en de totaalrenovatie. In een tweede scenario wordt er verondersteld dat er, opnieuw omwille van het verhoogde risico op *lock-in* bij gefaseerde renovatie, een hogere luchtdichtheid behaald wordt in het totaalrenovatiescenario en een lagere in het gefaseerde renovatiescenario.

A. Finale luchtdichtheid blijft gelijk bij totaalrenovatie en gefaseerde renovatie

Indien er meer aandacht aan de luchtdichtheid geschonken wordt, kan het lekdebiet ook een waarde van 3 m³/m²h behalen. Dan daalt het operationeel energiegebruik in elk scenario zoals hierboven beschreven. De milieu-impact van de gefaseerde renovatie is dan 36,5%, 53,2%, 92,39% en 97,3% groter dan deze van het totaalrenovatiescenario met hetzelfde maatregelenpakket. Als er weinig of geen aandacht naar de luchtdichte afwerking gaat, of de luchtdichtheid wordt niet getest, wordt de waarde voor ontsteltenis van 12 m³/m²h aangenomen. In dat geval is de milieu-impact van de gefaseerde renovatie 30,5%, 43,7%, 90,9% en 95,6% groter dan de milieu-impact van het equivalente totaalrenovatiescenario.

In beide gevallen verandert de verhouding van de milieu-impact van een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie met eenzelfde maatregelenpakket amper. In de scenario's met een warmtepomp, verandert de verhouding met maximaal 1 procentpunt. In de scenario's met een condensatieketel, verandert de verhouding met maximaal 6 procentpunten in het voordeel van de gefaseerde renovatie (bij 12 m³/m²h) en met maximaal 3,8 procentpunten in het voordeel van de totaalrenovatie (bij 3 m³/m²h).

B. Luchtdichtheid bij totaalrenovatie is hoger dan deze bij gefaseerde renovatie

In dit deelonderzoek wordt uitgegaan van het meest extreme scenario, waarbij het verschil in luchtdichtheid zo groot mogelijk is. Bij totaalrenovatie wordt een finale luchtdichtheid van $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ verondersteld. Bij gefaseerde renovatie wordt een lekdebiet van $12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ aangenomen. Zoals hierboven beschreven, zal het operationeel energiegebruik bij de totaalrenovatie lager zijn dan bij de basisaannames uit het hoofdonderzoek en bij de gefaseerde renovatie net hoger. Bijgevolg zal de milieu-impact van de gefaseerde renovatie 51,6%, 71,3%, 107,4% en 113,0% groter zijn dan deze van de totaalrenovatie bij respectievelijk de scenario's met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+ en D en de scenario's met een lucht-water-warmtepomp en ventilatiesysteem C+ en D. Bij de scenario's met condensatieketel is dit verschil ongeveer 1,5 keer groter dan in het basisonderzoek. Voor de scenario's met warmtepomp is het verschil 1,17 keer groter dan in het basisonderzoek.

C. Conclusie

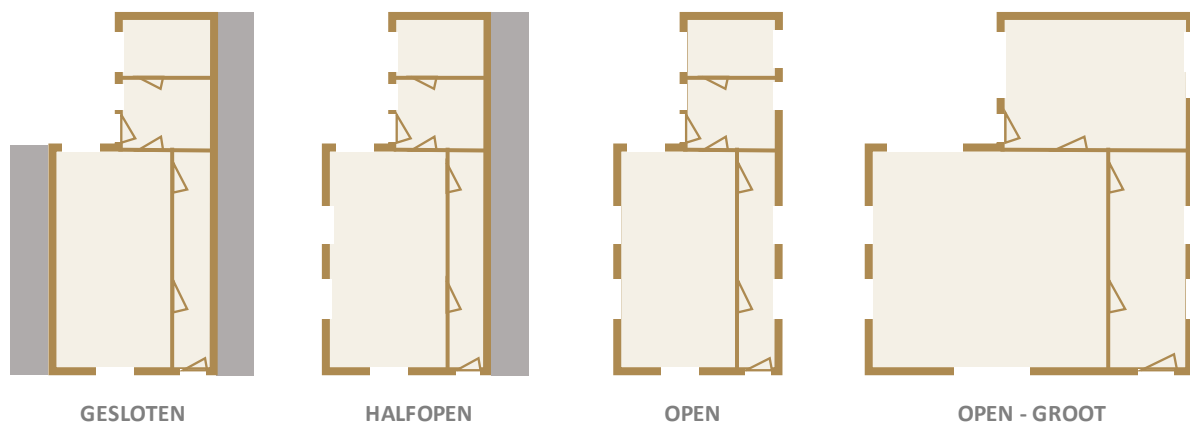
In deze gevoeligheidsanalyse werd aangetoond dat de keuze van de luchtdichtheid de gemaakte conclusies niet beïnvloedt. Zolang de finale luchtdichtheid gelijk is bij gefaseerde renovatie en totaalrenovatie, ongeacht of deze nu hoog of laag is, blijft de voorkeur voor totaalrenovatie even groot. Indien de luchtdichtheid bij totaalrenovatie beter is dan bij gefaseerde renovatie, wordt de voorkeur voor totaalrenovatie sterker. Mogelijk zal een gefaseerde renovatie met een performant maatregelenpakket en een goede uitvoeringsstrategie dan minder snel de voorkeur krijgen ten opzichte van een totaalrenovatie met een minder performant maatregelenpakket. Hieruit blijkt het belang om bij gefaseerde renovatie aandacht te besteden aan een luchtdichte uitvoering. Scenario's met een warmtepomp blijken minder beïnvloed te worden door een afwijking in de luchtdichtheid. Toch zal de warmtepomp altijd de voorkeur blijven krijgen, ook indien het lekdebiet daalt tot $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

9.3 Woningtypologie- en geometrie

De vergelijkende levenscyclusanalyse uit het hoofdonderzoek is uitgevoerd op een specifieke casestudy. Aangezien de materiaalimpact afhankelijk is van het totale gewicht van de gebruikte materialen en het operationeel energiegebruik sterk beïnvloed wordt door de oppervlaktes van de schildelen, is er een risico dat de bekomen resultaten specifiek gebonden zijn aan de casestudy. Daarom wordt aan de hand van drie variaties op de gebruikte casestudy nagegaan in welke mate de resultaten beïnvloed worden door de woningtypologie.

De beschouwde scenario's worden schematisch weergegeven in Figuur 58. Naast de originele casestudy met een bruto vloeroppervlakte van 107 m^2 en een beschermd volume van 399 m^3 , wordt ook een halfopen en een open bebouwing beschouwd met dezelfde geometrie, planopbouw en vloeroppervlakte. De gemene muren worden hierbij gedeeltelijk of volledig vervangen door gevel en

ramen. De oppervlakteverhouding raam/gevel blijft in elk scenario gelijk. Aangezien een open bebouwing in de regel een grotere bruto vloeroppervlakte heeft, wordt een tweede open bebouwing beschouwd. Deze wordt bekomen door alle breedtematen van de casestudy te verdubbelen. De diepte- en hoogtematen blijven gelijk. De derde variatie op de casestudy heeft dus een bruto vloeroppervlakte van 214 m² en een beschermd volume van 798 m³.



Figuur 58: Schematische voorstelling verschillende beschouwde woningtypologieën

De oppervlakte van elk van de schildelen is samengevat in Tabel 19. In deze masterproef is aangenomen dat de manier waarop de luchtdichtheid evolueert bij een gefaseerde renovatie, afhankelijk is van de evolutie van de gemiddelde U-waarde. Dit is erg projectafhankelijk en zal ook verschillen voor elk van de beschouwde woningtypologieën. De evolutie van de luchtdichtheid gedurende het renovatieproces wordt dus opnieuw bepaald volgens de methode uit sectie 5.2.3. De resultaten hiervan zijn te vinden in Tabel 20.

	Gesloten	Halfopen	Open	Open - groot
Hellend dak [m²]	46,8	46,8	46,8	93,6
Plat dak [m²]	12,0	12,0	12,0	24,0
Gevel [m²]	67,2	112,9	180,4	251,8
Gemene muur [m²]	133,2	79,3	0,0	0,0
Raam [m²]	12,6	20,6	32,5	45,0
Deur [m²]	4,23	4,23	4,23	4,23
Vloer op volle grond [m²]	47,0	47,0	47,0	94

Tabel 19: Overzicht oppervlaktes gebouwschil verschillende beschouwde woningtypologieën

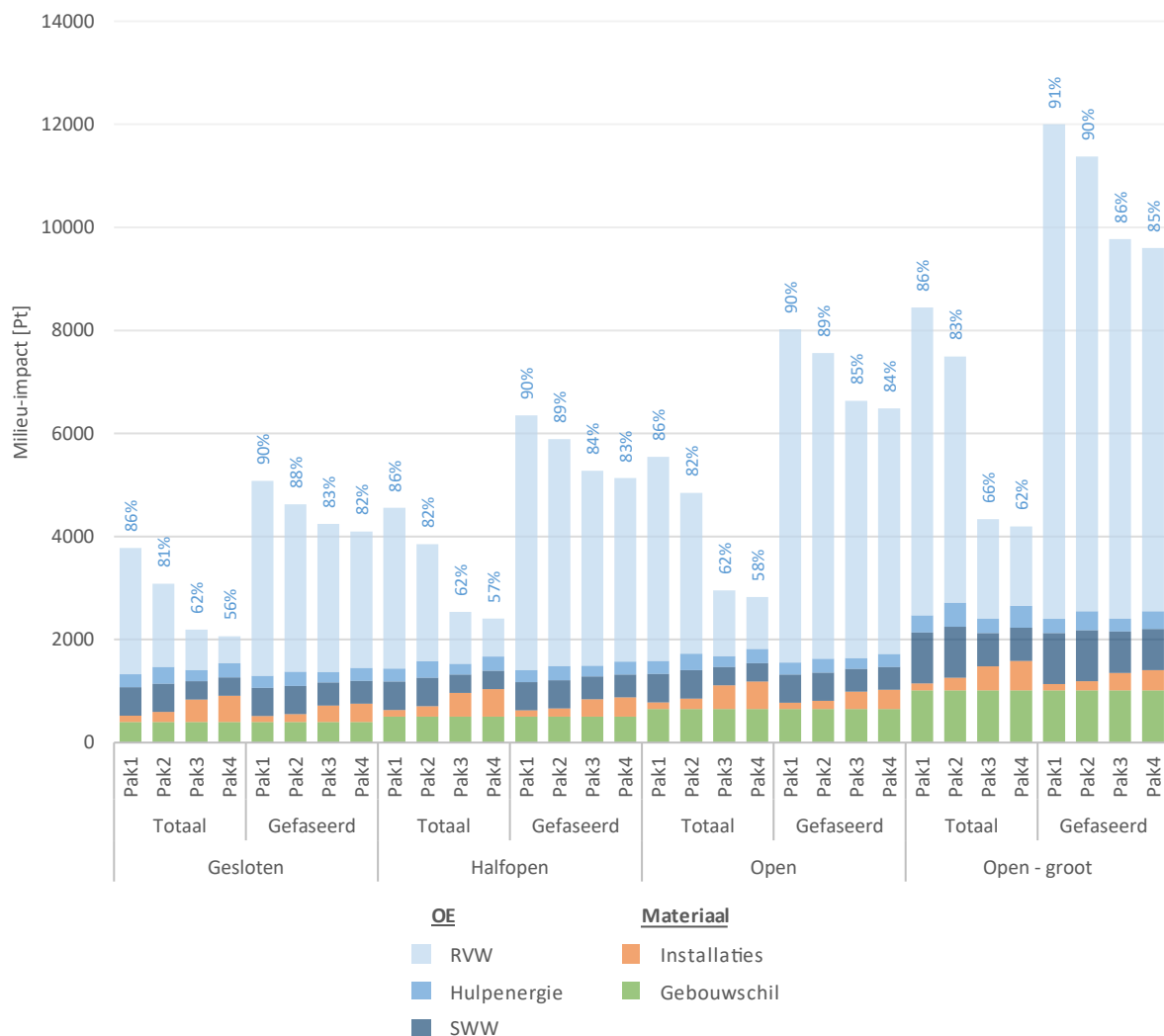
	Gesloten	Halfopen	Open	Open - groot
Hellend dak	-40%	-30%	-20%	-25%
Plat dak	0%	0%	-0%	-0%
Gevel	-40%	-50%	-55%	-50%
Schrijnwerk	-20%	-20%	-25%	-25%
Vloer op volle grond	0%	-0%	-0%	-0%

Tabel 20: Invloed renovatie schildelen op afname lekdebiet v_{50}

In eerste instantie wordt de milieu-impact voor de verschillende woningtypologieën en met de verschillende maatregelenpakketten berekend bij totaalrenovatie en bij een gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames uit sectie 5.4.2. Aangezien in sectie 7.1 vastgesteld werd dat de optimale renovatievolgorde vooral afhankelijk is van de reductie van de warmteverliezen die bekomen wordt bij de renovatie van een schildeel en deze reductie lineair afhankelijk is van de oppervlakte van het schildeel, wordt vervolgens nagegaan of er wijzigingen zijn in de optimale renovatievolgorde. Ten slotte wordt de milieu-impact van de gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames vergeleken met deze van de gefaseerde renovatie waarbij de optimale uitvoeringsvolgorde gehanteerd wordt.

A. Totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens basisaannames

In Figuur 59 wordt de milieu-impact voor totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames weergegeven voor de verschillende woningtypologieën. Het aandeel operationeel energiegebruik wordt procentueel weergegeven boven elke kolom.



