

Naar milieubenchmarks van residentiële gebouwen: invloed van materialiteit, geometrie en typologie

Maud Haverbeke

Studentennummer: 01808016

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

Begeleiders: ir.-arch. Yanaika Decorte, ir.-arch. Stijn Van de Putte

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

Academiejaar 2023-2024

Dankwoord

Eind september, na de middelbare school, startte ik met twijfel aan de opleiding burgerlijk ingenieur-architect. Na jaren ontwerpen, studeren en onderzoeken sta ik binnenkort, zonder twijfel, met mijn diploma in de hand. De voorbije jaren waren hard werken, maar ging ook gepaard met veel plezier. Hoewel de interesse in wetenschappen soms hoger lag dan de kunstige vakken, ben ik trots dat ik al die jaren ben blijven doorzetten en nu aan het einde van de opleiding sta. Ik ben doorheen de jaren gevormd tot een kritisch denkend persoon met een steeds groter wordende interesse in duurzaamheid. Die interesse is verder gegroeid tijdens dit onderzoek. Ik blik met veel mooie herinneringen terug op de voorbije jaren. Ondanks de moeilijke momenten en het nachtenlange doorwerken, zijn er heel wat positieve momenten en mensen die ik koester. Ik wil die mensen graag bedanken om, samen met mij, deze thesis tot een goed einde te brengen.

Om te beginnen wil ik mijn promotor prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman bedanken om mij de kans te geven deze thesis te schrijven en om mij kennis te laten maken met de impact van CO₂ van residentiële gebouwen tijdens het bijzondere vraagstuk. Zonder dit bijzondere vraagstuk had ik mijn interesseveld in dit onderwerp nooit zover kunnen uitbreiden zoals het nu is gegroeid. Daarnaast wil ik mijn begeleiders Yanaika en Stijn bedanken voor de eindeloze hulp en constructieve feedback. In het bijzonder wil ik Yanaika bedanken om me wegwijs te maken in de programmeerwereld waar ik met een bang hartje aan begon en Stijn voor het moeiteloos openstaan voor extra begeleidingen en feedback. Uitermate bedankt voor het vertrouwen die jullie me alle drie tijdens het schrijven van deze masterproef hebben gegeven.

Verder bedank ik mijn ouders, broer, Haynee en kleine August om mij de voorbije jaren en maanden te steunen en er altijd in te blijven geloven dat ik deze opleiding tot een goed einde zou brengen. Dank jullie wel voor de motivatie en om te luisteren naar de soms eindeloze frustraties. Bedankt papa voor het nalezen en de kritische bedenkingen die de thesis beter hebben gemaakt. Naast mijn familie, zijn er ontelbare vrienden, zowel thuis als in Gent, die me altijd hebben gesteund en die me door de moeilijke momenten heen hebben gesleurd. De opleiding heeft me nieuwe vriendschappen, die bestaan uit sterke banden, geboden. We zaten samen in diezelfde architectuurwereld en sloegen ons door elke opdracht. Bedankt archies voor de mooie jaren van samen afzien, lachen en genieten. Tenslotte wil ik mijn kotgenote en beste vriendin Saar bedanken om deel uit te maken van dit voorbije avontuur. Hoe niemand anders zag hoe hard werken het soms was, heb jij vanop de eerste rij die ervaring mogen meemaken. Bedankt om op elk moment klaar te staan voor mij, voor de hulp (ookal begreep je soms niets van mijn thesis) en voor de jarenlange vriendschap.

Dit gezegd zijnde wens ik u veel leesplezier toe.

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

“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.”

Mei 2024, Gent

Maud Haverbeke

Overzicht

Naar milieubenchmarks van residentiële gebouwen: invloed van materialiteit, geometrie en typologie

Auteur: Maud Haverbeke
Promotor: prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman
Begeleiders: ir.-arch. Yanaika Decorte
ir.-arch. Stijn Van de Putte

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: prof. dr. ir.-arch. Johan Lagae
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent
Academiejaar 2023-2024

Samenvatting

De vraag naar oplossingen voor de klimaatproblematiek en voor de reductie van het aanzienlijke aandeel die de bouwsector hieraan bijdraagt, dringt zich steeds meer op. Om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen, groeit het ontwikkelen van een milieubenchmark steeds aan belang. Hoewel in verscheidene landen reeds onderzoek naar het opstellen van een benchmark wordt gevoerd, is nog geen optimale methode ontwikkeld. Aan de hand van een levenscyclusanalyse en een brede waaier aan woningvarianten, representatief voor het Belgische gebouwenlandschap, wordt het opstellen van een benchmark op een kritische manier benaderd. De woningvarianten worden bekomen door te starten vanaf een aantal referentietypes en hierop wijzigingen aan te brengen. Door die referentiecasses te variëren op vlak van typologie, geometrie en materialiteit wordt het effect van die drie termen op het milieu in kaart gebracht. Aan de hand van benchmarkingen wordt duidelijk welke specifieke woonscenario's in de toekomst al dan niet mogelijk zullen zijn. Die vaststellingen hangen sterk samen met de eventuele normalisatie van de milieuscore. Door het analyseren van de normalisatiefactor bestaat de mogelijkheid om bepaalde scenario's in de toekomst toch te accepteren zonder dat ze een aanzienlijke nefaste uitwerking op de klimaatproblematiek uitoefenen.

Trefwoorden

Milieubenchmark, levenscyclusanalyse, residentiële gebouwen, materialiteit, geometrie, typologie, normalisatie

Towards environmental benchmarks of residential buildings: influence of materials, geometry and typology

Maud Haverbeke

Supervisors: prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman, ir.-arch. Yanaika Decorte, ir.-arch. Stijn Van de Putte

Abstract: The demand for solutions for the climate issue and for the reduction of the significant impact of the building sector, is increasingly forcing itself upon us. To reduce greenhouse gas emissions, the development of an environmental benchmark continues to gain importance. Although, a lot of different countries have already investigated the development of a benchmark, an optimal method has not yet been developed. Based on life cycle analysis and on a wide range of building variants, which are representative of the Belgian building landscape, benchmarking is approached in a critical manner. The building variants are made out of a few reference types, on which changes are made. Because of the variation of the reference cases based on typology, geometry and materials, the influence of those three terms on the environmental impact is identified. By means of benchmarking, it becomes clear which specific housing scenarios will or will not be possible. These conclusions are connected to the normalization of the environmental score. By analyzing the normalization factor, there's a possibility that specific scenarios will be acceptable without having a significant detrimental effect on the climate.

Keywords: environmental benchmark, life cycle analysis, residential buildings, materials, geometry, typology, normalization

I. INTRODUCTION

Climate change is a burning topic and its importance is still growing. The building sector has a major effect on climate change because of greenhouse gas emissions and the contamination of land, air and water. After all, the building sector is the most polluting sector [1] and is responsible for at least 37% of the global CO₂ emissions. This leads to the development of reduction targets and policies to limit the impact of buildings [2]. Within this framework, the Paris Agreement arises in 2015. They plead to be climate neutral in 2050. For Belgium, this means a reduction in greenhouse gas emissions until the target goal of 2,3 MT CO₂-eq is reached [3]. How to achieve this goal isn't determined yet. There's a lack of knowledge in reducing greenhouse gas emissions in general but also in the building sector. So for the building sector, we need to set benchmarks to evaluate and limit the environmental impact.

II. BENCHMARKING

A. Methodical background

An environmental benchmark is a reference value which measures the reduction of the environmental impact and assesses the efficiency of buildings. This means that benchmarks behave as a reference point enabling comparison [4]. The literature describes more than one type of benchmark to evaluate the environmental impact of a residential building. Based on the purpose, four types are distinguished: limit value, reference value, best practice and target value [5].

Starting with the limit value, it can be divided into the upper and lower limit. The upper limit value represents the 10th or 25th percentile, which means that 10% or 25% of all the environmental impacts shall be below this limit. In contrast, the lower limit value represents the 90th or 75th percentile, which is also the minimum acceptable performance level on the performance scale. Then, the reference value is calculated as the median or mean value and represents the present state of art. This is also the most common value for developing an environmental benchmark. Next up, the best practice stands for the best available real performance of all the investigated buildings. The last one, the target value is a value derived from policies to set targets for varying performance aspects [5]. In this study, the benchmark values will be determined by the limit values and reference value, in which the latter is the most important one.

B. Literature

This literature review is set up to have an overview of the obtained and mandatory benchmarks in different European countries. Tabel 1 gives an overview of those values, including the embodied and total impact. Each country has its own way of evaluating the emissions of the (residential) buildings, which makes it hard to compare the individual benchmarks with each other.

Table 1 European benchmarks on embodied and total impact

source	Country	Embodied impact	Total impact
[6]	Belgium	415 kgCO ₂ /m ² 45 mPt/m ²	1206 kgCO ₂ /m ² 82 mPt/m ²
[7]	Belgium	49 mPt/m ²	89 mPt/m ²
[8]	Belgium	613 kgCO ₂ /m ² 63 mPt/m ²	1015 kgCO ₂ /m ² 107 mPt/m ²
[9]	Denmark	183,5-542 kgCO ₂ /m ²	475 kgCO ₂ /m ²

[10]	France	/	640 kgCO ₂ /m ²
[10]	Spain	598,75 kgCO ₂ /m ² 229,46 kgCO ₂ /m ²	1944 kgCO ₂ /m ² 745 kgCO ₂ /m ²
[11]	Germany	435 kgCO ₂ /m ²	/
[12]	Norway	396 kgCO ₂ /m ²	/
[13]	Netherlands	33 €/m ² 24 €/m ²	/
[14]	Denmark	140 kgCO ₂ /m ²	490 kgCO ₂ /m ²

First, the Flemish studies are analyzing residential buildings with a reference study period of 60 years and take into account almost every life cycle stage, except from B1, B3, B4, B7 and D [6,7,8]. The second study only analyzes 5 single-family cases [7] while the others also add multi-family houses, with the number of cases equal to 12 and 117 [6,7].