Figuur 59: Vergelijking milieu-impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames voor verschillende beschouwde bouwtypologieën

Zowel de materiaalimpact als het operationeel energiegebruik verschillen in de beschouwde scenario's en stijgen ten opzichte van de casestudy uit het hoofdonderzoek.

De materiaalimpact van de gebouwschil neemt met respectievelijk 24,5%, 60,6% en 149,9% toe bij het scenario met de halfopen bebouwing, de open bebouwing met dezelfde afmetingen en de grotere open bebouwing ten opzichte van de casestudy rijwoning. Per vierkante meter bruto vloeroppervlakte neemt de materiaalimpact van de grote open bebouwing echter slechts met 25% toe, terwijl deze percentages dezelfde blijven voor de halfopen bebouwing en de open bebouwing met dezelfde oppervlakte. In de grote open bebouwing stijgt de materiaalimpact van de technische installaties licht: bij een totaalrenovatie is ze respectievelijk 6 Pt en 39 Pt hoger dan in de oorspronkelijke casestudy bij het gebruik van een ventilatiesysteem C+ en D. Bij de gefaseerde renovatie neemt de milieu-impact respectievelijk 3 Pt en 19 Pt toe. Dit is enkel te wijten aan het hogere gewicht van de ventilatie-unit, dat lineair verband houdt met het ventilatiedebiet (Bontridder, 2022), en de hogere impact van ventilatiekanalen en -roosters. Op basis van de ondervindingen van Spriet (2021) wordt verondersteld dat de materiaalimpact van de opwekkers voor RVW en SWW gelijk is voor alle beschouwde woningtypologieën, ongeacht de stijgende warmtevraag.

Het verschil in het energiegebruik voor RVW is duidelijk zichtbaar in de figuur. Dit is enerzijds afkomstig van de transmissieverliezen, die stijgen wanneer het verliesoppervlak toeneemt. Anderzijds zorgen de ventilatieverliezen, die bestaan uit de in- en exfiltratieverliezen en de hygiënische ventilatieverliezen, voor een grotere energievraag. De in- en exfiltratieverliezen stijgen lineair met een de warmteverliesoppervlakte. De hygiënische ventilatieverliezen zijn in realiteit afhankelijk van het ventilatiedebiet, maar in de EPB-software wordt dit ventilatiedebiet ingeschat op basis van het volume van de EPW-eenheid. De hygiënische ventilatieverliezen zullen dus groter zijn in de grote open bebouwing.

Het energiegebruik voor hulpenergie is hetzelfde in alle scenario's met hetzelfde volume. De ventilatiedebieten blijven namelijk gelijk, waardoor het vermogen van de ventilatoren niet wijzigt. Bovendien werd aangenomen dat de circulatiepompen in de verwarmingsinstallatie onveranderd blijven. Bij de grote open bebouwing zijn er grotere ventilatiedebieten nodig en zal het vermogen van de ventilator 85 W bedragen in plaats van 40 W in de andere scenario's. Hierdoor stijgt de hulpenergie met respectievelijk 72 Pt en 147 Pt in de totaalrenovatiescenario's met ventilatiesysteem C+ en D. Deze toename ligt tussen 28,5% en 52,6%.

In de bepaling van het energiegebruik voor SWW in de EPB-software speelt het volume van de woning een rol (Vlaamse Regering, 2010) Dit heeft als gevolg dat in de grotere woning het energiegebruik voor SWW 80% hoger ligt ten opzichte van de andere scenario's. Hierbij moet echter wel opgemerkt worden dat deze berekeningsmethode gestoeld is op de veronderstelling dat er in een grotere woning automatisch meer tappunten aanwezig zijn. Dit is niet altijd het geval. Een andere methode om het energiegebruik voor SWW te berekenen, zou op basis van het aantal aanwezige tappunten of het aantal personen zijn.

Bij elk van de beschouwde gebouwtypologieën stijgt de milieu-impact van het operationeel energiegebruik procentueel iets sterker dan de materiaalimpact van de gebouwschil en de technische installaties. Het aandeel aan operationeel energiegebruik stijgt dus licht. In de woningen met dezelfde vloeroppervlakte blijft deze stijging beperkt tot 3 procentpunten. In de grotere open bebouwing stijgt het aandeel operationeel energiegebruik met maximaal 7 procentpunten.

Zoals weergegeven in onderstaande tabel, is de verhouding van de milieu-impact van een totaalrenovatie ten opzichte van een gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames voor alle beschouwde gebouwtypologieën groter dan bij de gesloten bebouwing. De voorkeur voor totaalrenovatie lijkt dus sterker bij deze gebouwtypologieën. Dit kan verklaard worden omdat het operationeel energiegebruik meer doorweegt bij deze gebouwtypologieën, maar mogelijk is ook de uitvoeringsvolgorde uit de basisaannames minder optimaal.

	Gesloten	Halfopen	Open	Open - groot
Pak1	34,4%	39,5%	44,6%	42,1%
Pak2	49,7%	53,0%	56,0%	51,8%
Pak3	91,8%	108,0%	124,3%	125,5%
Pak4	96,7%	113,4%	129,6%	128,7%

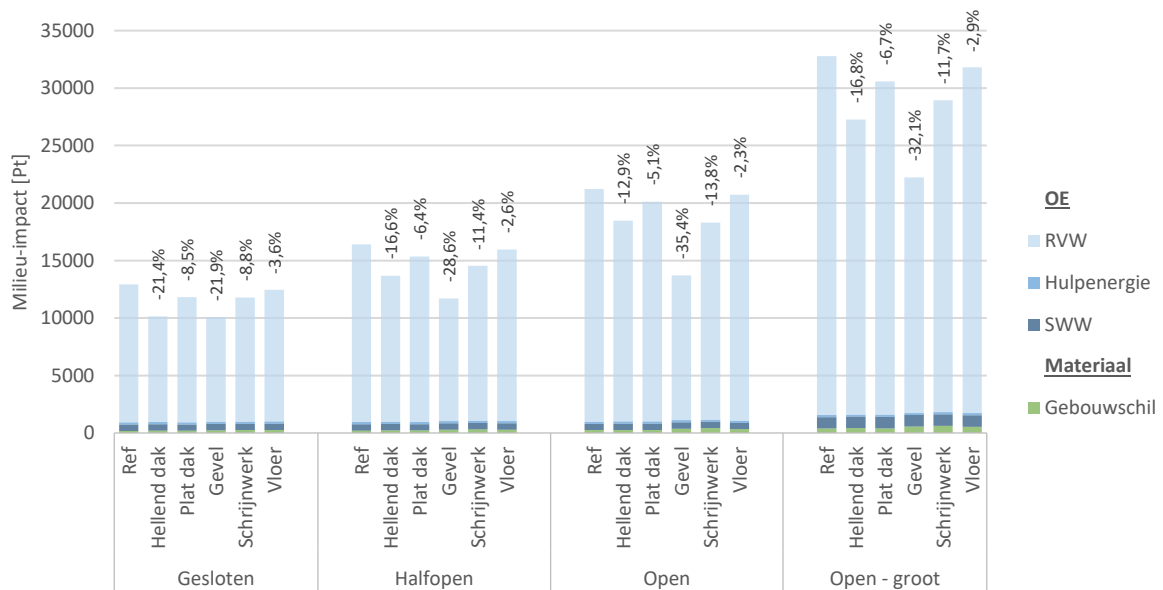
Tabel 21: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de verschillende beschouwde gebouwtypologieën

B. Analyse van de optimale renovatievolgorde

In Figuur 60 wordt de optimale uitvoeringsvolgorde van de renovatie van de gebouwschil bepaald op dezelfde manier als beschreven in sectie 7.1.1. Zo kan achterhaald worden of de grotere milieu-impact van de gefaseerde renovatie ten opzichte van de totaalrenovatie te wijten is aan een minder goede basisvolgorde voor de beschouwde gebouwtypologieën. De reductie in milieu-impact die een renovatiemaatregel met zich meebrengt over een periode van 60 jaar, is procentueel aangegeven boven elke kolom. Zoals reeds opgemerkt is in sectie 7.1.1 bestaat er een lineair verband tussen de oppervlakte van elk van de schildelen en de reductie van de milieu-impact die behaald kan worden door deze schildelen te isoleren.

De volgorde die als meest optimale uit de vergelijking naar voren komt, is dezelfde voor de gesloten bebouwing, de halfopen bebouwing en de grote open bebouwing. Gezien de grotere invloed van de gevel en de kleinere invloed van het hellend dak op de reductie van de milieu-impact zal de uitvoeringsvolgorde van beide maatregelen echter niet meer omgewisseld worden om praktische redenen. In de gewone open bebouwing blijkt de vervanging van de ramen een grotere invloed te hebben op de milieu-impact dan het hellend dak. In een optimaal renovatiescenario zullen de ramen dus vervangen worden voordat het dak na-geïsoleerd wordt.

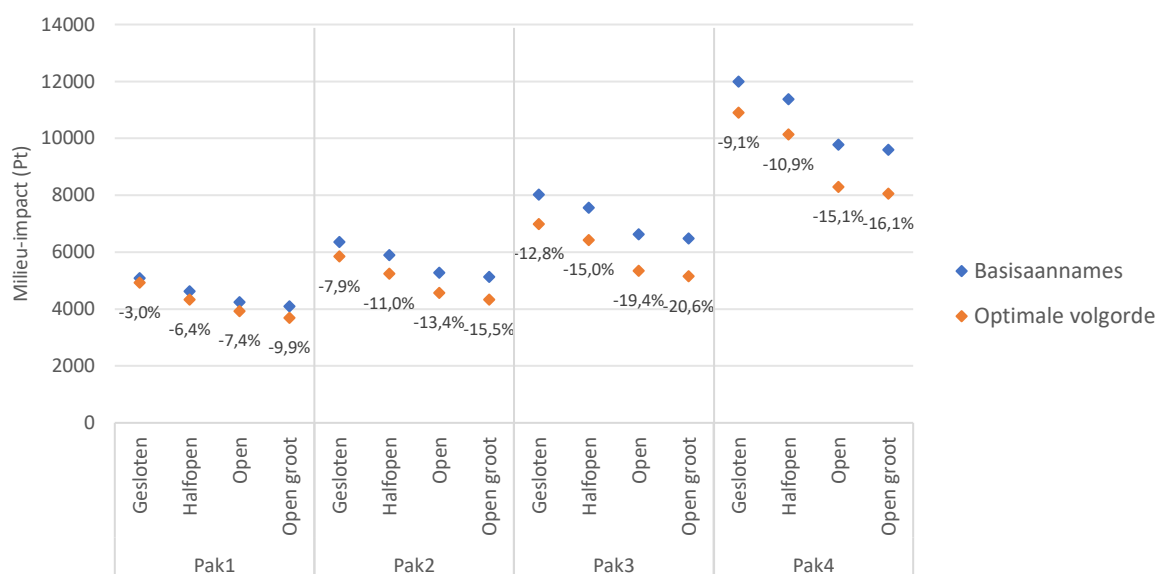
Aangezien de positieve invloed van de vervanging van de ramen groter wordt, wijzigt het optimale moment voor de implementatie van het ventilatiesysteem D bij beide vrijstaande woningen. Hier zou het ventilatiesysteem D idealiter pas geïnstalleerd worden nadat het schrijnwerk vervangen is.



Figuur 60: Vergelijkende analyse optimale renovatievolgorde van de gebouwschil voor de beschouwde bouwtypologieën

C. Gefaseerde renovatie, uitgevoerd volgens optimale volgorde en volgens basisaannames

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is de totale milieu-impact weergegeven voor de gefaseerde renovatie van elk van de maatregelenpakketten en de bouwtypologieën waarbij de renovatiemaatregelen volgens de basisaannames uitgevoerd werden en waarbij ze in de optimale volgorde uitgevoerd werden. De percentages duiden telkens het verschil in milieu-impact.



Figuur 61: Vergelijking totale milieu-impact gefaseerde renovatie waarvan renovatiemaatregelen volgens basisaannames uitgevoerd zijn en waarvan ze in de optimale volgorde uitgevoerd zijn

Opvallend is dat dit procentuele verschil voor elk maatregelenpakket het kleinste is bij de casestudy uit het hoofdonderzoek. Net zoals in sectie 7.1 opgemerkt werd, is het verschil in milieu-impact het kleinste in de scenario's met de minst energie-efficiënte technische installaties. Er kan dus besloten worden dat de basisaannames voor gefaseerde renovatie niet alleen meer geschikt zijn voor scenario's met minder performante technische installaties. Ze zijn ook meer geschikt voor een rijwoning dan voor een open of halfopen bebouwing.

Ten slotte is de toename van de milieu-impact van een gefaseerde renovatie waarbij de renovatiemaatregelen in de optimale volgorde geïmplementeerd werden ten opzichte van een totaalrenovatie weergegeven in Tabel 22. De procentuele verschillen tussen de verschillende gebouwtypologieën zijn relatief klein. Voor de halfopen bebouwing, de open bebouwing en de grote open bebouwing wordt de voorkeur voor totaalrenovatie telkens sterker indien er gewerkt wordt met een warmtepomp. De voorkeur wordt minder sterk in de scenario's met een condensatieketel.

	Gesloten	Halfopen	Open	Open - groot
Pak1	30,3%	28,4%	26,1%	29,2%
Pak2	40,1%	36,2%	32,6%	35,3%
Pak3	77,7%	80,2%	80,9%	91,5%
Pak4	77,4%	80,3%	82,3%	91,9%

Tabel 22: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt op basis van de optimale uitvoeringsvolgorde ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de verschillende gebouwtypologieën

D. Conclusie

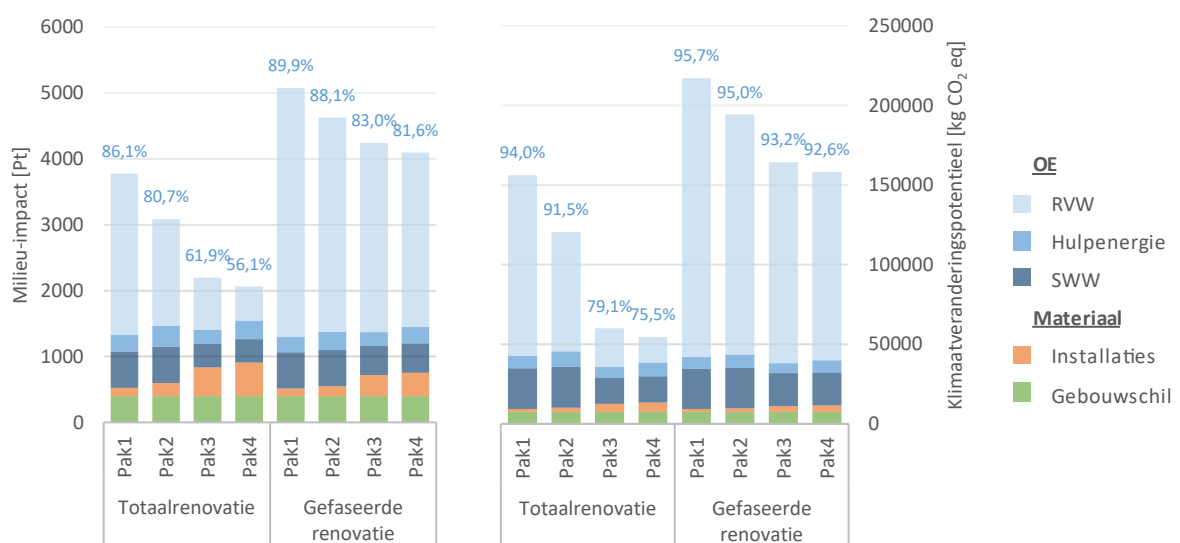
Er kan geconcludeerd worden dat zowel de materiaalimpact als de milieu-impact van het operationeel energiegebruik sterk bepaald worden door de warmteverliesoppervlakte van de gebouwschil. Hoe minder compact een gebouw met eenzelfde vloeroppervlakte en volume, hoe groter de milieu-impact ervan zal zijn. Vervolgens is ook bevestigd dat de optimale renovatievolgorde sterk afhankelijk is van de oppervlakte van elk van de gebouwschildelen. Bij de gesloten bebouwing blijken de basisaannames voor de uitvoering van een gefaseerde renovatie dichter aan te leunen tegen het optimum dan bij de halfopen of open bebouwingen.

9.4 Milieu-impact vs. klimaatveranderingspotentieel

Zoals in sectie 0 aangetoond is, is het belangrijk om verschillende impactindicatoren te beschouwen bij het beoordelen van de milieu-impact van een gebouw of van verschillende renovatiemaatregelen. Daarom is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de effectenbeoordelingsmethode 'ReCiPe 2016'. Zoals beschreven werd in deel 4.2.3, beschouwt deze methode de impact van 18 impactcategorieën op het milieu en combineert deze tot een enkele score die uitgedrukt wordt in milieupunten. Eén van de grootste uitdagingen van vandaag en tevens de reden waarom de energetische renovatie van

gebouwen gepromoot wordt, is echter de klimaatopwarming. Daarom wordt in deze gevoeligheidsanalyse de impact van de verschillende renovatiescenario's op de opwarming van de aarde berekend. Het klimaatveranderingspotentieel wordt dus als impactindicator beschouwd. Dit is één van de 18 middelpuntindicatoren die beschouwd worden in de ReCiPe 2016-methode. De impact op de klimaatopwarming is afhankelijk van de uitstoot van broeikasgassen en wordt uitgedrukt in kilogram CO₂-equivalenten.

In Figuur 62 wordt de impact van de totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames weergegeven in milieupunten (links) en in kilogram CO₂-equivalenten (rechts). Het aandeel van de impact van het operationeel energiegebruik wordt procentueel boven elke kolom weergegeven.



Figuur 62: Vergelijking totaalrenovatie en gefaseerde renovatie aan de hand van milieu-impact (milieupunten) en aan de hand van klimaatveranderingspotentieel (kg CO₂ eq)

A. Operationeel energiegebruik ten opzichte van materiaalimpact

Wanneer het klimaatveranderingspotentieel geanalyseerd wordt, weegt het operationeel energiegebruik zwaarder door. De impact van de materialen wordt kleiner. Bij een totaalrenovatie is het operationeel energiegebruik goed voor tussen de 75,5% en 94,0% van de totale uitstoot van broeikasgassen. Bij een gefaseerde renovatie is dit tussen 92,6% en 95,7%. Indien er afgegaan wordt op de meer holistische milieu-impact op basis van de enkele score uit de ReCiPe 2016-methode, zal men besluiten dat het aandeel van het operationeel energiegebruik tussen 55,3% en 85,9% ligt voor een totaalrenovatie en tussen 81,1% en 89,7% voor een gefaseerde renovatie. Het aandeel operationeel energiegebruik is bij beide meetmethodes het grootste voor de maatregelenpakketten met een condensatieketel en het kleinste indien er met een warmtepomp gewerkt wordt.

B. Technische installaties vs. gebouwschil

Het wordt ook duidelijk dat het aandeel van de technische installaties binnen de totale materiaalimpact kleiner is wanneer het klimaatveranderingspotentieel beschouwd wordt in plaats

van de totale milieu-impact. Een warmtepomp zorgt voor een uitstoot van broeikasgassen die 39% kleiner is dan deze die te wijten is aan de volledige gebouwschil. Uitgedrukt in milieupunten is de impact van een warmtepomp echter 7% groter dan deze van de volledige gebouwschil. De CO₂-equivalente uitstoot van een condensatieketel is een vijfde van deze van de volledige gebouwschil, terwijl de impact van de condensatieketel uitgedrukt in milieupunten iets meer dan een vierde van de impact van de gebouwschil bedraagt. De verhouding van de materiaalimpact van een warmtepomp ten opzichte van deze van een condensatieketel verschilt bij beide beoordelingsmethodes: de impact van de warmtepomp is respectievelijk drie en vier keer groter dan deze van de condensatieketel wanneer de impact uitgedrukt wordt in kilogram CO₂-equivalenten en in milieupunten.

C. Vergelijking van de impact van verschillende maatregelenpakketten

Ten eerste is de materiaalimpact van de technische installaties verhoudingsgewijs kleiner wanneer het klimaatveranderingspotentieel beschouwd wordt en is ook de impact van een warmtepomp relatief gezien minder groot ten opzichte van deze van een condensatieketel. Bovendien is ook de relatieve uitstoot van broeikasgassen bij de productie van elektriciteit ten opzichte van gas lager dan wanneer de impact ervan in milieupunten uitgedrukt wordt. Wanneer ze in milieupunten begroot wordt, is de impact van 1 kWh verbruikte elektriciteit namelijk gelijk aan 5,15 MJ gas, terwijl dit in CO₂-equivalenten gelijk is aan de uitstoot van 3,45 MJ gas. Bijgevolg wordt het verschil tussen een renovatiescenario met een condensatieketel en één met een warmtepomp groter en zijn de scenario's met een warmtepomp nog aantrekkelijker.

Net zoals in het hoofdonderzoek, krijgen de scenario's met een warmtepomp altijd de voorkeur ten opzichte van de scenario's met een condensatieketel. De scenario's met een ventilatiesysteem D krijgen nog steeds de voorkeur boven de scenario's met een ventilatiesysteem C+ en dezelfde opwekker voor RWV en SWW.

D. Vergelijking impact totaalrenovatie en gefaseerde renovatie

Ook de verhouding van een totaalrenovatie ten opzichte van een gefaseerde renovatie verandert wanneer men de impact begroot in kilogram CO₂-equivalenten. Zoals weergegeven in Tabel 23 is de impact van de gefaseerde renovatie ten opzichte van deze van de totaalrenovatie groter wanneer er gekeken wordt naar het klimaatveranderingspotentieel. Wanneer gelijke maatregelenpakketten met elkaar vergeleken worden, zal de voorkeur voor totaalrenovatie dus sterker worden. Dit verschil is relatief klein voor scenario's met een condensatieketel (4,6 tot 11,4 procentpunten), maar wel aanzienlijk voor scenario's met een warmtepomp (82,4 tot 93,0 procentpunten).

Wanneer nagegaan wordt of een gefaseerde renovatie een lagere milieu-impact kan hebben dan een totaalrenovatiescenario met een ander maatregelenpakket, blijkt dat het klimaatveranderingspotentieel van de gefaseerde renovatie met warmtepomp en ventilatiesysteem D die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames slechts 1,3% hoger is dan het

klimateveranderingspotentieel van een totaalrenovatie met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+. Wanneer diezelfde vergelijking gedaan wordt op vlak van milieu-impact, is er een verschil van 8,8%. Op basis van het klimateveranderingspotentieel krijgt een gefaseerde renovatie met een warmtepomp dus sneller de voorkeur boven een totaalrenovatie met een condensatieketel.

	Toename impact gefaseerde renovatie ten opzichte van totaalrenovatie	
	Milieu-impact [Pt]	Klimateveranderingspotentieel [kg CO ₂ eq]
Pak1	34,4%	39,0%
Pak2	49,7%	61,1%
Pak3	91,8%	174,2%
Pak4	96,7%	189,7%

Tabel 23: Toename impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie op basis van milieu-impact en klimateveranderingspotentieel

E. Conclusie

Er kan worden besloten dat er wel degelijk enkele conclusies veranderen wanneer de CO₂ intensiteit beschouwd wordt in plaats van de milieu-impact. Het aandeel operationeel energiegebruik weegt sterker door en de impact van elektriciteit wordt kleiner dan deze van gas. Bijgevolg krijgen de scenario's met een warmtepomp nog sterker de voorkeur boven scenario's met een condensatieketel en komt de totaalrenovatie nog beter uit de vergelijking wanneer een totaalrenovatie vergeleken wordt met een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket. Dit is vooral geldig voor de scenario's met een warmtepomp. Een andere conclusie is dat gefaseerde renovatiescenario's met een warmtepomp al snel verkozen zullen worden boven totaalrenovatiescenario's met een condensatieketel en ventilatiesysteem C+.

9.5 Invloed van de elektriciteitsmix

In deze masterproef wordt het proces *Electricity, low voltage {BE} market for / Cut-off, S* gebruikt om de milieu-impact van de Belgische elektriciteitsmix in te schatten. Er is aangenomen dat deze mix niet verandert doorheen de studieperiode. Omwille van de kernuitstap en de transitie naar hernieuwbare energiebronnen zal de elektriciteitsmix en dus ook de milieu-impact van elektriciteit de komende jaren waarschijnlijk wel sterk veranderen. Uit het onderzoek van Roose (2022) blijkt dat de milieu-impact van de Belgische energiemix eerst zal stijgen als gevolg van de kernuitstap en het plan om tijdelijk in de elektriciteitsproductie te voorzien met gascentrales. Enkele jaren later zou de milieu-impact opnieuw dalen door de toename in hernieuwbare energie. Het dynamisch modelleren

van de Belgische elektriciteitsmix valt buiten de scope van deze masterproef. Er zal echter wel worden nagegaan wat de impact van een meer vervuilende elektriciteitsmix en van een groenere elektriciteitsmix is. De meer vervuilende mix wordt gemodelleerd als de Deense elektriciteitsmix en voor de groenere mix wordt de Noorse situatie gebruikt. De milieu-impact van elke elektriciteitsmix wordt weergegeven in Tabel 24. Het moet benadrukt worden dat deze mixen slechts gekozen zijn ter illustratie van het effect van een groenere en een meer vervuilende elektriciteitsmix. Deze zijn niet verbonden aan specifieke voorspellingen over de Belgische mix. In het verdere verloop van deze analyse zullen de verschillen niet in kwantitatieve, maar eerder in kwalitatieve termen besproken worden.

	Milieu-impact elektriciteit (mPt/kWh)
Standaard elektriciteitsmix (België)	8,02
Groene elektriciteitsmix (Noorwegen)	2,54
Vervuilende elektriciteitsmix (Denemarken)	12,75

Tabel 24: Milieu-impact gebruikte elektriciteitsmixen

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is de totale milieu-impact weergegeven voor de totaalrenovatie en de gefaseerde renovatie met de verschillende beschouwde renovatiepakketten waarbij de Belgische, de Noorse en de Deense elektriciteitsmix gebruikt zijn. De invloed van de veranderende energiemix op de productie-impact van de materialen is hierbij niet beschouwd. Uit het onderzoek van Roose (2022) blijkt namelijk dat dit slechts een klein verschil oplevert ten opzichte van de situatie waarbij de dynamische elektriciteitsmix enkel in module B6 geïmplementeerd is.



Figuur 63: Vergelijking totale milieu-impact in totaalrenovatie en gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames bij de standaard elektriciteitsmix, een groenere en een meer vervuilende elektriciteitsmix.