By contrast, Denmark includes residential buildings and utilities with a reference study period of 50 years. Nevertheless, Denmark's benchmark value is way lower than the Belgian reference values are, partly explained by the less life cycle stages that are calculated. Only the stage A1-A3, B4, B6 and C3-C4 are included [9]. The other study in Denmark calculates the impact for 23 renovation projects. In general, the reference values of the two Danish studies are located near one another [14].

In France, the value shown in table 1 is not a reference value, but the limit value for the residential buildings. This value is valid since 2022 and is being systematically tightened. In 2030, the total environmental impact will be limited to 415 kgCO₂/m², for which the impact is calculated based on a reference study period of 50 years and all life cycle stage except from B5 and B7. Besides, the same source analyses two types of Spanish apartments. One type of the multi-family units dates from 2013, the other type meets the NZEB standards. Logically, the lowest values in table 1 corresponds with the latter type. In addition, Spain is the only country that incorporates all life cycle stage (except from module D) over a reference study period of 50 years [10].

In Germany, Norway and in the Netherlands, they only set benchmarks for the embodied impact, looking at the combination of residential and utility buildings [11,12,13]. The German benchmark is set on 50 buildings, while relying on a reference study period of 50 years and all life cycle stages with neglecting B6, B7 and D [11]. On the other hand, the reference value of Norway is a little lower, because of the use of other materials and the higher reference study period of 60 years. Also, only the life cycle stages A1-A3 and B4 are considered [12]. The last country in the table, the Netherlands, uses a completely different unit (€/m²), which makes it impossible to compare the benchmark with other European countries. Table 1 shows two different values. The first one corresponds to residential buildings with a reference study period of 75 years, the second one corresponds to office buildings with a reference study period of 50 years. This concludes a lower environmental impact for utility buildings such as offices compared to residential buildings. For the assessment, the Netherlands uses the same life cycle stages as Germany, also including module D [13].

III. METHODOLOGY

A. Typology

To create an environmental benchmark, a wide range of environmental impacts of residential buildings need to be calculated. Therefore, the calculations rely on the Belgian life cycle assessment tool TOTEM. Before that, the wide range of buildings needs to be developed. This range is created by varying references cases of nine different typologies. This study considers three typical typologies of single-family houses and six typologies of multi-family units. The three typologies are detached, semi-detached and terraced houses, in which each of them have their own reference plan. This plan shall be transformed in its geometry and materials, which creates a large set of different building variants within that specific building typology.

To distinguish the different typologies of the multi-family houses, each type starts from the same reference appartement, which is each time adapted to the needs per typology. This investigation distinguishes rooftop, first floor and ground floor apartments. These three main types are further subdivided into corner and enclosed apartments. In the next step, the plans will also be transformed in its geometry and materials.

B. Geometry

After starting with nine reference plans, the result is 405 variants, with each of these variants having its own unique geometry. The 405 variants are created by transforming the length, width and floor height of the building. Each geometric parameter takes on three different values. By combining those values, 81 variants per single-family house and 27 variants per multi-family units are created. There are three times more single-family dwellings due to the different floor height of the two floors between them, while apartments consist of only one floor.

C. Materials

Even more building variants are formed by changing the construction method, which varies between the two most traditional ways namely solid and timber frame construction. Each of those construction methods can be further subdivided based on the environmental impact of the building components. For every component are four structures provided with an environmental impact, which can be extremely low, average low, average high or extremely high. By combining the building components within the same class of the material impact, a total of 3240 residential buildings, representative for the Belgian building stock, is created. Based on this wide range of dwellings, benchmarking on the total environmental impact and the normalization of benchmarking will be investigated, including the effect of the main terms – typology, geometry and materials – of this study. Having said that, it is important to note that the technical installations are neglected.

IV. RESULTS

A. Total environmental impact

In the first step, the environmental impact of all variants is calculated and based on those values, a benchmark is formed. The figures below show the results as function of the floor area and make it possible to compare the impact of every individual variant with the obtained benchmark. Relying on

both the single-family and multi-family houses, the benchmark or reference value is equal to 9374,09 mPt. Based on the climate change potential, the benchmark value is equal to 104780,80 kgCO₂.

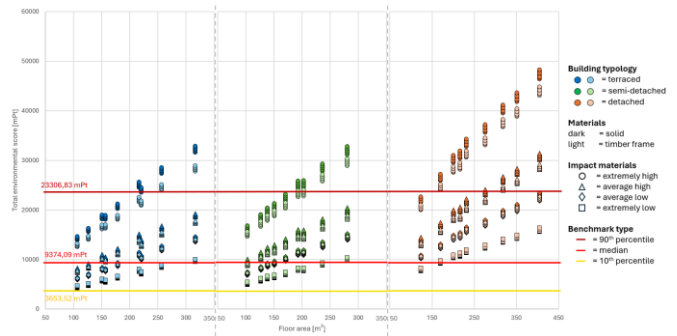


Figure 1 Total environmental score for all single-family houses in function of the floor area

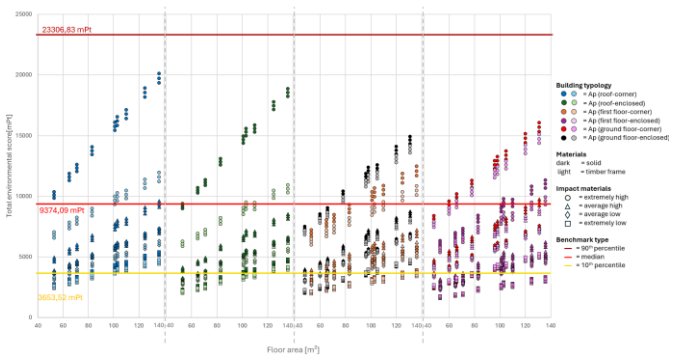


Figure 2 Total environmental score for all multi-family houses in function of the floor area

Both figures show that applying a timber frame construction is in every case a better option than a solid construction, just for environmental reasons. This makes a timber frame in combination with materials that have an extremely low impact the best option.

Looking at the different typologies, only 15% of the detached houses is still acceptable. The percentage of acceptable semi-detached and terraced houses is higher, but still limited, respectively equal to 46% and 55%. In most cases, the variants consist of materials with a low impact and/or a low floor area. By contrast, only a few apartments do not meet the imposed benchmark, which are mostly the variants made up of materials with a high impact in solid construction. In some cases, a timber frame construction in combination with materials with a high impact do not succeed either. But this is mostly the case when it's combined with a large floor area. This results in: 87% of the rooftop-corner, 88% of the rooftop-enclosed, 93% of the first floor-corner, 95% of the first floor-enclosed, 87% of the ground floor-corner and 91% of the ground floor-enclosed apartments.

B. Normalization

Based on table 1, almost all benchmark values are expressed in kgCO₂/m². In this part of the study, the normalization to the gross floor area is being questioned. When normalizing the total environmental score to the gross floor area, the biggest buildings are favored. This is explained by the spread of the environmental impact over a larger floor area, which is an undesirable effect. This leads to an investigation into a better suitable normalization factor.

Three other geometric characteristics are analyzed, starting with the volume, followed by the heat loss area and ending with the building compactness. Choosing the two former characteristics as normalization factor also leads to favoring large dwellings. Although the building compactness looks like it suits better, it also favors large buildings. That's when form efficiency comes into play as it's a variation on the compactness without penalizing small dwellings. The form efficiency is calculated by the equivalent spherical surface divided by the heat loss area.

The figures below show the benchmark types based on a normalization to the form efficiency. The top graph displays all single-family typologies, while the bottom graph looks at the multi-family typologies.

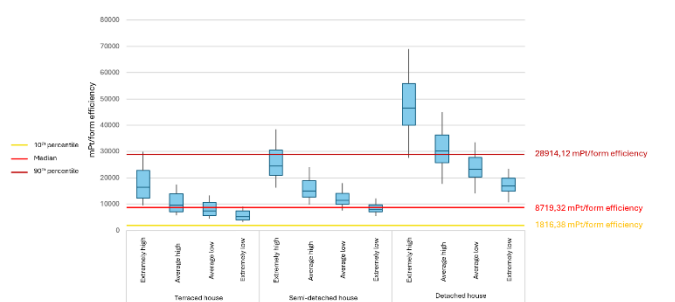


Figure 3 Total environmental score normalized by the form efficiency for all single-family houses

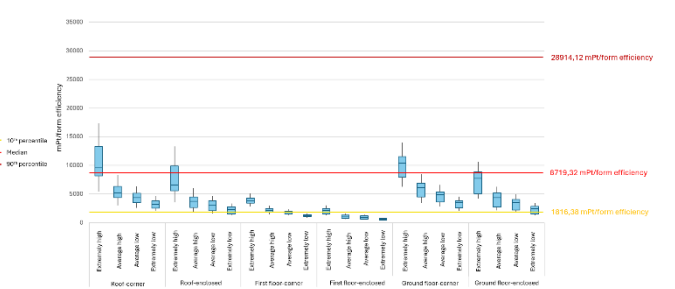


Figure 4 Total environmental score normalized by the form efficiency for all multi-family houses

The obtained reference value is equal to 8719,32 mPt/form efficiency. According to the position of the boxplots relative to the red line (median), different conclusions can be made. Looking at the detached dwelling, no variant is still acceptable. Also, only a few cases of semi-detached houses do succeed, those which only consist of a small floor area in combination with low impacts of the building elements. Only 12% of the variants with an average low impact are acceptable. By contrast, 56% of the cases with an extremely low impact meet the obtained benchmark. Because of the higher compactness of a terraced house, more dwellings meet the median. This corresponds to 38%, 66% and 89% of the cases with respectively an average high, average low and extremely low impact of the building elements.

On the other hand, figure 4 shows completely different findings. Almost all of the multi-family houses meet the reference value due to their efficient form. The only exceptions are rooftop and ground floor apartments with an extremely high impact and in most of the cases also in combination with a large floor area. The percentage of the acceptable cases correspond to 41%, 69%, 35% and 72%, respectively for rooftop-corner, rooftop-enclosed, ground floor-corner and ground floor-enclosed apartments.

Due to the large spread between the different typologies, this study searches for a uniform requirement which stimulates the efficient buildings, but is still feasible for less efficient buildings. According to the Belgian study about the “*S-peil*” [15], this investigation implements the same two corrections on the normalization by the form efficiency. The first correction is made by adding a correction factor to the equivalent spherical surface. The correction factor takes into account the loss area of the common walls. Consequently, the corrected equivalent spherical surface is defined as:

$$A_{sphere,corr} = A_{sphere} * \frac{A_t}{A_t + A_{common}} \quad (1)$$

The second correction takes into account the heat losses through the common walls. This implies that the operational impact will increase and thus the total environmental impact.

These corrections lead to a new reference value of 14680,82 mPt/corrected form efficiency, which implies a global increase of the environmental score of all typologies, except for the detached dwellings. This increase results in a 7% of detached variants that meet the obtained benchmark. Also, the semi-detached and terraced dwellings increase in variants that obtain the reference value, respectively 38% and 42%.

By contrast, due to the increase of the environmental impact of the multi-family houses, more of those cases do not meet the reference value. This is only the case for extremely high impacts of the materials and a few exceptions at average high impact. These exceptions are always in combination with a large floor area. The proportion of acceptable housing units with extremely high materials impact is respectively for rooftop-corner, rooftop-enclosed, first floor-corner, first floor-enclosed, ground floor-corner and ground floor-enclosed apartments 22%, 37%, 39%, 56%, 17% and 30%.

Additionally, the same research is done based on the climate change potential. Analogous determinations to what is stated above are found in this substudy and ultimately leads to a benchmark of 172849,36 kgCO₂/corrected form efficiency.

C. Comparison to literature

According to the literature, it is hard to compare different benchmarks, because they are all accompanied by several and/or different features. To assure the best possible comparison, a benchmark normalized to the gross floor area is established, both for the aggregated score and the climate change potential. The two benchmarks are equal to 62,57 mPt/m²GFA and 721,47 kgCO₂/m²GFA. Additionally, some of the sources only look at single-family houses or only at multi-family houses. That’s why the following benchmarks are established: 66,71 mPt/m²GFA or 768,53 kgCO₂/m²GFA based on single-family dwellings and 55,25 mPt/m²GFA or 647,83 kgCO₂/m²GFA based on multi-family cases.

The easiest way to compare the results is looking at the Belgian studies [6,7,8,], due to the use of the same features. The first and last study of Belgium [6 and 8] are looking at both single-family and multi-family cases. The first study just takes into account 12 dwellings, while the third study analyzed 117 cases. The more analyzed cases, the more the closer the benchmarks. By contrast, the second study only

takes into account 5 single-family houses. The benchmark shows a big difference comparing it to the obtained benchmark in this study. Yet based on 5 cases, the study can’t be very representative for the Belgian buildings stock.

The Spanish investigation [10] analyzed specific apartments, on the one hand dating from 2013 and on the other hand meeting the NZEB standards. The values of this study and the apartments of 2013 correspond approximately. Due to meeting the NZEB standards, the operational impact decreases, but in this situation also the embodied impact reduces. This implies that Spanish apartments corresponding to the NZEB standard are ecologically better than our Belgian apartments. Furthermore, this study observes the limit value of the total environmental impact (2022) in France. This limit corresponds to the obtained median value in this study, but in this investigation, technical installation are neglected, which means that a higher value will be a more realistic benchmark. Moreover in France, the limit value in 2030 is much lower than the Flemish obtained benchmarks and is equal to 415 kgCO₂/m²GFA.

The other studies [9,11,12,13,14] look at utility buildings in addition to residential buildings. Moreover, this study confirms the influence of the typology, which will still differ when utility buildings are included in the analysis. This makes it difficult to compare the different benchmark values.

D. Sensitivity analysis

The sensitivity analysis conducts deeper research on the geometry and especially the compactness of the dwelling. All the reference plans, where the typologies start from, are rectangular in shape. The rising question is: what will happen if the plan changes by adding an extension so that the compactness of the building decreases? The plan of the detached house will thus be changed and a few variants will be made by changing the width, length and floor height. Next, the impact on the environmental score and benchmarking is examined.

The results make clear that a less compact building has a higher environmental impact, when compared to a compact building of the same typology and with the same floor area.

Besides, 81 non-compact variants of detached dwellings are created, which is 5% of the total amount of analyzed buildings. By adding those variants, the reference value increases with an average of 3%, both for the aggregated score and the score based on the climate change potential. For both normalizations (to gross floor area and corrected form efficiency), this leads to the following reference values: 64,16 mPt/m²GFA, 736 kgCO₂/m²GFA, 15122,84 mPt/corrected form efficiency and 17336,10 kgCO₂/corrected form efficiency. Consequently, by adding more non-compact variants the environmental score will continue to rise.

V. CONCLUSIONS

From the literature, different countries are looking at the development of an environmental benchmark, which often comes with specific restrictions and limits. Due to the different approaches, making a comparison is complicated. Moreover, the studies do not critically consider the assessment method and didn’t investigate the influence of different parameters such as typology, materials and geometry.

Starting from the total environmental score, the influence of typology, geometry and the materials is immediately apparent.

Compact typologies perform way better than non-compact typologies. So, this means that, especially for single-family houses, terraced houses have a lower environmental score than detached houses. Comparing the single-family houses to the multi-family, the multi-family will always result in a better performance. Next, timber frame construction is the best option compared to solid construction, especially in combination with a low impact of the building elements. The last conclusion is that the environmental impact will rise if the gross floor area increases, so the ecological preference evidently goes to small dwellings.

Based on the total environmental score, the reference values of 9374,09 mPt or 104780,80 kgCO₂ are found. As this leads to the hindering of some typologies, normalization is added. Most geometric characteristics, such as the gross floor area, volume, heat loss area and compactness, ensure a disadvantaging of small homes. This is not the case when the form efficiency is considered, although this variable makes it hard, as its turn, to establish a uniform requirement for all typologies. This implies adding two correction factors, leading to the new benchmark values of 14680,82 mPt/corrected form efficiency and 172849,36 kgCO₂/corrected form efficiency.

The sensitivity analysis shows that the benchmark value will increase if the compactness of the building decreases. By taking into account 5% of non-compact detached houses, the benchmark values rises with an average of 3%.

REFERENCES

- [1] United Nations Environment Programme (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction sector*. Nairobi.
- [2] United Nations Environment Programme, & Yale Center for Ecosystems + Architecture (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>
- [3] Vlaamse regering. (2019). *Vlaamse klimaatstrategie 2050*. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/32555>
- [4] Dimova, S., & Gervasio, H. (2018). *Environmental benchmarks for buildings: EFIRESources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design*. European Commission. <https://doi.org/10.2760/073513>
- [5] Tozan, B., Birgisdottir, H., Steinmann, J., Le Den, X., Röck, M., Hvid Horup, L., & Sørensen, A. (2022). *Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings: #4 Bridging the performance gap: A performance framework*. Rambøll. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6120874>
- [6] Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2022). Development of environmental benchmarks for the Belgian residential building stock. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012077>
- [7] Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2023). Preliminary study on the use of Big Data for environmental benchmarks of residential buildings in Flanders. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1), 012114. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012114>
- [8] Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2024). Life cycle environmental benchmarks for Flemish dwellings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 015005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad1bb7>
- [9] Zimmermann, R. K., Andersen, C. M. E., Kanafani, K., & Birgisdottir, H. (2021). *Whole Life Carbon Assessment of 60 buildings: Possibilities to develop benchmark values for LCA of buildings*. Polyteknisk Boghandel og Forlag. BUILD Report No. 2021:12 <https://sbi.dk/Pages/Whole-Life-Carbon-Assessment-of-60-buildings.aspx>
- [10] Izaola, B., Akizu-Gardoki, O., & Oregi, X. (2023). Setting baselines of the embodied, operational and whole life carbon emissions of the average Spanish residential building. *Sustainable Production and Consumption*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.001>
- [11] Braune, A., Ekhvaia, L., & Quante, K. (2021). *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*. DGNB.
- [12] Wiik, M. K., Selvig, E., Fuglseth, M., Lausset, C., Resch, E., Andresen, I., Brattebø, H., & Hahn, U. (2020). GHG emission requirements and benchmark values for Norwegian buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(2), 022005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/2/022005>
- [13] W/E adviseurs. (2017). Onderzoek 'Principes en parameters Milieuprestatie Gebouwen (MPG)': Op basis van ervaringen in 2012-2016 (W/E 9249). Stichting Nationale Milieudatabase.
- [14] Zimmermann, R. K., Rasmussen, F. N., & Birgisdottir, H. (2023). Challenges in benchmarking whole-life GHG emissions from renovation cases: Evidence from 23 real-life cases. *Energy and Buildings*, 301, 113639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113639>
- [15] Bracke, W., Delghust, M., Laverge, J., Alderweireldt, J., Levenau, C., Pierard, F., Peeters, L., & Baeten, J. (2015). Studie EPB-eisenpakket residentiële nieuwbouw: Een nieuw indicator voor de energie-efficiëntie van de gebouwschil en de algemene energieprestatie indicator op weg naar 2021. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1662982456/EPB-eisen_-_EPB-eisenpakket_residenti%C3%A9le_nieuwbouw_Studie_kilub.pdf