Zoals te zien is in de figuur, is de invloed van de elektriciteitsmix in de scenario's met een condensatieketel eerder beperkt. Dit kan verklaard worden doordat enkel de hulpenergie op basis van elektriciteit is, het energiegebruik voor SWW en RVW zijn op basis van gas. De invloed van de elektriciteitsmix is van groter belang in de scenario's met een warmtepomp: hier wordt elektriciteit gebruikt voor alle onderdelen van het operationeel energiegebruik.

Het verschil in milieu-impact tussen de scenario's met warmtepomp en met condensatieketel wordt dus groter bij een groene energiemix. In de scenario's met warmtepomp, lijkt de voorkeur voor een ventilatiesysteem D ten opzichte van ventilatiesysteem C+ te verdwijnen. De milieu-impact voor RVW met een warmtepomp wordt in dit geval zodanig laag, dat de extra verwarmingsvraag bij een ventilatiesysteem C+ gecompenseerd wordt door het lagere energiegebruik door de ventilatoren en de lagere materiaalimpact van het ventilatiesysteem. Bij de basisaannames voor gefaseerde renovatie blijft een totaalrenovatie echter in elk geval te verkiezen boven een gefaseerde renovatie, ongeacht het maatregelenpakket.

Bij een meer vervuilende energiemix, wordt het verschil in milieu-impact tussen de scenario's met warmtepomp en met condensatieketel kleiner. Bij gefaseerde renovatie lijkt het verschil in milieu-impact tussen het scenario met condensatieketel en ventilatiesysteem D en het scenario met warmtepomp en ventilatiesysteem C+ zelfs verwaarloosbaar klein te worden.

In Tabel 25 is de toename van de milieu-impact bij een gefaseerde renovatie ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie weergegeven. Ook hier blijkt duidelijk dat de scenario's met een condensatieketel slechts weinig beïnvloed worden door de energiemix, de scenario's met een warmtepomp veel meer. Bij een meer vervuilende energiemix zal de gefaseerde renovatie aantrekkelijker worden. Uiteraard zal de gefaseerde renovatie nog altijd een hogere milieu-impact hebben dan de overeenkomstige totaalrenovatie. Bij een groenere energiemix neemt de voorkeur voor een totaalrenovatie toe, bij een meer vervuilende mix neemt ze af.

	Vervuilende elektriciteitsmix	Standaard elektriciteitsmix	Groene elektriciteitsmix
Pak1	32,2%	34,4%	35,9%
Pak2	45,8%	49,7%	54,3%
Pak3	58,8%	91,8%	127,5%
Pak4	66,4%	96,7%	124,2%

Tabel 25: Toename milieu-impact bij gefaseerde renovatie die uitgevoerd wordt volgens de basisaannames ten opzichte van de overeenkomstige totaalrenovatie voor de Belgische, een meer vervuilende en een groenere elektriciteitsmix.

Conclusie

Aan de hand van dit deelonderzoek kunnen de bemerkingen van Delem et al. (2020) bevestigd worden: bij een meer vervuilende energiemix wordt een warmtepomp minder aantrekkelijk. Uit de beschouwde scenario's blijkt dat een gefaseerde renovatie met een condensatieketel mogelijk even

aantrekkelijk wordt. De keuze van het ventilatiesysteem wordt, zeker in combinatie met een warmtepomp, belangrijker. De voorkeur voor totaalrenovatie wordt kleiner, vooral in de scenario's met een warmtepomp. Bij een groenere energiemix worden de scenario's met een warmtepomp aantrekkelijker. Bij deze scenario's wordt de keuze van het ventilatiesysteem onbelangrijk. Wanneer gefaseerde renovatie vergeleken wordt met totaalrenovatie met hetzelfde maatregelenpakket, wordt de voorkeur voor totaalrenovatie sterker, vooral bij de scenario's met een warmtepomp.

9.6 Overige factoren

Andere onzekerheden die inherent aanwezig zijn in dit onderzoek, zijn de volgende: de aanwezige materialen in de casestudy, de selectie aan onderzochte levenscyclusfasen, de milieu-impact uit de ecoinvent databank, de levensduur van de materialen, het eventuele extra materiaalgebruik en het operationeel energiegebruik. Deze worden hieronder kort toegelicht.

Er is verondersteld dat de gebouwschildelen van de casestudy niet geïsoleerd zijn en dat ze een courante constructieopbouw hebben. Hoewel de aanwezige materialen in een reële rijwoning waarschijnlijk afwijken van deze uit de theoretische casestudy, heeft dit geen significante invloed op de betrouwbaarheid van de resultaten. De focus van het onderzoek ligt namelijk op het ontwikkelen van een methodologisch kader en het verkennen van de relatie in milieu-impact tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie. Zoals in sectie 9.3 onderzocht werd, kan een afwijkende woningtypologie wel een invloed hebben op de resultaten.

Ook is ervoor gekozen om de milieu-impact van het gebruik, onderhoud, herstel en operationeel watergebruik niet mee te nemen in de analyse. Uit de literatuurstudie is namelijk gebleken dat deze levenscyclusfasen ook in andere LCA-studies frequent verwaarloosd worden. Verschillende redenen liggen hieraan ten grondslag, waaronder de beperkte bijdrage ervan aan de totale milieu-impact en het gebrek aan beschikbare gegevens. Waarschijnlijk zal deze methodologische keuze de betrouwbaarheid van het onderzoek niet sterk beïnvloeden.

Niet alleen enkele levenscyclusfasen zijn verwaarloosd, ook het eventuele extra materiaalgebruik dat nodig is voor het koudebrugvrij uitvoeren van de bouwknoepen, voor het luchtdicht afwerken van de gebouwschil of voor het uitwerken van tijdelijke aansluitingen, is niet meegenomen in dit onderzoek. In alle waarschijnlijkheid is de milieu-impact hiervan ten opzichte van de totale milieu-impact zeer beperkt, bovendien zou het er enkel voor zorgen dat het verschil in milieu-impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie groter wordt. De conclusies worden waarschijnlijk niet sterk beïnvloed door deze vereenvoudiging.

De ecoinvent databank is gebruikt om de milieu-impact van de verschillende processen en materialen te bepalen. Ook hier is echter een factor van onzekerheid op te merken. Bij de selectie van de processen en materialen, is ernaar gestreefd om zo nauwkeurig mogelijke keuzes te maken op

basis van de beschikbare geografische gegevens. De voorkeur gaat hierbij uit naar Belgische processen, maar deze zijn vaak niet beschikbaar, waardoor er regelmatig geopteerd is voor Europese of Zwitserse processen. In de gevallen waarin deze ook niet beschikbaar zijn, is gekozen voor processen op basis van gemiddelde waarden op wereldschaal. Dergelijke gemiddelde processen brengen uiteraard een verminderde betrouwbaarheid met zich mee. Bovendien zijn niet alle installaties beschikbaar in de ecoinvent databank. De gascondensatieketel is daarom gemodelleerd aan de hand van een olieketel, voor de lucht/water-warmtepomp is een grond/water-warmtepomp gebruikt en de ventilatie-unit van systeem C+ is ingegeven op basis van de ventilatie-unit voor systeem D. De onderzoeken van Spriet (2021) en Bontridder (2022) hebben uitgewezen dat de data voor de technische installaties verouderd is en dat de gewichten ervan overschat worden. Om de milieu-impact van de technische installaties beter te laten aansluiten bij de realiteit, werd de milieu-impact uit SimaPro verschaald op basis van gemiddelde gewichten van reële technische installaties. Hierin schuilt echter wel de aanname dat het gewicht van alle onderdelen recht evenredig schaalt met het totale gewicht van de installatie. Ook dit is een onzekerheid in het onderzoek.

De levensduur van materialen is vastgelegd aan de hand van een theoretische aanname. De reële levensduur is echter niet altijd gelijk aan deze theoretische aanname, ze is afhankelijk van verschillende invloedfactoren zoals materiaaleigenschappen, het binnen- en buitenklimaat, het ontwerp, de uitvoering, het gebruik en het onderhoud van de materialen. Bijgevolg kan het tijdstip van vervanging en het aantal vervangingen tijdens de studieperiode afwijken van het theoretische model. Dit kan leiden tot verschillen in het aantal vervangingen tussen gefaseerde en totaalrenovaties. Zoals werd vastgesteld bij de milieu-impact van de technische installaties, heeft dit slechts een beperkte invloed op de totale milieu-impact.

Het operationeel energiegebruik voor RVW, hulpenergie en SWW is berekend met behulp van de EPB-software. Deze software gaat ervan uit dat de volledige woning verwarmd wordt tot een temperatuur van 18°C. Waar de EPB-software geen rekening mee houdt, is het feit dat de werkelijke binnentemperatuur sterk afhankelijk is van het gebruikersgedrag en de isolatiegraad van de woning (Hens et al., 2010; Lambie et al., 2017). Ook worden er nog andere aannames gedaan die niet noodzakelijk overeenkomen met de realiteit, zoals de inschatting van het ventilatiedebiet op basis van het volume van de woning en de invloed van het beschermd volume op de bepaling van het energiegebruik voor SWW. Door deze aannames in de software kunnen er belangrijke verschillen optreden tussen het berekende operationeel energiegebruik en het werkelijke energiegebruik. Aangezien het operationeel energiegebruik zorgt voor een aanzienlijk aandeel in de totale milieu-impact, kan dit de resultaten beïnvloeden. Zo is de milieu-impact bij een gefaseerde renovatie mogelijks kleiner dan de berekeningen laten uitschijnen, want in een minder goed geïsoleerde situatie wordt er vaak minder verwarmd en de woning zal langer minder goed geïsoleerd blijven indien er gefaseerd gerenoveerd wordt. Indien dit het geval is, wordt de voorkeur voor totaalrenovatie minder sterk.

Een gefaseerde renovatie is een ingewikkeld proces, waarbij heel wat verschillende keuzes gemaakt kunnen worden in een reële situatie. In deze masterproef is een vereenvoudigd model vooropgesteld waarbij de planning van de gefaseerde renovatie bepaald wordt aan de hand van drie variabelen en waarbij de vervanging van elementen die aan het begin van de studieperiode het einde van hun levensduur bereikt hebben, mogelijks uitgesteld kunnen worden tot het moment waarop de renovatie van het schildeel gepland is. Het is echter goed mogelijk dat hier in een reële situatie van afgeweken wordt. Ook dit vormt een onzekerheid in het beschouwde model voor gefaseerde renovatie.

10 Besluit

10.1 Besluit

Deze masterproef onderzocht de relatie tussen de milieu-impact van een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie van een eengezinswoning. Om de studie duidelijk af te bakenen, werden er een aantal onderzoeksvragen geformuleerd. In welke levenscyclusfasen verschilt de milieu-impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie? Hoe wordt de milieu-impact een totaalrenovatie en een gefaseerde renovatie beïnvloed door de beschouwde renovatiemaatregelen? In welke mate beïnvloedt de planning van de gefaseerde renovatie de milieu-impact? Geeft het behaalde energieprestatieniveau een indicatie van de grootte van de milieu-impact?

De literatuurstudie bestond uit twee delen (hoofdstuk 2 en 3), waarin verschillende aspecten werden onderzocht. Het eerste deel focuste op het verschil tussen gefaseerde renovatie en totaalrenovatie, waarbij werd geconstateerd dat de keuze tussen beide strategieën vaak niet wordt gemaakt op basis van milieu-impact, maar eerder op basis van financiële en andere praktische overwegingen. Ook werden er factoren geïdentificeerd die de milieu-impact van gefaseerde renovatie kunnen beïnvloeden. In het tweede deel van de literatuurstudie werden vijf LCA-studies die verschillende totaalrenovatiescenario's vergelijken, geanalyseerd. Aan de hand van deze studies werd nagegaan wat er kan worden geleerd over de efficiëntie van verschillende renovatiemaatregelen op vlak van milieu-impact. De inzichten uit de literatuurstudie werden in hoofdstuk 4 gebruikt om een LCA-methodologie op te stellen waarmee een totaalrenovatie op een eerlijke manier vergeleken kan worden met een gefaseerde renovatie. Vervolgens werd de methodologie uitgetest op een theoretische casestudy: een niet-geïsoleerde standaard rijwoning waarvan verondersteld werd dat de gebouwschildelen een courante constructieopbouw hebben. Deze casestudy werd, samen met de beschouwde pakketten van renovatiemaatregelen in hoofdstuk 5 beschreven. Voor de planning van de gefaseerde renovatie werd een vereenvoudigd model voorgesteld waarbij de planning bepaald werd aan de hand van drie variabelen: de uitvoeringsvolgorde, het aantal renovatiestappen en de periode tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiestappen.