Inhoudsopgave

1.	Introductie	1
1.1.	Klimaatproblematiek in de bouwsector	1
1.2.	Definitie en relevantie van benchmarking	4
2.	Methodische achtergrond van benchmarking	5
2.1.	Benchmarktypes.....	5
2.2.	Benchmarksystemen	6
2.3.	Certificatiesystemen	6
2.4.	Levenscyclusanalyse	8
3.	Literatuuronderzoek.....	10
3.1.	Levenscyclusfasen.....	13
3.2.	Functionele eenheid	14
3.3.	Referentiestudieperiode.....	14
3.4.	Gebouwtypologie.....	15
3.5.	Indicatoren en eenheden.....	16
3.6.	Benchmarks in Europese context.....	16
3.6.1.	Top-down benchmarks	17
3.6.2.	Bottom-up benchmarks	18
3.6.3.	Dual benchmarks	21
4.	Methodologisch kader.....	23
4.1.	Levenscyclusanalyse	23
4.2.	Methodologie	24
4.2.1.	Doel en reikwijdte	24
4.2.2.	Levenscyclusinventarisatie	27
4.2.3.	Levenscyclusimpactanalyse	28
4.2.4.	Interpretatie	30
5.	Bepaling gebouwvarianten	31
5.1.	Referentiewoningen per gebouwtypologie	31
5.1.1.	Eéngesinswoningen	31
5.1.2.	Meergezinswoningen	35
5.2.	Variatie op geometrie	37
5.2.1.	Eéngesinswoningen	40
5.2.2.	Meergezinswoningen	42
6.	Bepaling materiaalvarianten.....	44
6.1.	Elementniveau.....	44
6.1.1.	Massiefbouw	44
6.1.2.	Houtskeletbouw	47
6.2.	Gebouwniveau	50
6.2.1.	Massiefbouw	50
6.2.2.	Houtskeletbouw	52

7.	Benchmarking op de totale milieu-impact	54
7.1.	Eéngesinswoningen.....	54
7.2.	Meergesinswoningen.....	57
7.3.	Alle woningtypologieën	60
7.4.	Besluit.....	64
8.	Normalisatie en benchmarking.....	65
8.1.	Normalisatie van de totale milieuscore	65
8.1.1.	Analyse: normalisatie naar de geometrische parameters	65
8.1.2.	Besluit	71
8.2.	Normalisatie naar de brutovloeroppervlakte	71
8.2.1.	Eéngesinswoningen	71
8.2.2.	Meergesinswoningen	76
8.2.3.	Vergelijking met Europese landen	78
8.3.	Normalisatie naar de vormefficiëntie	79
8.3.1.	Eéngesinswoningen	80
8.3.2.	Meergesinswoningen	82
8.3.3.	Gecorrigeerde normalisatie.....	84
8.4.	Besluit.....	90
9.	Gevoeligheidsanalyse	91
9.1.	Variatie op de compactheid	91
9.2.	Invloed op benchmarking	94
9.3.	Besluit.....	96
10.	Discussie	97
11.	Conclusie.....	99
	Bibliografie	102
	Bijlagen.....	107

Lijst van figuren

Figuur 1: Milieu-impact van huisvesting daterend van 2010 tot 2021 (Eurostat, 2023).....	1
Figuur 2: Gemiddelde grootte van huisvesting per land (Eurostat, 2023).....	2
Figuur 3: De verschillende fasen bij een levenscyclusanalyse (LCA) (Wastiels et al., 2021)	9
Figuur 4: 2000-Watt Society doelen (Aumann, 2019)	17
Figuur 5: Reductiecurve voor nieuwe Deense residentiële gebouwen en de toekomstige CO ₂ -limieten volgens de Deense bouwregelgeving (Hill-Hansen et al., 2022)	22
Figuur 6: Overzicht van de vier stappen in een LCA (Janssen et al., 2013).....	23
Figuur 7: Overzicht van de verschillende levenscyclusfasen en de bijhorende systeemgrenzen volgens de Europese standaard EN 15978 (CEN, 2011). De huidige versie van TOTEM neemt de modules ingekleurd in het groen mee (Servaes et al., 2023).....	25
Figuur 8: Transportafstanden afhankelijk van het afvalverwerkingsproces na deconstructie of afbraak (Servaes et al., 2023). De impacts die binnen de systeemgrenzen vallen zijn in blauw gekleurd en de impacts die buiten de systeemgrenzen vallen weergegeven in oranje.	27
Figuur 9: Grondplannen - gelijkvloer en eerste verdieping (bovenaan), gevelaanzichten - voor- en achtergevel (links) en snede (rechts) van de rijwoning (Van Der Veken et al., 2015) .	32
Figuur 10: Grondplannen - gelijkvloers en eerste verdieping (bovenaan), gevelaanzichten - voor- en achtergevel (midden), zijgevel (onderaan links) en snede (onderaan rechts) van de halfopen woning (Van Der Veken et al., 2015)	33
Figuur 11: Grondplannen - gelijkvloerse en eerste verdieping (bovenaan) en gevelaanzichten - voor- en achtergevel (onderaan) van de vrijstaande woning (Van Der Veken et al., 2015)	34
Figuur 12: Zijgevels - links en rechts (bovenaan) en snede (onderaan) van de vrijstaande woning (Van Der Veken et al., 2015).....	35
Figuur 13: Grondplan (bovenaan) en gevelaanzichten - voor- en achtergevel (onderaan) van de meergezins-woning (Van Der Veken et al., 2015)	36
Figuur 14: Grondplan appartement op het gelijkvloers (Van Der Veken et al., 2015).....	37
Figuur 15: Referentiegrondplannen hoekappartementen.....	37
Figuur 16: Percentage woningvarianten per typologie, inclusief de variaties op de geometrie .	39
Figuur 17: Het volume (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle ééngezinswoningen	40
Figuur 18: De verliesoppervlakte (y-as) uitgezet tegenover het volume (x-as) voor alle ééngezinswoningen	41
Figuur 19: De compactheid (links) en de vormefficiëntie (rechts) (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle ééngezinswoningen. Dezelfde legende als in figuur 17 en 18 is hier toepasbaar.	42
Figuur 20: Het volume (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle meergezinswoningen	42
Figuur 21: De verliesoppervlakte (y-as) uitgezet tegenover het volume (x-as) voor alle meergezinswoningen	43
Figuur 22: De compactheid (links) en de vormefficiëntie (rechts) (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle meergezinswoningen. Dezelfde legende als in figuur 20 en 21 is hier toepasbaar.	43
Figuur 23: Opbouw buitenwand in massiefbouw (Bron: TOTEM).....	45

Figuur 24: Opbouw buitenwand in houtskeletbouw (Bron: TOTEM).....	48
Figuur 25: Aandeel van de milieuscore (mPt/m ²) per gebouwelementen per subcategorie van massiefbouw, toegepast op een rijwoning.....	51
Figuur 26: Aandeel van de milieuscore (mPt/m ²) per gebouwelementen per subcategorie van houtskeletbouw, toegepast op een rijwoning.....	53
Figuur 27: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de ééngezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt.....	55
Figuur 28: Bijdrage aan de totale milieuscore van de gebouwelementen in massiefbouw per de ééngezinswoningstypologie, met het kleinste brutovloeroppervlakte en een uiterst hoge materialenimpact.....	56
Figuur 29: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de meergezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m ² tot 140m ² oploopt om daarna opnieuw te starten bij 40m ²	58
Figuur 30: Bijdrage aan de totale milieuscore van de gebouwelementen in massiefbouw voor hoekappartementen, per hoofdtypologie, met het kleinste brutovloeroppervlakte en een uiterst hoge materialenimpact	59
Figuur 31: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen	61
Figuur 32: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m ² tot 140m ² oploopt om daarna opnieuw te starten. ...	62
Figuur 33: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de vrijstaande woningen naar de brutovloeroppervlakte, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning	66
Figuur 34: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de vrijstaande woningen naar het volume, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning	67
Figuur 35: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de verliesoppervlakte, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning.....	68
Figuur 36: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de compactheid, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning.....	69
Figuur 37: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de vormefficiëntie, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning.....	70
Figuur 38: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/m ² BVO en weergegeven per ééngezinswoningstypologie en per materialenimpact.....	72
Figuur 39: De milieuscore (mPt/m ² BVO) van de rijwoningen met een gemiddeld hoge materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. De bijhorende brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.	73
Figuur 40: De milieuscore (mPt/m ² BVO) van de halfopen woningen met een gemiddeld lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. De bijhorende brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.	73

Figuur 41: De milieuscore (mPt/m ² BVO) van de vrijstaande woningen met een gemiddeld en uiterst lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. De bijhorende brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.	74
Figuur 42: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/m ² BVO en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact	76
Figuur 43: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en weergegeven per ééngezinswoningstypologie en per materialenimpact.....	80
Figuur 44: De milieuscore (mPt/vormefficiëntie) van de rijwoningen met een gemiddeld lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. Het bijhorend brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.	81
Figuur 45: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en weergegeven per meergezinswoningstypologie en materialenimpact	82
Figuur 46: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) en per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte.	85
Figuur 47: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) en per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte en inclusief transmissieverliezen.....	87
Figuur 48: Geometrische variatie op de referentiewoning van de vrijstaande woningtypologie	91
Figuur 49: Milieuscore/m ² BVO voor de referentiewoningen en de geometrische varianten.....	93
Figuur 50: Milieuscore/vormefficiëntie voor de referentiewoningen en de geometrische varianten.....	94
Figuur 51: Benchmarktypes (10 ^e percentiel, mediaan en 90 ^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen, inclusief de niet-compacte vrijstaande woningen, uitgedrukt in mPt/m ² BVO (bovenaan) en mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie (onderaan)	95
Figuur 52: Opbouw gemene muur in massiefbouw (Bron: TOTEM).....	120
Figuur 53: Opbouw vloer op volle grond in massiefbouw (Bron: TOTEM)	121
Figuur 54: Opbouw plat dak in massiefbouw (Bron: TOTEM)	122
Figuur 55: Opbouw hellend dak in massiefbouw (Bron: TOTEM)	123
Figuur 56: Opbouw raamopeningen in massiefbouw (Bron: TOTEM)	124
Figuur 57: Opbouw buitendeuren en garagepoort in massiefbouw (Bron: TOTEM)	125
Figuur 58: Opbouwen dragende wanden in massiefbouw (Bron: TOTEM)	126
Figuur 59: Opbouw niet-dragende wanden in massiefbouw (Bron: TOTEM)	127
Figuur 60: Opbouwen interne vloeren in massiefbouw (Bron: TOTEM)	128
Figuur 61: Opbouwen binnendeuren in massiefbouw (Bron: TOTEM).....	129
Figuur 62: Opbouwen gemene muur in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)	131
Figuur 63: Opbouwen plat dak in houtskeletbouw (Bron: TOTEM).....	133

Figuur 64: Opbouw dragende wanden in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)	134
Figuur 65: Opbouwen niet-dragende wanden in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)	135
Figuur 66: Opbouwen interne vloer in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)	136
Figuur 67: Aandeel van de milieuscore (kgCO_2/m^2) per gebouwelementen per subcategorie van massiefbouw, toegepast op een rijwoning	139
Figuur 68: Aandeel van de milieuscore (kgCO_2/m^2) per gebouwelementen per subcategorie van houtskeletbouw, toegepast op een rijwoning	140
Figuur 69: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO_2 , voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de ééngezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt	141
Figuur 70: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO_2 , voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt	142
Figuur 71: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO_2 , voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de meergezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m^2 tot 140m^2 oploopt om daarna opnieuw te starten.	143
Figuur 72: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO_2 , voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m^2 tot 140m^2 oploopt om daarna opnieuw te starten. .	144
Figuur 73: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$ en weergegeven per ééngezinswoningstypologie en per materialenimpact	145
Figuur 74: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$ en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact	145
Figuur 75: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{vormeëfficiëntie}$ en weergegeven per ééngezinswoningstypologie en per materialenimpact	146
Figuur 76: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{vormeëfficiëntie}$ en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact	146
Figuur 77: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{gecorrigeerde vormefficiëntie}$ en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte.	147
Figuur 78: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{gecorrigeerde vormefficiëntie}$ en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte en inclusief transmissieverliezen	148
Figuur 79: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen, inclusief de niet-compacte vrijstaande woningen, uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$ (bovenaan) en $\text{kgCO}_2/\text{gecorrigeerde vormefficiëntie}$ (onderaan)	149

Lijst van tabellen

Tabel 1: Indicatieve sectorale bijdragen (in Mton CO ₂ -eq) (Vlaamse Regering, 2019)	3
Tabel 2: De bestaande benchmarktypes (Tozan et al., 2022)De bestaande benchmarktypes (Tozan et al., 2022)	6
Tabel 3: Overzicht van bestaande bottom-up benchmarks	12
Tabel 4: Overzicht van de milieu-impactindicatoren inclusief de eenheden (Servaes et al., 2023)	29
Tabel 5: Variaties op de geometrische parameters van rijwoningtypologie	38
Tabel 6: U-waarde en milieuscore per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m ² K en mPt/m ²	46
Tabel 7: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, uitgedrukt in mPt/m ²	47
Tabel 8: U-waarde en milieuscore per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m ² K en mPt/m ²	49
Tabel 9: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, uitgedrukt in mPt/m ²	49
Tabel 10: Aandeel varianten ééngezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 62,57 mPt/m ² BVO en 721,47 kgCO ₂ /m ² BVO.....	75
Tabel 11: Aandeel varianten meergezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 62,57 mPt/m ² BVO en 721,47 kgCO ₂ /m ² BVO.....	77
Tabel 12: De gevonden benchmarktypes op basis van verschillende typologieën, uitgedrukt in mPt/m ² en kgCO ₂ /m ²	78
Tabel 13: Aandeel varianten ééngezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 8719,32 mPt/vormefficiëntie en 95526,94 kgCO ₂ / vormefficiëntie	82
Tabel 14: Aandeel varianten meergezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 8719,32 mPt/vormefficiëntie en 95526,94 kgCO ₂ / vormefficiëntie	83
Tabel 15: De gevonden benchmarktypes op basis van verschillende typologieën, uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en kgCO ₂ /vormefficiëntie.....	84
Tabel 16: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) van de gemene muur en interne vloer in de bouwwijze massiefbouw	86
Tabel 17: ingebedde (II) en operationele impact (OI) van de gemene muur en interne vloer in de bouwwijze houtskeletbouw	86
Tabel 18: Aandeel varianten per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 14680,82 mPt/ gecorrigeerde vormefficiëntie en 172849,36 kgCO ₂ / gecorrigeerde vormefficiëntie.....	89
Tabel 19: Geometrische karakteristieken van de geometrische variant van de vrijstaande woning.....	92
Tabel 20: Milieuscores van de referentiewoningen en geometrische varianten van de vrijstaande woning.....	93
Tabel 21: Geometrische karakteristieken per bouwvariant van de rijwoningtypologie	109
Tabel 22: Variaties op de geometrische parameters van de halfopen woningtypologie.....	110
Tabel 23: Geometrische karakteristieken per bouwvariant van de halfopen woningtypologie	111

Tabel 24: Variaties op de geometrische parameters van de vrijstaande woningtypologie.....	112
Tabel 25: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de vrijstaande woningtypologie	113
Tabel 26: Variaties op de geometrische parameters van de appartementstypologie	114
Tabel 27: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de dak-hoek appartementstypologie.....	114
Tabel 28: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de dak-ingesloten appartementstypologie.....	115
Tabel 29: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de verdiepings-hoek appartementstypologie.....	116
Tabel 30: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de verdiepings-ingesloten appartementstypologie.....	117
Tabel 31: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de gelijkvloerse-hoek appartementstypologie.....	118
Tabel 32: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de gelijkvloerse-ingesloten appartementstypologie.....	119
Tabel 33: U-waardes en milieuscores per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m^2K en $kgCO_2/m^2$	137
Tabel 34: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, uitgedrukt in $kgCO_2/m^2$	137
Tabel 35: U-waardes en milieuscores per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m^2K en $kgCO_2/m^2$	138
Tabel 36: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, uitgedrukt in $kgCO_2/m^2$	138