De resultaten van het LCA-onderzoek kwamen in hoofdstukken 6 en 7 aan bod. In hoofdstuk 6 werd uitgegaan van een basisaanname voor de planning van een gefaseerde renovatie en werd voor een eerste keer de milieu-impact van de verschillende renovatiescenario's berekend. Het verschil in milieu-impact tussen totaalrenovatie en gefaseerde renovatie bleek in hoofdzaak te wijten aan het hogere gefaseerde energiegebruik bij gefaseerde renovatie. Dit effect is inherent verbonden aan de gefaseerde renovatiestrategie, waardoor besloten is dat een totaalrenovatie die aan het begin van de studieperiode uitgevoerd wordt altijd tot een lagere milieu-impact zal leiden dan een gefaseerde renovatie met hetzelfde maatregelenpakket. Ook werd ondervonden dat het verschil in milieu-

impact tussen een gefaseerde renovatie en een totaalrenovatie groter werd wanneer er meer energie-efficiënte renovatiemaatregelen gebruikt worden. In hoofdstuk 7 werd de invloed van de planning van de gefaseerde renovatie onderzocht door telkens één van de variabelen te laten afwijken van de basisaannames die in hoofdstuk 6 gehanteerd werden. De sleutel tot een lage milieu-impact bleek logischerwijs te zitten in het zo snel mogelijk laten dalen van het operationeel energiegebruik. Bijgevolg was de mogelijke positieve invloed op de milieu-impact van het samennemen van renovatiemaatregelen in enkele stappen groter dan deze van het optimaliseren van de uitvoeringsvolgorde. Ook het inkorten van de termijn tussen de uitvoering van opeenvolgende renovatiemaatregelen zorgde voor een beduidend lagere milieu-impact. Indien verschillende variabelen tegelijk afwijken van de basisaannames, beïnvloeden ze elkaar. Opmerkelijk was dat de invloed van de renovatieplanning lineair groter wordt wanneer de periode tussen de uitvoering van renovatiemaatregelen stijgt. Wanneer de planning van de gefaseerde renovatie op een positieve manier afweek van de basisaannames, bleek een gefaseerde renovatie met een warmtepomp in verschillende situaties te leiden tot een lagere milieu-impact dan een totaalrenovatie met een condensatieketel.

In hoofdstuk 8 werden de resultaten uit de vorige hoofdstukken in context geplaatst. In een eerste deel werd er naar de praktijk gekeken, waarbij opgemerkt werd dat de voorkeur voor een totaalrenovatie of een gefaseerde renovatie niet enkel afhankelijk is van de milieu-impact, maar ook van externe factoren die aangehaald werden in hoofdstuk 2. Op basis van de mogelijkheden die in een realistisch scenario op tafel liggen, kan door middel van een LCA-analyse wel gekozen worden voor de renovatie die tot de laagste milieu-impact zal leiden en kan de renovatieplanning geoptimaliseerd worden. Vervolgens werd de behaalde milieu-impact van de scenario's uit hoofdstukken 6 en 7 gelinkt aan het behaalde E-peil. Hieruit bleek dat de stelling "de milieu-impact daalt over het algemeen bij een dalend E-peil" (Bontridder, 2022; Delem et al., 2020) genuanceerd moet worden: dit geldt enkel indien scenario's met een gelijkaardige renovatieplanning met elkaar vergeleken worden. Het energieprestatieniveau alleen is dus geen optimale maatstaf om tot de renovatie met de laagste milieu-impact te komen. Zeker indien een gefaseerde renovatie overwogen wordt, is een aanvullende LCA-studie aangewezen om de milieu-impact te minimaliseren.

Ten slotte werden in hoofdstuk 9 vijf methodologische aannames uit het onderzoek gewijzigd om de robuustheid van de resultaten te testen en werden ook de onzekerheden die inherent aanwezig zijn in dit LCA-onderzoek besproken. In het onderzoek werd geprobeerd om een werkelijke situatie zo goed mogelijk na te bootsen, maar het kan zijn dat bepaalde aannames ervoor zorgen dat de reële impact afwijkt van de theoretische resultaten. Ook moet er geconcludeerd worden dat de resultaten gebonden zijn aan de gekozen casestudy.

10.2 Toekomstig onderzoek

Tijdens de literatuurstudie werd duidelijk dat er nog geen LCA-onderzoeken focussen op een vergelijking van totaalrenovatie en gefaseerde renovatie. In deze masterproef is een eerste stap gezet om dit gat in de literatuur te dichten, maar zoals in elk beginnend onderzoek, is er ook hier nog verdieping wenselijk. Aangezien er in dit onderzoek slechts een beperkt aantal combinaties aan renovatiemaatregelen bestudeerd werden, lijkt aangewezen om in volgend onderzoek met een ruimer pakket aan mogelijke renovatiemaatregelen rekening te houden. Zo kan er bij een renovatie bijvoorbeeld ook gebruik gemaakt worden van een grond/water- of lucht/lucht-warmtepomp, PV-panelen, zonnecollectoren en een andere isolatiegraad. Uit deze studie bleek bovendien dat de milieu-impact van een gefaseerde renovatie sterk afhankelijk is van de planning ervan. Het zou dus nuttig zijn om op een meer gedetailleerde manier de invloed van de planning van gefaseerde renovatie op de milieu-impact te begroten. Gezien het belang van een goede planning bij een gefaseerde renovatie en de afhankelijk van de resultaten van de gebouwtypologie, kan een verdere analyse van verschillende woningtypes, groottes en oriëntaties het mogelijk maken om meer consistente conclusies te trekken. Het projectafhankelijke karakter van een (gefaseerde) woningrenovatie valt echter niet te ontkennen. Een mooi eindpunt van verder onderzoek zou bijgevolg een digitale tool zijn waarmee voor reële gebouwen de milieu-impact van een gefaseerde- of totaalrenovatiestrategie nagegaan kan worden. Dit zou een krachtig hulpmiddel zijn voor de verschillende instanties die renovatieadvies bieden aan bouwheren en bouwprofessionals.

Bibliografie

- Albrecht, J., & Hamels, S. (2021). The financial barrier for renovation investments towards a carbon neutral building stock – An assessment for the Flemish region in Belgium. *Energy and Buildings*, 248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111177>
- Allacker, K. (2010). *Sustainable Building: The Development of an Evaluation Method*. K.U. Leuven.
- Bontridder, L. (2022). *Het belang van technische installaties in een vergelijkende levenscyclusanalyse tussen renovatie en herbouw van een eengezinswoning* [Master thesis, Universiteit Gent]. lib.ugent.be
- BPIE. (2021). *Deep renovation: Shifting from exception to standard practice in EU policy*.
- Bureau voor Normalisatie. (1991). *NBN D 50-001 : Ventilatievoorzieningen in woongebouwen*.
- Bureau voor Normalisatie. (2012a). *NBN EN 15804: Duurzaamheid van bouwwerken - Milieuverklaringen voor producten - Basisregels voor de productgroep bouwproducten*.
- Bureau voor Normalisatie. (2012b). *NBN EN 15978: Duurzaamheid van constructies - Beoordeling van milieuprestaties van gebouwen - Rekenmethode*.
- Delem, L., Janssen, A., Vrijders, J., & Wastiels, L. (2020). *The impact of materials needed for renovation and new housing*.
- Departement Omgeving Vlaanderen. (2019). *Positie uitstoot broeikasgassen huishoudens Vlaanderen in Europa*. <https://omgeving.vlaanderen.be/nl/positie-uitstoot-broeikasgassen-huishoudens-vlaanderen-in-europa>
- Dodoo, A., Gustavsson, L., & Tettey, U. Y. A. (2013). Primary energy and carbon dioxide implications of low-energy renovation of a Swedish apartment building. *Passivhus Norden*, 270–282.
- EPB-pedia. (z.d.). *EPB-eisen bij bouwaanvraag/melding in 2023 en 2024*. Geraadpleegd 27 mei 2023, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/epb-plichtig-toepassing-en-eisen/epb-eisentabellen-per-aanvraagjaar/epb-eisen-bij-bouwaanvraag-melding-in-2023-en-2024>
- Europese Commissie. (2019). *Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU - Final report*. <https://doi.org/10.2833/14675>
- Eurostat. (2022). *Housing in Europe – 2022 interactive edition*.
- Fawcett, T. (2014). Exploring the time dimension of low carbon retrofit: owner-occupied housing. *Building Research & Information*, 42(4), 477–488. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.804769>

- FOD Economie. (2021). *Analyse van het energieverbruik van huishoudens in België in 2020*.
- Hens, H., Parijs, W., & Deurinck, M. (2010). Energy consumption for heating and rebound effects. *Energy and Buildings*, 42(1), 105–110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.017>
- Huijbregts, M. (2016). *ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization*. RIVM Report 2016-0104. National Institute for Public Health and the Environment.
- International Organisation for Standardisation. (2006). *ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*.
- International Organization for Standardisation. (2006). *ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- Kertsmik, K.-A., Kuusk, K., Lylykangas, K., & Kalamees, T. (2023). Evaluation of renovation strategies: cost-optimal, CO_{2e} optimal, or total energy optimal? *Energy and Buildings*, 287, 112995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112995>
- Klimaat.be. (2021). *Uitstoot van broeikasgassen: de uitstoot in de belangrijkste sectoren*. <https://klimaat.be/in-belgie/klimaat-en-uitstoot/uitstoot-van-broeikasgassen/uitstoot-per-sector>
- Klimaat.be. (2022). *Internationaal en Europees klimaatbeleid*.
- Lambie, E., Senave, M., Van de Vyver, I., & Saelens, D. (2017). Experimental analysis of indoor temperature of residential buildings as an input for building simulation tools. *Energy Procedia*, 132, 123–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.657>
- Liebsch, T. (2023). *Levenscyclusanalyse (LCA) – Een Volledig Overzicht voor Beginners*. ecochain. <https://ecochain.com/nl/knowledge/levenscyclusanalyse-life-cycle-assessment-lca-complete-beginners-guide/>
- Maia, I., Kranzl, L., & Müller, A. (2021). New step-by-step retrofitting model for delivering optimum timing. *Applied Energy*, 290, 116714. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116714>
- mijnbenovatie.be. (z.d.). *Leer BENOveren in 5 stappen. Volg jouw ideale BENOvatietraject!* Vlaamse Overheid.
- Mirabella, N., Röck, M., Ruschi Mendes Saade, M., Spirinckx, C., Bosmans, M., Allacker, K., & Passer, A. (2018). Strategies to Improve the Energy Performance of Buildings: A Review of Their Life Cycle Impact. *Buildings*, 8(8), 105. <https://doi.org/10.3390/buildings8080105>

- Negishi, K., Lebert, A., Almeida, D., Chevalier, J., & Tiruta-Barna, L. (2019). Evaluating climate change pathways through a building's lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment. *Building and Environment*, *164*, 106377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106377>
- Obrecht, T. P., Jordan, S., Legat, A., Ruschi Mendes Saade, M., & Passer, A. (2021). An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment. *Journal of Cleaner Production*, *327*, 129527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129527>
- OVAM. (2012). *Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouwen*.
- OVAM. (2018). *Environmental profile of building elements [update 2017]*.
- Passer, A., Ouellet-Plamondon, C., Kenneally, P., John, V., & Habert, G. (2016). The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings. *Energy and Buildings*, *124*, 153–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.008>
- Ramírez-Villegas, R., Eriksson, O., & Olofsson, T. (2019). Life Cycle Assessment of Building Renovation Measures–Trade-off between Building Materials and Energy. *Energies*, *12*(3). <https://doi.org/10.3390/en12030344>
- Ramon, D., Allacker, K., Trigaux, D., Wouters, H., & van Lipzig, N. P. M. (2023). Dynamic modelling of operational energy use in a building LCA: A case study of a Belgian office building. *Energy and Buildings*, *278*, 112634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112634>
- RenoFase. (2017). *Stappenplan voor een kwaliteitsvolle, efficiënte renovatie*. www.renofase.be.
- Roose, U. (2022). *De dynamische levenscyclusanalyse: de impact van de energiemix* [Master thesis, Universiteit Gent]. lib.ugent.be
- Saheb, Y. (2018). Energy-efficient buildings: Why MEPs should ban the staged renovation approach. In *Euractiv*. <https://www.bpie.eu/publication/deep-renovation-shifting-from-exception-to-standard-practice-in-eu-policy/>
- SBR. (2011). *Levensduur van bouwproducten, praktijkwaarden*.
- Spriet, I. (2021). *Milieu-impact van ruimteverwarming en warmwateropwekking in eengezinswoningen* [Master thesis, Universiteit Gent]. lib.ugent.be
- Statbel. (2022). *Kadastrale statistiek van het gebouwenpark, België en gewesten, gebouwen en woongelegenheden*. <https://statbel.fgov.be/nl/themas/bouwen-wonen/gebouwenpark#panel-12>
- Su, S., Li, X., Zhu, Y., & Lin, B. (2017). Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. *Energy and Buildings*, *149*, 310–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042>

- Thibodeau, C., Bataille, A., & Sié, M. (2019). Building rehabilitation life cycle assessment methodology–state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *103*, 408–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.037>
- TOTEM. (2020). *Levensduren in TOTEM*.
- United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- Van de moortel, E., Allacker, K., De Troyer, F., Schoofs, E., & Stijnen, L. (2022). Dynamic Versus Static Life Cycle Assessment of Energy Renovation for Residential Buildings. *Sustainability*, *14*(11). <https://doi.org/10.3390/su14116838>
- Van den Broeck, K. (2019). *Drempels voor renovatie aan de vraagzijde*. Steunpunt Wonen.
- Vastmans, F., & Buyst, E. (2019). *Drempels voor renovatie aan de aanbodzijde*. Steunpunt Wonen.
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy and Buildings*, *135*, 286–301. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- Vlaamse Regering. (2010). *Energiebesluit - Bijlage V: Bepalingsmethode van het peil van primair energiegebruik van residentiële eenheden*.
- Vlaamse Regering. (2019). *Vlaamse Klimaatstrategie 2050*. VR 2019 2012 DOC.1356/2
- Vlaamse Regering. (2020). *Vlaamse langetermijnrenovatiestrategie voor gebouwen 2050*. VR 2020 2905 DOC.0517/4BIS
- Vlaamse Regering. (2022). *Besluit van de Vlaamse Regering tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne, het Energiebesluit van 19 november 2010 en het besluit van de Vlaamse Regering van 27 november 2015 tot uitvoering van het decreet van 25 april 2014 betreffende de omgevingsvergunning, wat betreft diverse bepalingen inzake de energie-efficiëntie en hernieuwbare energie*. VR 2022 2502 DOC.0205/2BIS
- Vlaanderen.be. (z.d.-a). *Renovatieverplichting voor residentiële gebouwen*.
- Vlaanderen.be. (z.d.-b). *Stappenplan naar duurzame verwarming van uw woning*.
- Vrijders, J., & Wastiels, L. (2013). Nearly Zero Energy Renovation of houses: Life cycle costs and environmental impact. *SB13 Sustainable Building Conference*.