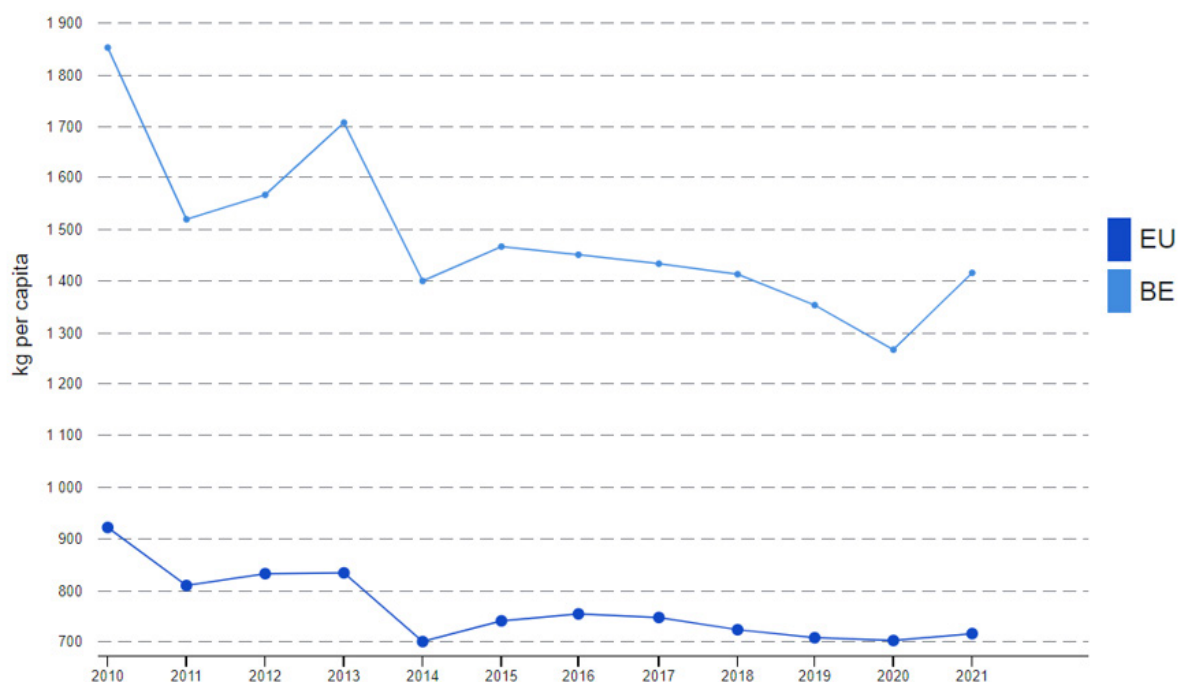
Lijst van afkortingen

EU	Europese Unie
BEN	Bijna-energieneutraal
LCA	Levenscyclusanalyse
ISO	International Standardization Organization
CEN	Comité Européen de Normalisation
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
WorldGBC	World Green Building Council
EPD	Environmental Product Declarations
RSP	Referentiestudieperiode
TOTEM	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
BVO	Brutovloeroppervlakte
MPG	MilieuPrestatie van Gebouwen
LCI	Levenscyclusinventarisatie
LCIA	Levenscyclusimpactanalyse
EPB	EnergiePrestatie en Binnenklimaat
OVAM	Openbare Vlaamse AfvalstoffenMaatschappij
GABI	Genomanalyse in biologischen System Pflanze
B-EPD	Belgische Environmental Product Declarations
mPt	Millipunten
PEF	Product Environmental Footprint
RW	Rijwoning
HO	Halfopen woning
VS	Vrijstaande woning
App(dak-hoek)	Dak-hoekappartement
App(dak-ing)	Dak-ingesloten appartement
App(ing-hoek)	Verdiepings-hoekappartement
App(ing-ing)	Verdiepings-ingesloten appartement
App(gv-hoek)	Gelijkvloers-hoekappartement
App(gv-ing)	Gelijkvloers-ingesloten appartement
VE	Vormefficiëntie
II	Ingebedde impact
OI	Operationele impact

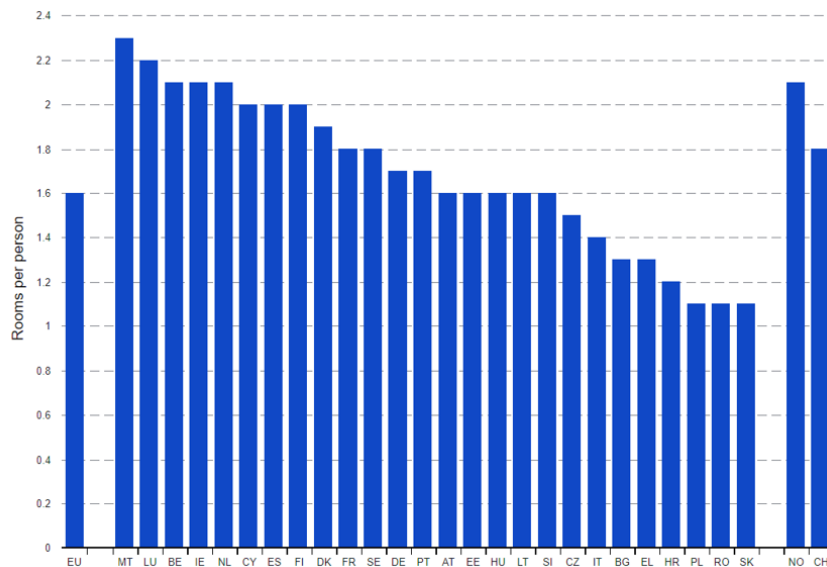
Hoofdstuk 1. Introductie

1.1. Klimaatproblematiek in de bouwsector

De klimaatopwarming en het aanpakken van deze problematiek zijn hedendaagse onderwerpen die steeds aan belangstelling winnen. De bouwsector levert hierbij een aanzienlijke bijdrage door het uitstoten van broeikasgassen, maar vervuult immers ook land en water. Zowel de constructie als de ingebruikname van een gebouw zijn verantwoordelijk voor de grote hoeveelheden aan energie- en bronconsumptie (Mouton et al., 2022). De bouwsector is echter verantwoordelijk voor minstens 37% van de globale CO₂-uitstoot (United Nations Environment Programme, 2022) en is hiermee de meest vervuilende sector (United Nations Environment Programme & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023). Bijgevolg wordt onderzoek naar broeikasgasemissies gevoerd. In 2021 onderzocht Eurostat (2023) de broeikasgasemissies afkomstig van het verbranden van fossiele brandstoffen voor ruimteverwarming, sanitair warm water, koken en koeling per land. Hieruit blijkt dat België 1400 kg broeikasgas per inwoner uitstoot. Hierdoor is België de derde grootste milieuvervuiler binnen de Europese Unie. Figuur 1 toont de milieu-impact voor België in de periode 2010 – 2021. Vergeleken met het gemiddelde van de Europese Unie, weergegeven met de donkere lijn, torent België zeer hoog boven deze waarden uit. Verder doet Eurostat (2023) in 2022 een bijkomend onderzoek naar de grootte van de woningen per land waarbij de resultaten te zien zijn in figuur 2. Hieruit blijkt dat België samen met Nederland en Ierland de derde plaats in grootste woningen deelt. De drie landen vertonen elk een gemiddelde van 2,1 kamers per persoon. Dit wordt gekoppeld aan een materiaalvoetafdruk waardoor het onderzoek impliceert dat België een 31,25% hogere materiaalvoetafdruk veroorzaakt dan het Europese gemiddelde.



Figuur 1: Milieu-impact van huisvesting daterend van 2010 tot 2021 (Eurostat, 2023)



Figuur 2: Gemiddelde grootte van huisvesting per land (Eurostat, 2023)

De bezorgdheid van de enorme bijdrage van de bouwsector aan de klimaatopwarming zorgt voor de ontwikkeling van reductiedoelen en regelgevingen in verband met het limiteren van de gebouwimpact (United Nations Environment Programme & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023). Zo hebben verschillende partijen, bestaande uit individuele landen en de EU, zich in 2015 verbonden tot het Akkoord van Parijs. Dit houdt in dat er wordt gestreefd naar een beperking op de globale temperatuurstijging tot ver onder 2°C en naar een stijging van maximaal 1,5°C, en dit tegen 2050 op Europees niveau. Hiervoor moet de globale uitstoot van broeikasgasemissie worden gereduceerd en moet een evenwicht ontstaan tussen de antropogene uitstoot en de opname van broeikasgasemissies, wat ook klimaatneutraliteit of netto-nuluitstoot wordt genoemd. Vanuit het Akkoord van Parijs hebben reeds verscheidene Europese landen reductiepaden ontwikkeld (Vlaamse Regering, 2019).

Ondanks de prominente rol van de bouwsector en het Akkoord van Parijs, zijn er vandaag de dag amper klimatologische ontwikkelingen die de uitstoot reeds verminderen. Dit komt doordat er de voorbije jaren voornamelijk onderzoek naar het reduceren van de operationele CO₂-uitstoot van een gebouw m.a.w. afkomstig van energie voor verwarming, koeling en verlichting, wordt gevoerd (United Nations Environment Programme & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023). Dit is eveneens te zien in 'Vlaamse klimaatstrategie 2050'. België ontwikkelde in dit kader een reductiepad met een limietwaarde voor de te behalen CO₂-uitstoot in 2050. Tabel 1 toont die emissiereductie voor het Vlaamse gebouwenpark. Het doel is de emissies te reduceren tot 2,3 MT CO₂-eq. Hierbij geldt voor de Belgische bouwsector een reductie van het energieverbruik – alsook de daaruit voortkomende emissies – van 75 % ten opzichte van het verbruik in 2015. Bovendien ligt dit in lijn met het Renovatiepact. Verder zal de verduurzaming van de energiemix de emissie opnieuw reduceren. Bijgevolg, om deze indicatieve waarde te bereiken, wordt in de eerste plaats ingezet op doorgedreven energie-efficiëntie en een beter beheer van energieverbruik in combinatie met een verregaande verduurzaming van de elektriciteits- en warmtevraag. Op die manier moet elke nieuwbouwwoning, sinds 2021, voldoen aan de eisen van een BEN-woning (Vlaamse Regering, 2019).

	1990	2005	2017	2030	2050
Elektriciteit	17,4	18,7	10,7	Onder EU ETS	Onder EU ETS
Industrie – ETS¹	29,3	24,3	21,0	Onder EU ETS	Onder EU ETS
Industrie – niet-ETS		4,4	5,7	3,6	1,2
Transport	12,8	15,9	16,0	12,2	0
Gebouwen	14,1	15,7	12,2	9,4	2,3
Landbouw	9,6	7,4	7,5	5,5	3,5
Afval²	3,2	2,9	2,4	1,4	0,1
Totaal niet-ETS		46,1	43,5	32,2	7,1

¹ Voor de ETS industrie schrijven we ons in binnen de context van een dalend emissieplafond dat wordt vastgelegd op EU niveau. In lijn met de recent aangenomen EU doelstelling om klimaatneutraal te zijn tegen 2050, voorziet de Commissie in haar 1.5LIFE scenario een reductie van -95% tegen 2050 t.o.v. 2005 voor alle stationaire ETS sectoren (dus elektriciteit + ETS industrie).

² Sector afval wordt in voorliggende visie toegelicht onder het hoofdstuk industrie omwille van de beleidsmatige link met circulaire economie.

Tabel 1: Indicatieve sectorale bijdragen (in Mton CO₂-eq) (Vlaamse Regering, 2019)

Hoewel het aanpakken van de operationele energie reeds zorgt voor een daling van de milieubelasting, is het eveneens van belang om de ingebedde CO₂-uitstoot onder handen te nemen. Dit werd in de voorgaande jaren altijd buiten beschouwing gelaten, terwijl de ingebedde emissies eveneens een significante invloed op de milieubelasting van een gebouw hebben (United Nations Environment Programme & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023). Het is gebruikelijk dat naarmate een gebouw meer energie-efficiënt wordt, de operationele impact verlaagt, wat immers vaak gepaard gaat met het toenemen van de ingebedde impact en de bijhorende broeikasgasemissies. Dit weerspiegelt de relatie tussen de operationele en ingebedde impact (Zimmermann et al., 2021). Bovendien blijkt in België dat 15% tot 18% van de totale milieu-impact te wijten is aan de materialen waaruit het gebouw is opgebouwd. Dit aandeel neemt echter toe bij het stijgen van de energie-efficiëntie (Vlaamse Regering, 2019).

Gezien het gebrek aan een benchmark en/of regelgeving naar het reduceren van de ingebedde milieu-impact, krijgt dit topic in verschillende landen steeds meer aandacht (Dascalaki et al., 2020). Dit blijkt uit meerdere studies die gevonden zijn tijdens het literatuuronderzoek en die later in de masterproef aan bod komen. Hoewel verschillende landen, zoals Denemarken en Nederland, verder staan in het ontwikkelen van een milieubenchmark, is het onderzoek in België eerder beperkt. Dit is voornamelijk te wijten aan het tekort in kennis over deze thematiek.

1.2. Definitie en relevantie van benchmarking

Een benchmark is volgens Kernerman Dictionaries (z.d.) ‘een vergelijking van kwaliteit en prestaties van een organisatie met die van vergelijkbare andere organisaties’. Toegepast op de context binnen de klimaatproblematiek in de bouwsector, is er echter nood aan benchmarks of referentiewaarden die de reductie van de milieu-impact meet en de efficiëntie van gebouwen beoordeelt. Een benchmark is bijgevolg een referentiepunt die vergelijking mogelijk maakt (Dimova & Gervasio, 2018).

Er wordt reeds duidelijk gemaakt dat de materialenimpact steeds aan belang wint (United Nations Environment Programme & Yale Center for Ecosystems + Architecture, 2023). Met betrekking tot energieprestatie is al heel wat regelgeving aanwezig, maar richt- of referentiewaarden waaraan de materiaalimpact moet voldoen, bestaan echter nog niet. Bovendien helpt, tijdens de ontwerpfase, het weten van de grootte van de milieubelasting bij het optimaliseren van een duurzaam ontwerp. Die optimalisatie is slechts beperkt, aangezien de ontwerper geen voeling heeft met het verbeteren van de milieuprestatie, bijvoorbeeld aan de hand van een bepaalde materiaalkeuze. Bijgevolg is er nood aan benchmarks die het toelaten om verschillende materiaalopties met elkaar te vergelijken (Hollberg et al., 2019). Hoewel benchmarkstudies steeds aan aandacht winnen binnen de Europese bouwindustrie, zijn er nog geen benchmarks beschikbaar om het Europese gebouwenbestand te evalueren (Dascalaki et al., 2020). Bijgevolg wordt in deze masterproef onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van een benchmark voor de Vlaamse residentiële gebouwen. Daarnaast wordt voornamelijk gezocht naar de invloed van de drie hoofdtermen - typologie, geometrie en materialiteit - op de milieuprestatie van een gebouw en bijgevolg eveneens op benchmarking. Hieruit wordt duidelijk welke typologieën, geometrieën en materialiteit, vanuit ecologische oogpunt, mogelijks in de toekomst zullen verdwijnen en hoe dit aan de hand van normalisatie versoepeld kan worden zonder het goedkeuren van nefaste scenario's.

Hoofdstuk 2. Methodische achtergrond van benchmarking

In de literatuur zijn verschillende types benchmarks, die elk op hun manier inzicht geven in de milieuprestatie van een gebouw, te vinden. Aangezien een benchmark dienst doet als referentiepunt om vergelijking tussen de prestatie van processen, producten of resultaten mogelijk te maken, dient eenzelfde methode gehanteerd te worden (Tozan et al., 2022). Het aanwenden van een specifieke methode kan immers leiden tot diverse resultaten. Vaak wordt de wijze waarop de milieu-impact wordt beoordeeld aan een bepaalde manier van benchmarking gekoppeld. Zo kan onderscheid tussen benchmarktypes, -systemen en certificatiesystemen worden gemaakt. Die kwantitatieve vormen van benchmarking zijn vaak vanuit een levenscyclusbenadering tot stand gekomen.

2.1. Benchmarktypes

Een benchmarktype wordt bepaald met een specifiek doel voor ogen. Op basis van dit doel worden volgens de norm ISO 21678 drie types onderscheiden: de limietwaarde, de referentiewaarde en de streefdoelwaarde (CEN, 2021). Tozan et al. (2022) voegt hier een extra waarde aan toe, namelijk de best practice-waarde. In tabel 2 worden de verschillende benchmarktypes opgesomd. Ten eerste wordt voor de limietwaarde een bijkomend onderscheid gemaakt tussen de boven- en ondergrens. De bovengrens representeert het 10^e of 25^e percentiel en is hierdoor de maximale acceptabele waarde op de evaluatieschaal. Dit wil dus zeggen dat slechts 10% of 25% van de doorgerekende gevallen zich onder die limietwaarde bevindt. De ondergrens vertoont immers het tegenovergestelde en wordt gedefinieerd als de laagste acceptabele waarde op een evaluatieschaal. Bijgevolg, toegepast op gebouwen, stelt het de minimumprestatie voor waaraan een gebouw moet voldoen. Analooq aan de bovengrens stelt het 90^e of 75^e percentiel de ondergrens voor, wat betekent dat 90% of 75% van de beschouwde gevallen zich onder die limietwaarde bevinden (Tozan et al., 2022). Vervolgens kijkt de referentiewaarde naar de huidige stand van zaken, waarbij dit ofwel als de mediaan ofwel als het gemiddelde kan worden beschouwd. In dit onderzoek zal de mediane waarde de rol van referentiewaarde op zich nemen. Bovendien is de referentiewaarde aan het hedendaagse bestaan gelinkt, waardoor dit in de toekomst steeds moet worden geüpdatet. Daarnaast is de best practice-waarde een waarde die door experimenten wordt bekomen en bijgevolg ook mee-evolueert met de tijd (Häkkinen, 2012). Het doelt op de beste beschikbare prestatie op basis van reële data (Tozan et al., 2022). Ten slotte wordt de streefdoelwaarde door een medium- of langdurig perspectief gekarakteriseerd. Het geeft de uiterste limiet van de evaluatieschaal aan en is bijgevolg het theoretisch hoogst haalbare niveau (Häkkinen, 2012).

Type of benchmark	Statistical analysis	Determination of reference level
Upper limit values	10th or 25th percentile	The upper acceptable performance level on a performance scale. 10% or 25% of all values shall be below this limit.
Reference value/ Baseline	Median, mean, or modal value	The present state of the art based on relevant statistical information that describes the performance of buildings.
Lower limit value	90th or 75th percentile	The minimum acceptable performance level on a performance scale. 90% or 75% of all values shall be below this limit.
Best practice	N/A	The level representing the best available real performance
Target value	N/A	This value is set by e.g. policy makers to set targets for varying performance aspects.

Tabel 2: De bestaande benchmarktypes (Tozan et al., 2022)

2.2. Benchmarksystemen

Benchmarks kunnen op twee manieren worden benaderd. Er bestaat enerzijds de top-down en anderzijds de bottom-up benadering. Top-down benchmarks zijn lange termijn benchmarkwaardes gebaseerd op politieke streefdoelwaarden. In gebouwcontext moeten die streefdoelwaarden vertaald worden naar gebouwspecifieke doelen om zo aan de top-down benchmark te kunnen voldoen. Daarnaast worden bottom-up benchmarks afgeleid uit theoretische waarden, wat voornamelijk technische en economische optimumwaarden zijn. Dit zorgt ervoor dat de bekomen waardes steeds veranderen met tijd en technologische vooruitgang, wat bovendien als de grootste moeilijkheid wordt ervaren (Häkkinen, 2012). Dit is de meest gebruikelijke benadering die in de hedendaagse literatuur wordt toegepast. Hierbij starten de studies vanaf een aantal referentiegebouwen die representatief zijn voor het gebouwenbestand en op basis van hun milieuscore wordt een bottom-up benchmark opgesteld. Daarnaast kunnen beide benaderingen worden gecombineerd tot de zogenaamde dual benchmarks. Hierin wordt de afweging tussen de theoretische en politieke streefdoelwaarde gemaakt (Hollberg et al., 2019).