Wilson, C., Crane, L., & Chryssochoidis, G. (2015). Why do homeowners renovate energy efficiently? Contrasting perspectives and implications for policy. *Energy Research & Social Science*, 7, 12–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.03.002>

WTCB. (2000). *TV215: Het platte dak. Opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud.*

WTCB. (2013). *Rapport nr. 14 - Ontwerp en dimensionering van centrale-verwarmingsinstallaties met warm water.*

WTCB. (2015). *TV 255: Luchtdichtheid van gebouwen.*

WTCB. (2016). *Prioriteiten van de uit te voeren werken.*

Bijlagen

A	Inventaris materialen productie- en constructiefase.....	ii
B	Inventaris processen eindelevensduur.....	iv
C	Scenario's voor transport van bouwmaterialen (OVAM).....	viii
D	Afvalverwerkingsscenario's voor de 37 beschouwde afvalcategorieën in MMG (OVAM)	x
E	Milieu-impact van de gebruikte materialen	xii
F	Dimensionering van de technische installaties	xv
G	Operationeel energiegebruik.....	xviii
H	Verdeling materiaalimpact over levenscyclusfasen voor de beschouwde gefaseerde renovatiescenario's.....	xix

A Inventaris materialen productie- en constructiefase

Gebouwschil

Materiaal	Proces in SimaPro	Transportcategorie	Levensduur [jaar]	Densiteit [kg/m³]
Afwerkingspleister	Cover plaster, mineral {CH} production Cut-off, S	Finishing products: plasters	40	1300
Bitumen	Bitumen seal {RER} production Cut-off, S	Loose products	60	1050
Buitendeur: aluminium/hout	Door, outer, wood-aluminium {RER} production Cut-off, S	Finishing products: cabinet work	40	-
Dekvloer	Cement cast plaster floor {CH} production Cut-off, S	Bulk materials for structural work	60	1700
Dubbel glas	Glazing, double, U<1.1 W/m2K {RER} production Cut-off, S	Finishing products: cabinet work	30	2500
Eikenhouten planken	Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {RER} production Cut-off, S	Finishing products: floor coverings	60	700
Eikenhouten raamkader	Window frame, wood, U=1.5 W/m2K {RER} production Cut-off, S	Finishing products: cabinet work	40	-
Enkel glas	Flat glass, uncoated {RER} production Cut-off, S	Finishing products: cabinet work	60	2500
EPDM	Synthetic rubber {RER} production Cut-off, S	Loose products	30	920
Gipskartonplaat	Gypsum plasterboard {CH} production Cut-off, S	Loose products	30	1100
Gipspleister	Base plaster {CH} production Cut-off, S	Finishing products: plasters	40	1300
Glasvezel wapeningsnet	Glass fibre {RER} production Cut-off, S	Finishing products: plasters	40	2000
Grondpleister	Base plaster {CH} production Cut-off, S	Finishing products: plasters	40	1300
Houten balk	Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {RER} production Cut-off, S	Loose products	60	700
Isolatieplugs	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, S	Loose products	40	950
Keramische dakpan	Roof tile {RER} production Cut-off, S	Loose products	60	2000
Lijmmortel	Adhesive mortar {CH} production Cut-off, S	Bulk materials for structural work	40	1900
Minerale wol	Stone wool {CH} stone wool production Cut-off, S	Insulation	75	40
Minerale wol Drukvast	Stone wool {CH} stone wool production Cut-off, S	Insulation	60	120
Minerale wol ETICS	Stone wool {CH} stone wool production Cut-off, S	Insulation	40	40
Onderdak	Plywood, for outdoor use {RER} market for Cut-off, S	Loose products	30	950
OSB	Oriented strand board {RER} production Cut-off, S	Loose products	60	680
Panlatten	Sawnwood, softwood, dried (u=10%), planed {RER} production Cut-off, S	Loose products	30	480
PE-folie	Packaging film, low density polyethylene {RER} production Cut-off, S	Loose products	40	920

Tengellatten	Sawnwood, softwood, dried (u=10%), planed {RER} production Cut-off, S	Loose products	30	480
Wapeningsstaal	Reinforcing steel {RER} production Cut-off, S	Loose products	60	7850

Technische installaties

Ruimteverwarming en sanitair warm water

Materiaal	Proces in SimaPro	Transport-categorie	Levensduur [jaar]	Gewicht [kg/eenheid]	Eenheid
Buffervat	Hot water tank, 600l {CH} production Cut-off, U	Installations	20	69,6	Stuk
Expansievat	Expansion vessel, 25l {CH} production Cut-off, S	Installations	20	1,9	Stuk
Gascondensatieketel	Oil boiler, 10 kW {CH} market for Cut-off, U	Installations	20	38,6	Stuk
Schouw	Polypropylene, granulate {RER} production Cut-off, U	Installations	20	55,1	Stuk
Warmtepomp	Heat pump, brine-water, 10kW {CH} production Cut-off, U	Installations	20	119,3	Stuk

Ventilatie

Materiaal	Proces in SimaPro	Transport-categorie	Levensduur [jaar]	Gewicht [kg/eenheid]	Eenheid
Afvoerventiel	Exhaust air valve, in-wall housing, plastic/steel, DN 125 {CH} production Cut-off, S	Installations	25	0,54	Stuk
Luchtfilter	Air filter, in exhaust air valve {RoW} production Cut-off, S	Installations	1	0,08	Stuk
Toe/afvoerkanaal 100mm	Flexible duct, aluminium/PET, DN of 125 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,16	m
Toe/afvoerkanaal 125mm	Flexible duct, aluminium/PET, DN of 125 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,2	m
Toe/afvoerkanaal 150mm	Flexible duct, aluminium/PET, DN of 125 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,24	m
Toe/afvoerkanaal 75mm	Flexible duct, aluminium/PET, DN of 125 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,12	m
Toe/afvoerrooster (mechanisch)	Exhaust air outlet, steel/aluminium, 85x365 mm {RoW} production Cut-off, S	Installations	25	2,75	Stuk
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Alu	Aluminium alloy, AlMg3 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,6	m
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Polystyreen	Polystyrene, high impact {RER} production Cut-off, S	Installations	25	0,08	m
Toevoerventiel	Supply air inlet, steel/SS, DN 75 {RER} production Cut-off, S	Installations	25	2,42	Stuk
Ventilatie-unit Systeem C+	Blower and heat exchange unit, central, 600-1200 m3/h {RER} production Cut-off, S	Installations	15	4,05	Stuk
Ventilatie-unit Systeem D	Blower and heat exchange unit, central, 600-1200 m3/h {RER} production Cut-off, S	Installations	15	27,67	Stuk

B Inventaris processen eindelevensduur

Gebouwschil

Materiaal	Materiaal onderdelen	Landfill: proces in SimaPro	Incineration: proces in SimaPro	kg/m ²
Afwerkingspleister		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Aluminium-houten buitendeur	Aluminium	Waste aluminium {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration Cut-off, S	2,85
	Cement-mortel	Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	50
	Verf	Waste paint {CH} treatment of, inert material landfill Cut-off, S	Waste paint {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,262
	Papier	Waste graphical paper {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste graphical paper {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,172
	Plastic	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,114
	Rubber	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, S	0,312
	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S	10,911
	Hout	Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	24,3
Bitumen		Waste bitumen {Europe without Switzerland} treatment of waste bitumen, sanitary landfill Cut-off, S	Waste bitumen sheet {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Dekvloer		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Dubbel glas	Aluminium	Waste aluminium {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration Cut-off, S	1,618
	Glas	Waste glass {CH} treatment of, inert material landfill Cut-off, S	Waste glass {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	18,012
	Geen afval	/	/	0,024
	Rubber	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, S	0,448

Eikenhouten planken		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Eikenhouten raamkader	Aluminium	Waste aluminium {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration Cut-off, S	3,005
	Koper	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Scrap copper {Europe without Switzerland} treatment of scrap copper, municipal incineration Cut-off, S	0,006
	Verf	Waste paint {CH} treatment of, inert material landfill Cut-off, S	Waste paint {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	5,23
	Plastic	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,349
	Polyethylene	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,257
	Rubber	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, S	1,14
	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S	4,93
	Hout	Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	65,2
	Zink	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Zinc in car shredder residue {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	0,29
Enkel glas		Waste glass {CH} treatment of, inert material landfill Cut-off, S	Waste glass {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
EPDM		Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste rubber, unspecified {Europe without Switzerland} treatment of waste rubber, unspecified, municipal incineration Cut-off, S	
Gipskartonplaat		Waste gypsum {Europe without Switzerland} market for waste gypsum Cut-off, U	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Gipspleister		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Glasvezel wapeningsnet		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Grondpleister		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Houten balk		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Isolatieplugs		Waste polypropylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polypropylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	

Keramische dakpan		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Lijmmortel		Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Minerale wol		Waste mineral wool, for final disposal {Europe without Switzerland} treatment of waste mineral wool, inert material landfill Cut-off, S	Municipal solid waste {BE} treatment of, incineration Cut-off, S	
Onderdak		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
OSB		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Panlatten		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
PE-folie		Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
PUR		Waste polyurethane {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyurethane {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Tengellatten		Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste wood, untreated {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S	
Wapeningsstaal		Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S	

Technische installaties

Ruimteverwarming en sanitair warm water

Materiaal	Materiaal onderdelen	Landfill: proces in SimaPro	Incineration: proces in SimaPro
Buffervat	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Expansievat	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Gascondensatie-ketel	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Schouw	Polyethyleen	Waste polypropylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polypropylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Warmtepomp	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S

Ventilatie

Materiaal	Materiaal onderdelen	Landfill: proces in SimaPro	Incineration: proces in SimaPro
Afvoerventiel	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Luchtfilter	Polyethyleen	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerkanaal 100mm	Polyethyleen	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerkanaal 125mm	Polyethyleen	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerkanaal 150mm	Polyethyleen	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerkanaal 75mm	Polyethyleen	Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerrooster (mechanisch)	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Alu	Aluminium	Waste aluminium {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration Cut-off, S
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Polystyreen	Polystyreen	Waste polystyrene {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, S	Waste polystyrene {CH} treatment of, municipal incineration Cut-off, S
Toevoerventiel	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S
Ventilatie-unit	Staal	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, S	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration Cut-off, S

C Scenario's voor transport van bouwmaterialen (OVAM)

Transport van fabriek naar werf

Transport category	Transport route		Means of transport from							Average transport distance from		
			Factory to site			Factory to supplier	Supplier to site			Factory to site [km]	Factory to supplier [km]	Supplier to site [km]
			Lorry 16-32 ton (EURO 5)	Lorry 7,5-16 ton (EURO 5)	Lorry 3,5-7,5 ton (EURO 5)		Lorry 16-32 ton (EURO 5)	Lorry 7,5-16 ton (EURO 5)	Lorry 3,5-7,5 ton (EURO 5)			
Bulk materials for structural work (e.g. cement, sand, gravel,...)	75%	25%	100%	0%	0%	100%	90%	10%	0%	100	100	35
Poured concrete	100%	0%	100%	0%	0%					100	100	35
Prefabricated products for structural work (e.g. beams, columns,...)	100%	0%	100%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	100	100	35
Loose products (e.g. blocks, bricks, roof tiles, plasterboard,...)	40%	60%	100%	0%	0%	100%	85%	15%	0%	100	100	35
Insulation	40%	60%	100%	0%	0%	100%	85%	15%	0%	100	100	35
Finishing products: floor coverings (e.g. carpet, linoleum, ceramic tiles,...)	10%	90%	90%	10%	0%	100%	90%	10%	0%	100	100	35

Finishing products: plasters (e.g. gypsum plaster, external plaster,...)	40%	60%	50%	50%	0%	100%	50%	50%	0%	100	100	35
Finishing products: cabinet work (e.g. window frames, stairs,...)	90%	10%	50%	45%	5%	100%	40%	50%	10%	100	100	35
Finishing products: paints and varnishes	10%	90%	0%	100%	0%	100%	0%	80%	20%	100	100	35
Installations (e.g. heating boiler, radiators, ventilation,...)	0%	100%				100%	0%	80%	20%	100	100	35

Transport van werf tot afvalverwerking

Means of transport	Average transport distance from		
	Demolition site to sorting facility or collection point	Sorting facility or collection point to landfill	Sorting facility or collection facility to incinerator
Lorry 16-32 ton (EURO 5)			
100%	30	50	100

D Afvalverwerkingsscenario's voor de 37 beschouwde afvalcategorieën in MMG (OVAM)

Main category	Waste category	Landfill [%]	Incineration [%]	Reuse [%]	Recycling [%]	Sorted on building site [%]
Stony & glass	Bricks, roof tiles	5	0	0	95	75
	Bulk materials (e.g. sand, gravel, expanded clay grains)	5	0	95	0	90
	Concrete	5	0	0	95	75
	Flat glass	5	0	0	95	70
	Other stony waste (e.g. tiles, natural stone, slates, sand-lime blocks)	5	0	0	95	75
	Porcelain and ceramics (e.g. toilet, bath, washbasin)	15	0	0	85	75
Wood	Chemically treated, impregnated (e.g. railway sleepers, wood used for carports, outdoor playsets, garden screens)	0	100	0	0	40
	Composite products (e.g. fibreboards, veneer, laminate)	0	95	0	5	40
	Surface treated, solid (e.g. painted or varnished)	0	85	0	15	40
	Untreated, uncontaminated (e.g. roofs, structures, formworks, auxiliary timber)	0	25	0	75	40
Metals	Iron, steel, non-ferro (copper, brass, aluminium, lead, zinc, tin)	5	0	0	95	85
Packaging	EPS packaging	10	30	0	60	50
	Pallets	0	40	20	40	50
	Paper and cardboard packaging	0	5	0	95	50
	Plastic films packaging	5	60	0	35	50
Insulation materials	Mineral insulation materials (e.g. stone wool, glass wool)	50	50	0	0	0
	Organic insulation materials (e.g. vegetable fibres, cellulose, sheep wool, cork)	5	95	0	0	0
	Synthetic insulation materials (e.g. polyurethane, polyisocyanurate, extruded polystyrene, phenolic foam, expanded polystyrene)	5	95	0	0	0
Fibre cement products	Fibre cement products (e.g. fibre cement slabs or slates)	100	0	0	0	75
Gypsum elements	Gypsum elements (e.g. gypsum blocks, gypsum boards)	80	0	0	20	50

Aerated cellular concrete	Aerated autoclaved concrete (e.g. elements, blocks)	70	0	0	30	30
Bitumen	Bitumen (e.g. bituminous roofing, vapour barrier, waterproofing membrane)	85	5	0	10	0
Polyolefins (PP, PE)	Polyolefins (PP, PE) (e.g. kraft paper of polyethylene (PE) vapour barrier, ducts), excluding packaging	10	85	0	5	0
Elastomers	Elastomers (e.g. EPDM roofing)	90	0	0	10	0
PVC	PVC cabling (e.g. electric cables and wire insulation)	10	40	0	50	0
	PVC pipes (e.g. for sewerage)	10	30	0	50	0
	PVC profiles (e.g. window frames)	10	45	0	45	0
	PVC sheets (e.g. PVC roofing, waterproofing membranes)	20	65	0	15	0
Supple flooring	Supple flooring (e.g. linoleum, fixed carpet, vinyl)	0	95	0	5	0
Finishing layer	Finishing layer fixed to stony waste (e.g. plaster, paint, coatings, adhesives)	5	0	0	95	0
	Finishing layer fixed to wood, plastic or metal (e.g. paints, coatings, adhesives)	0	100	0	0	0
Remaining waste	Combustible remaining waste	0	100	0	0	0
	Non-combustible remaining waste	100	0	0	0	75
Other hazardous waste	Aerosols and kits (e.g. PU foam, silicones)	0	100	0	0	100
	Asbestos (bounded, unbounded)	100	0	0	0	100
	Fluorescent lamps	30	0	0	70	100
	Liquid construction site waste (e.g. paints, adhesives, resins, form mould oil, white spirit)	0	75	0	25	100

E Milieu-impact van de gebruikte materialen

A. Gebouwschil

Materiaal		Impact productiefase [mPt/kg]			Impact afbraakfase [mPt/kg]					
		A1-A3: Productie	A4: Transport naar site	A5: Constructie	C1: Afbraak	C2: Transport naar afvalverwerking	C3: Afvalverwerking	C4: Afvoer		
							Sorteren	Stort	Verbranding	
Productie en afvalverwerking	Afwerkingspleister	4,903	0,601	0,286	0,380	0,188	0,014	0,001	0,011	0,000
	Bitumen	47,381	0,554	2,684	0,380	0,448	0,006	0,057	3,096	2,134
	Dakpan	10,107	0,554	0,544	0,000	0,188	0,012	0,001	0,011	0,000
	Dekvloer	3,970	0,568	0,237	0,380	0,188	0,012	0,001	0,011	0,000
	Eikenhouten planken	18,315	0,540	1,026	0,000	0,665	0,006	0,033	0,000	0,962
	Enkel glas	46,813	0,707	0,000	0,000	0,188	0,013	0,001	0,011	0,000
	EPDM	113,328	0,554	7,973	0,380	0,434	0,005	0,049	45,097	0,000
	Gipskartonplaat	8,364	0,554	1,432	0,380	0,405	0,005	0,020	19,298	0,000
	Gipspleister	6,130	0,601	0,349	0,380	0,188	0,043	0,002	0,011	0,000
	Glasvezel wapeningsnet	106,290	0,601	5,355	0,380	0,188	0,012	0,001	0,011	0,000
	Grondpleister	6,130	0,601	0,349	0,380	0,188	0,054	0,003	0,011	0,000
	Houten balk	18,315	0,540	1,026	0,000	0,665	0,006	0,033	0,000	0,962
	Isolatieplugs	64,378	0,554	5,326	0,000	0,694	0,003	0,051	1,216	39,620
	Lijmmortel	60,322	0,568	3,055	0,380	0,188	0,012	0,001	0,011	0,000
	Minerale wol	55,699	0,554	3,639	0,000	0,608	0,000	0,785	0,137	14,996
	Minerale wol Drukvast	55,699	0,554	3,614	0,000	0,608	0,000	0,276	0,137	14,996
	Minerale wol ETICS	55,699	0,554	3,639	0,380	0,608	0,000	0,785	0,137	14,996
	Onderdak	40,283	0,554	2,133	0,000	0,723	0,002	0,031	0,000	1,076
	OSB	16,475	0,554	0,943	0,000	0,723	0,002	0,038	0,000	1,076
	Panlatten	28,007	0,554	1,512	0,000	0,665	0,008	0,044	0,000	0,962
PE-folie	116,509	0,554	8,299	0,380	0,694	0,003	0,052	1,433	46,731	
PUR	275,015	0,554	16,330	0,000	0,738	0,000	1,040	0,984	48,265	
Tengellatten	28,007	0,554	1,512	0,000	0,665	0,008	0,044	0,000	0,962	

	Wapeningsstaal	137,166	0,554	6,896	0,380	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000
Enkel productie	Buitendeur: aluminium/hout	77,174	0,707	0,000						
	Dubbel glas	88,333	0,707	0,000						
	Eikenhouten raamkader	126,074	0,707	0,000						
Enkel afvalverwerking	Aluminium				0,000	0,188	0,006	0,000	0,075	0,000
	Cementmortel				0,000	0,188	0,012	0,001	0,011	0,000
	Glas				0,000	0,18	0,013	0,001	0,011	0,000
	Hout				0,000	0,723	0,003	0,056	0,000	1,076
	Koper				0,000	0,188	0,005	0,000	2,505	0,000
	Papier				0,000	0,203	0,034	0,002	0,000	0,159
	Plastic				0,000	0,694	0,003	0,064	1,820	38,912
	Polyethyleen				0,000	0,694	0,003	0,064	1,433	46,731
	Rubber				0,000	0,434	0,006	0,055	45,097	0,000
	Staal				0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000
	Verf				0,000	0,752	0,000	0,057	0,000	105,915
Zink				0,000	0,188	0,005	0,000	2,505	0,000	

B. Technische installaties

Ruimteverwarming en sanitair warm water

Materiaal	Impact productiefase [mPt/kg]			Impact afbraakfase [mPt/kg]					
	A1-A3: Productie	A4: Transport naar site	A5: Constructie	C1: Afbraak	C2: Transport naar afvalverwerking	C3: Afvalverwerking	C4: Afvoer		
							Sorteren	Stort	Verbranding
Gascondensatieketel	371,647	0,664	18,626	0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000
Schouw	64,378	0,664	5,331	0,000	0,694	0,003	0,051	1,216	39,620
Warmtepomp	1039,294	0,664	52,008	0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000
Ventilator	164,011	0,664	8,244	0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000
Buffervat	207,386	0,664	10,413	0,000	0,188	0,004	0,000	0,014	0,000
Expansievat	188,268	0,664	9,457	0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000

Ventilatie

Materiaal	Impact productiefase [mPt/kg]			Impact afbraakfase [mPt/kg]					
	A1-A3: Productie	A4: Transport naar site	A5: Constructie	C1: Afbraak	C2: Transport naar afvalverwerking	C3: Afvalverwerking	C4: Afvoer		
							Sorteren	Stort	Verbranding
Afvoerventiel	304,029	0,664	15,245	0,000	0,188	0,004	0,000	0,014	0,000
Luchtfilter	480,406	0,664	26,499	0,000	0,694	0,002	0,042	1,433	46,731
Toe/afvoerkanaal 100mm	319,728	0,664	18,465	0,000	0,694	0,002	0,042	1,433	46,731
Toe/afvoerkanaal 125mm	319,728	0,664	18,465	0,000	0,694	0,002	0,042	1,433	46,731
Toe/afvoerkanaal 150mm	319,728	0,664	18,465	0,000	0,694	0,002	0,042	1,433	46,731
Toe/afvoerkanaal 75mm	319,728	0,664	18,465	0,000	0,694	0,002	0,042	1,433	46,731
Toe/afvoerrooster (mechanisch)	465,209	0,664	23,304	0,000	0,188	0,004	0,000	0,014	0,000
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Alu	423,956	0,664	21,244	0,000	0,188	0,005	0,000	0,075	0,000
Toe/afvoerrooster (natuurlijk) Polystyreen	113,209	0,664	8,372	0,000	0,694	0,003	0,048	2,620	50,201
Toevoerventiel	398,538	0,664	19,960	0,000	0,188	0,004	0,000	0,014	0,000
Ventilatie-unit	552,462	0,664	27,667	0,000	0,188	0,005	0,000	0,014	0,000

F Dimensionering van de technische installaties

A. Ruimteverwarming

De ontwerpwarmtebelasting van de woning worden berekend op basis van de rekentool via Excel die door het WTCB beschikbaar gesteld is. In deze tool worden de voorschriften uit de norm NBN EN 12831 ANB gevolgd. Er wordt verondersteld dat de woning in Gent gelegen is, de basisbuitentemperatuur is dus -7°C . De bekomen ontwerpwarmtebelasting wordt in Tabel 25 weergegeven.

	Ontwerpwarmtebelasting [kW]
Niet geïsoleerd, ventilatiesysteem A of C	14,0
Volledig geïsoleerd, ventilatiesysteem A of C	6,2
Volledig geïsoleerd, ventilatiesysteem D	4,4

Tabel 25: Ontwerpwarmtebelasting van de casestudy in verschillende scenario's

Er wordt geen apart buffervat voorzien voor ruimteverwarming. Indien er met een warmtepomp gewerkt wordt, wordt een *Seasonal Coefficient of Performance* (SCOP) van 3,30 bij 55°C verondersteld, de condensatieketel heeft een rendement van 97,3% bij 30% deellast.

B. Sanitair warm water

Er wordt verondersteld dat er dagelijks 35 l water aan 60°C nodig is per persoon. Voor een gezin van vier personen moet er dus 140 l warm water per dag voorhanden zijn. We nemen aan dat dit het volume van het buffervat is. Op basis van tabel 12 uit 'WTCB-rapport nr. 14' (WTCB, 2013), kan het benodigde vermogen van de warmteproductie bij semi-accumulatie bepaald worden. Er moet 4 kW voorzien worden voor de productie van sanitair warm water.

In de EPB-software wordt aangegeven dat de opwekker een geïntegreerd opslagvat heeft. De energie-efficiëntie van de productie van sanitair warm water is afhankelijk van het type opwekker. In de EPB-software wordt hiervoor 80% bij het gebruik van een gascondensatieketel en 123% bij de lucht/water-warmtepomp.

C. Opwekker voor ruimteverwarming en sanitair warm water

In 'WTCB rapport nr. 14' (WTCB, 2013) wordt gesteld dat het vermogen van de opwekker voor ruimteverwarming en sanitair warm water berekend mag worden aan de hand van de volgende formule indien de ketel prioritair zorgt voor de warmwaterbereiding via een semi-accumulatiesysteem.

$$\Phi_{SU} = \max \{ \Phi_{HL} ; \Phi_{DHW,acc} \} \quad [W]$$

In deze casestudy wordt voor die optie gekozen. In principe zou het opslagvat voor sanitair warm water namelijk voldoende groot moeten zijn voor een gezin van vier personen voor een volledige dag. Het systeem heeft dus een volledige dag de tijd om het opslagvat opnieuw op te warmen, waardoor dit kan gebeuren op de momenten waarop er geen warmtevraag voor ruimteverwarming is. Er wordt een veiligheidsfactor van 1,1 gebruikt om het vermogen van de opwekker te bepalen. Het finale vermogen van de opwekker wordt weergegeven in onderstaande tabel, afhankelijk van het maatregelenpakket en het tijdstip waarop de opwekker geïnstalleerd wordt bij gefaseerde renovatie.

Isolatie	Ventilatiesysteem	Vermogen opwekker [kW]
Niet aanwezig	Type A of C	14,0
Overall aanwezig, behalve in vloer	Type A of C	7,5
	Type D	5,2
Overall aanwezig	Type A of C	6,8
	Type D	4,8

Tabel 1: Vermogen van de opwekker voor ruimteverwarming en sanitair warm water in verschillende scenario's

D. Ventilatie

De ventilatiedebieten in elke ruimte zijn berekend op basis van de norm NBN D 50-001 (1991), waarnaar verwezen wordt in bijlage IX van het 'Energiebesluit'. Er wordt toevoer van verse lucht voorzien in de droge ruimtes en de lucht wordt afgevoerd in natte ruimtes zoals de keuken en de badkamer. Verder is er telkens een debiet van $3,6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ voorzien en is er rekening gehouden met de minimale toe- en afvoerdebieten die voor elke ruimte in de norm zijn bepaald. In de casestudy blijkt het minimale benodigde totale ventilatiedebiet gelijk te zijn aan $216 \text{ m}^3/\text{h}$. Dit wordt afgerond naar $230 \text{ m}^3/\text{h}$, waardoor er een zekere veiligheidsmarge ingebouwd wordt. Het ventilatiedebiet in elke ruimte is weergegeven in Tabel 27.

Ruimte	Oppervlakte [m ²]	Minimale debieten		Ontwerpdebiet	
		Toevoer [m ³ /h]	Afvoer [m ³ /h]	Toevoer [m ³ /h]	Afvoer [m ³ /h]
Leefruimte	23,12	83		90	
Keuken	5,39		50		75
Badkamer	4,26		50		75
Gang GV	4,39				
Opslag GV	2,05				
Slaapkamer 1	14,74	53		55	
Slaapkamer 2	9,42	34		35	
Gang V1	5,04				80
Slaapkamer 3	12,81	46		50	
Opslag V2	8,19				
Gang V2	2,53				
Totaal		216	100	230	230

Tabel 2: Ventilatiedebieten in de casestudy

In de niet-gerenoveerde toestand heeft het gebouw een ventilatiesysteem A, waarbij zowel de toevoer als de afvoer van lucht natuurlijk gebeurt. Verse lucht komt de woonkamer en slaapkamers binnen via ventilatieroosters in de ramen, stroomt via daartoe voorziene doorstroomopeningen door naar de natte ruimtes en verlaat daar de woning opnieuw via ventilatieroosters in de ramen. Om de materiaalimpact van dit type ventilatiesysteem te berekenen, is er verondersteld dat de ventilatieroosters volledige breedte van elk raam in de woning innemen. De materiaalimpact van de doorstroomopeningen is verwaarloosd. In de EPB-software wordt de reductiefactor voor vraagsturing gelijkgesteld aan 1,0, er is namelijk geen vraagsturing aanwezig. De m-factor geeft de uitvoeringskwaliteit weer en wordt verondersteld gelijk te zijn aan 1,35.

Bij maatregelenpakket één en drie wordt gebruikgemaakt van een ventilatiesysteem type C+. Dit systeem maakt gebruik van natuurlijke toevoer van verse lucht in de droge ruimtes en mechanische afvoer van de ventilatielucht. Om energie te besparen, wordt er vraagsturing door middel van aanwezigheidssensoren of CO₂-detectie toegepast, vandaar de '+'. De ventilatie-unit staat in de opslagruimte op de gelijkvloerse verdieping en van daaruit vertrekken ventilatiekanalen naar de keuken, de badkamer en de gang. Er wordt gebruikgemaakt van een kanaal met een diameter van 125 mm en een totale lengte van 10 m. Net zoals bij het natuurlijke ventilatiesysteem is er verondersteld dat de ventilatieroosters de volledige breedte van de ramen in de toevoerruimtes innemen. In de EPB-software wordt de reductiefactor voor vraagsturing gelijkgesteld aan 0,61. Er wordt uitgegaan van een gemiddelde uitvoeringskwaliteit, de m-factor is dus gelijk aan 1,25. Bovendien maakt het ventilatiesysteem gebruik van één ventilator met een vermogen van 40 W.

In de andere twee maatregelenpakketten wordt een ventilatiesysteem type D gebruikt. Hierbij wordt zowel de toevoer als de afvoer van ventilatielucht mechanisch verzorgd. Het grote voordeel van dit systeem is dat warmterecuperatie mogelijk is. In deze casestudy is hiervoor een efficiëntie van 90% verondersteld. De ventilatie-unit staat in de opslagruimte op de tweede verdieping. Van daaruit vertrekken ventilatiekanalen naar nagenoeg alle ruimtes in de woning. De ventilatiekanalen met een diameter van 100 mm hebben een totale lengte van 7,6 m, deze met een diameter van 125 mm hebben een totale lengte van 10 m en de totale lengte van de ventilatiekanalen met een diameter van 150 mm is 11,4 m. Bovendien wordt er gebruikgemaakt van een CO₂-sensor in het afvoerkanaal, de reductiefactor voor vraagsturing mag dus gelijkgesteld worden aan 0,95. Ook hier wordt uitgegaan van een gemiddelde uitvoeringskwaliteit, net als bij het ventilatiesysteem type C+ is de m-factor dus gelijk aan 1,25. Het volledig mechanische ventilatiesysteem maakt gebruik van twee ventilatoren met elk een vermogen van 40W.

G Operationeel energiegebruik

Cond: Gascondensatieketel

WP: warmtepomp

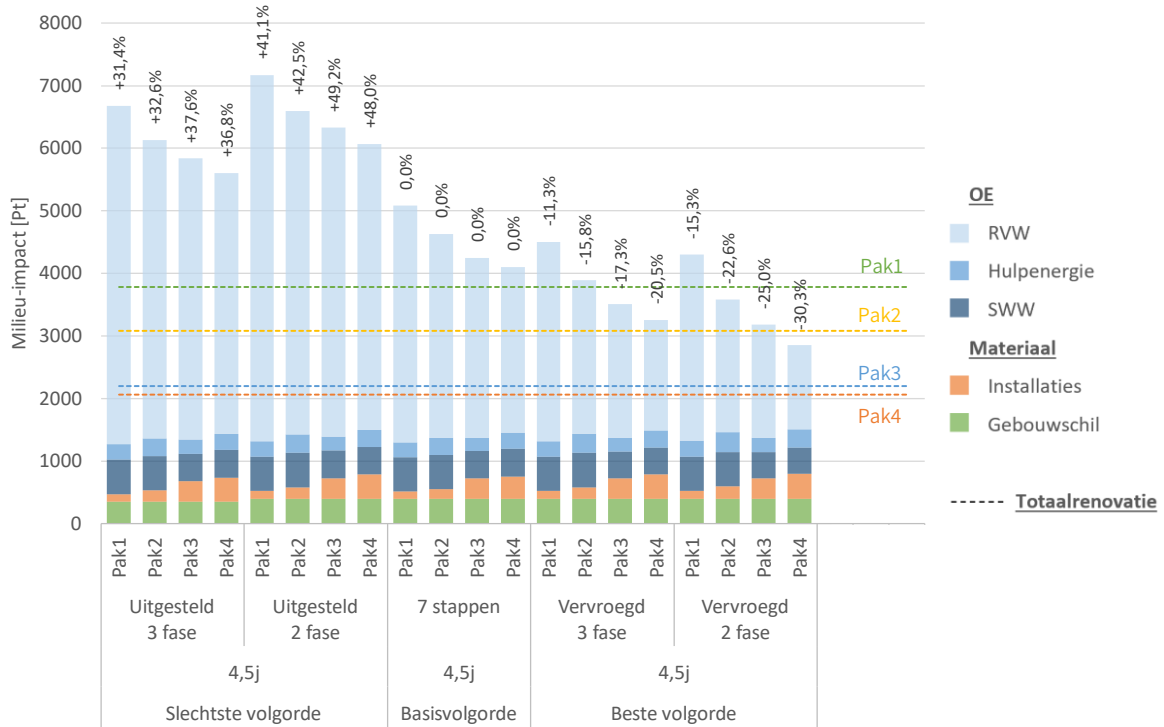
LTV: Lage temperatuurverwarming

	Energieprestatie		Energiegebruik		
	E-peil [-]	EPC-label [-]	RVW [kWh]	Hulpenergie [kWh]	SWW [kWh]
Pak1	53	A	7284	654	1320
Pak2	43	A	4815	654	1666
Pak3	34	A	1641	425	440
Pak4	29	A	1085	425	579

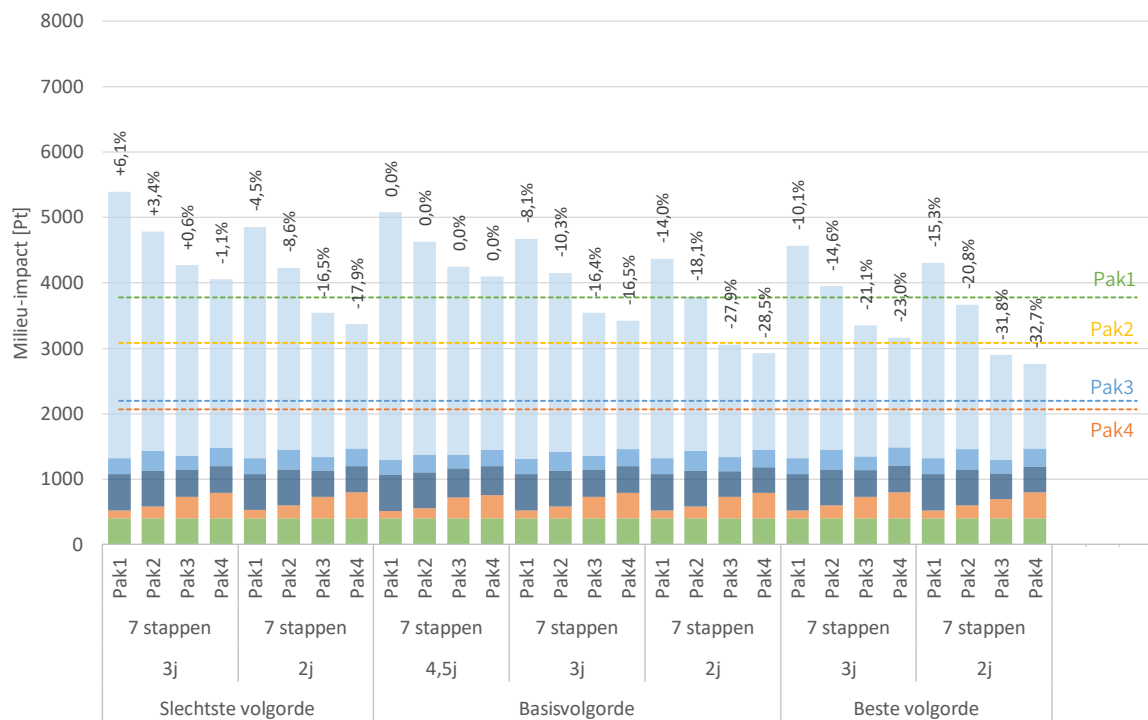
Renovatiemaatregelen					Energieprestatie			Energiegebruik			
Isolatie					RVW	Vent.	E-peil [-]	EPC-label [-]	RVW [kWh]	Hulpenergie [kWh]	SWW [kWh]
HD	G	PD	R	V							
					Cond	A	181	D	35658	654	985
x					Cond	A	142	C	27368	654	985
	x				Cond	A	141	C	27118	654	985
		x			Cond	A	165	D	32382	654	985
			x		Cond	A	164	D	32094	654	985
				x	Cond	A	173	D	34028	654	985
x	x				Cond	A	103	C	18895	654	985
x		x			Cond	A	127	C	24112	654	985
x	x	x			Cond	A	89	B	15685	654	985
x	x	x	x		Cond	A	72	B	12124	654	985
x	x	x	x	x	Cond	A	66	B	10558	654	985
x					Cond	C+	132	C	24253	654	1320
x	x				Cond	C+	92	B	16069	654	1320
x	x	x			Cond	C+	83	B	12519	654	1320
x	x	x	x		Cond	C+	61	B	9363	654	1320
x	x	x	x	x	Cond	C+	56	A	7824	654	1320
x					Cond	D	111	C	21402	654	1666
x	x				Cond	D	80	B	13258	654	1666
x	x	x			Cond	D	63	B	9741	654	1666
x	x	x	x		Cond	D	50	A	6661	654	1666
x	x	x	x	x	Cond	D	45	A	5172	654	1666
x	x	x	x		Cond LTV	C+	58	A	8716	654	1320
x	x	x	x		Cond LTV	D	48	A	6201	654	1666
x	x	x	x		WP LTV	C+	36	A	1964	425	440
x	x	x	x		WP LTV	D	31	A	1397	425	579
		x		x	Cond	A	158	D	30756	654	985
		x	x	x	Cond	A	141	C	27187	654	985
				x	Cond	C+	161	D	31148	654	1320
		x		x	Cond	C+	146	C	27882	654	1320
		x	x	x	Cond	C+	129	C	24310	654	1320
x		x	x	x	Cond	C+	91	B	16084	654	1320
				x	Cond	D	149	C	28278	654	1666
		x		x	Cond	D	134	C	25019	654	1666
		x	x	x	Cond	D	117	C	21448	654	1666
x		x	x	x	Cond	D	79	B	13269	654	1666

H Verdeling materiaalimpact over levenscyclusfasen voor de beschouwde gefaseerde renovatiescenario's

Uitvoeringsvolgorde in combinatie met aantal renovatiestappen



Uitvoeringsvolgorde in combinatie met de periode tussen renovatiestappen



Het aantal renovatiestappen in combinatie met de periode tussen renovatiestappen