2.3. Certificatiesystemen

Certificatiesystemen, in verband met de duurzaamheid van een gebouw, voorzien vrijwillige richtlijnen die de industrie motiveren meer duurzame gebouwen te ontwerpen en te bouwen. Die systemen hebben ervoor gezorgd dat het gebruik van een levenscyclusanalyse, of kortweg LCA, in de constructiesector is binnengedrongen (Tozan et al., 2022). Ze stellen de mogelijkheid om de duurzaamheidsprestatie van een gebouw te meten en te vergelijken door deze af te toetsen aan een set van diverse criteria (Guldager Jensen et al., 2018). Vandaag de dag zijn in Europa reeds verscheidene certificatiesystemen beschikbaar. Enkele voorbeelden zijn LEED, BREEAM en nationale initiatieven zoals de Duitse DGNB. Het merendeel van die systemen wordt georganiseerd door de nationale Green Building Councils (Tozan et al., 2022). De World Green Building Council (WorldGBC) houdt zich bovendien bezig met het opnemen van duurzame en

de-gecarboniseerde gebouwomgevingen. Dit doen ze voor de gehele bevolking overal ter wereld. Ze werken samen met bedrijven, organisaties en regeringen om de ambities van het Parijse Akkoord en UN Global Goals for Sustainable Development over te brengen (World Green Building Council, 2024). Analooq aan de benchmarksysteemen, treden verschillen tussen de initiatieven op. Het onderscheid bevindt zich in de reikwijdte, methode en ambities per certificatiesysteem (Tozan et al., 2022).

Om te beginnen is BREEAM het eerste certificatiesysteem dat tot stand kwam om de milieuprestatie van individuele gebouwen te beoordelen. Het vormt bijgevolg de basis voor verscheidene ontwikkelingen. Zo baseren vele andere organisaties, zoals de Vlaamse overheid (z.d.) met de opkomst van de Duurzaamheidsmeter Wijken, zich op de principes van BREEAM voor het ontwikkelen van een eigen systeem. De BREEAM-certificering werkt op basis van zes adjectieven, die de niveaus beschrijven. Die niveaus beoordelen verschillende elementen, zoals water, transport, materialen, energie en vervuiling, waarbij het volgende zes adjectieven onderscheidt: uitmuntend (outstanding), voortreffelijk (excellent), zeer goed (very good), goed (good), geslaagd (pass) en acceptabel (acceptable). Elk adjectief wordt gelinkt aan een specifieke score uitgedrukt in procenten. De bijhorende percentage zijn respectievelijk hoger dan 85%, tussen 70% en 85%, tussen 55% en 70%, tussen 45% en 50%, tussen 30% en 45%, onder 30% (Guldager Jensen et al., 2018).

Vervolgens is LEED, die zich inspireert op BREEAM, geografisch gezien, het meest gebruikelijke certificatiesysteem. Dit kader laat toe om de identificatie en beoordeling van duurzaamheid in ontwerp, constructie, gebruik en onderhoud te beoordelen. Het certificatieproces wordt opgesplitst in twee delen, met name de ontwerp- en de constructiefase, en resulteert voor elk deel in beoordelingspunten die vervolgens het certificatieniveau vastleggen. Zo worden de vier volgende niveaus onderscheiden: gecertificeerd, zilver, goud en platina. Daarnaast bestaat ook het Duitse certificatiesysteem DGNB, dat zich baseert op de Duitse standaarden, waarbij het niet enkel op duurzaamheid, maar eveneens op goede technische en proceskwaliteit focust. Bovendien laat de flexibiliteit van het systeem een gemakkelijke aanpassing voor verscheidene gebouwtipes toe. Uiteindelijk bestaan twee types DGNB certificaten: een pre-certificatie en een finaal certificaat. Analooq aan LEED, resulteert DGNB eveneens in certificatieniveaus, maar hier wordt immers enkel onderscheid gemaakt tussen zilver, goud en platina. In uitzonderlijke gevallen kan het certificaat nog met het diamant-niveau worden aangevuld (Guldager Jensen et al., 2018).

2.4. Levenscyclusanalyse

De genoemde types van benchmarking uit vorige paragrafen vertrekken vanuit een LCA-methodiek. Aangezien het genereren van inzicht in de milieuprestatie van gebouwen een essentieel gegeven is, wordt op die LCA-methodiek gesteund (Servaes et al., 2023). In dit kader ontstaan verscheidene normen, zoals ISO-normen 14040 (CEN, 2020a) en 14044 (CEN, 2020b), die de basisprincipes van het uitvoeren van een LCA in detail beschrijven. Volgens die normen is een levenscyclusanalyse een wetenschappelijke methode voor het kwantificeren van de milieubelasting van een product, een gebouwelement of een geheel gebouw tijdens de volledige levenscyclus. Met oog op LCA stelt de ISO-norm 14040 (CEN, 2020) vier hoofdstappen die ondernomen dienen te worden voorop: doelbepaling en reikwijdte, levenscyclusinventarisatie, impactanalyse en interpretatie (Janssen et al., 2013).

Overigens wordt in 2005 het Technisch Comité CEN TC 350: '*duurzaamheid van constructies*' opgericht. Zij ontwikkelen een aantal geharmoniseerde methoden voor de evaluatie van duurzaamheids-aspecten, zowel vanuit een milieutechnisch, sociaal als economisch oogpunt. Het heeft als doelstellingen enerzijds de duurzaamheidsaspecten van nieuwe en bestaande bouwwerken te bewerkstelligen en anderzijds het opstellen van milieuverklaringen type III voor bouwproducten. Die milieuverklaringen type III worden ook *Environmental Product Declarations* of *EPD's* genoemd. De werkgroepen, die zich bezighielden met het opstellen van die harmoniserende methode, hebben daarnaast twee Europese normen gepubliceerd. De publicatie van de Europese norm NBN EN 15804 (CEN, 2021a) beschrijft bouwproducten, terwijl NBN EN 15978 (CEN, 2012) zich toewijdt aan gebouwen (Janssen et al., 2013).

Bovendien wordt in een LCA rekening gehouden met de levenscyclus van een gebouw of product. Figuur 3 vat samen welke processen en activiteiten plaatsvinden tijdens een bepaalde levenscyclusfase van een bouwproduct, gebouwelement of geheel gebouw (Janssen et al., 2013). Zo onderscheiden zich volgens de norm NBN EN 15804 (CEN, 2021a) vier fasen, die op hun beurt overeenkomen met een specifieke module: productie-, constructie-, gebruiks- en eindelevensfase. Zo specificeert een LCA de modules A tot D, die elk in individuele deelfasen worden opgesplitst. De productie- en constructiefase worden samengenomen onder de module A. Vervolgens omvatten de gebruiksfase en eindelevensfase respectievelijk module B en C. Om uiteindelijk te eindigen bij module D die de voordelen van hergebruik, recyclage of herstelling in kaart brengt, dewelke vaak achterwege worden gelaten wegens een gebrek aan kennis (Tozan et al., 2022). Daarnaast wordt de milieu-impact voor de individuele levenscyclusfasen berekend over een bepaalde referentiestudieperiode (RSP). Aan het einde van die periode wordt het gebouw afgebroken om zo het levenscyclusperspectief te vervolledigen. In het achterhoofd moet worden gehouden dat, in de meeste gevallen, de werkelijke levensduur van een gebouw vaak langer is dan de aangenomen RSP (Zimmermann et al., 2021).



Figuur 3: De verschillende fasen bij een levenscyclusanalyse (LCA) (Wastiels et al., 2021)

Niet alle levenscyclusfasen worden altijd meegenomen in een LCA en is sterk afhankelijk van land tot land. Dit hangt immers af van de focus die men heeft en het ontbreken van informatie en ervaring in bepaalde fasen. Zo wordt bijvoorbeeld in Denemarken de focus enkel op de belangrijkste levenscyclusfasen, met name de productiefase, vervanging, operationeel energieverbruik, afvalverwerking en -verwijdering, gelegd (Zimmermann et al., 2021).

Elke activiteit in een bepaalde levenscyclusfase vraagt een bepaalde input, zoals primaire grondstoffen, energie, hulpbronnen en land. Uit het proces of de activiteit volgt eveneens een output. Dit vertaalt zich in (bij)producten, emissies, gewijzigd landschap en afval (Janssen et al., 2013). Het samennemen van de output resulteert in een milieuprofiel, waarbij de resultaten opgesplitst kunnen worden in ingebedde en operationele emissies. Ingebedde emissies zijn rechtstreeks aan de bouwproducten, de constructie en de afbraak geassocieerd (Andersen et al., 2023). Dit wil zeggen dat ingebedde emissies vrijkomen in de productie- en constructiefase (module A), de gebruiksfase (module B, deelfase B1 tot B5) en de eindelevensfase (module C). De vrijgekomen emissies in de drie modules worden respectievelijk *upfront carbon*, *use stage carbon* en *end-of-life carbon* genoemd (Tozan et al., 2022). Daarentegen worden emissies geleverd door het operationeel gebruik van energie operationele emissies genoemd. De levenscyclusfasen die deze energie omarmen zijn de modules B6 en B7 (Andersen et al., 2023).

De drie gewesten in België hebben samen een tool ontwikkeld om de milieueffecten van gebouwen of gebouwelementen over hun volledige levenscyclus te beoordelen. Hierdoor kan de tool hulp bieden bij het optimaliseren van bouwkundige keuzes en het beperken van de milieueffecten van een bouw- en/of renovatieproject door een vergelijking van de ontwerpvarianten toe te laten. De Belgische tool staat bekend onder de naam TOTEM, voluit 'Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials'. Aan de hand van een LCA-berekening meet TOTEM de milieueffecten voor diverse milieu-indicatoren, die in lijn liggen met de Europese normen. De resultaten van de verschillende indicatoren worden door de tool tot één getalscore geaggregeerd om een vereenvoudigde interpretatie toe te laten (Wastiels et al., 2021).

Hoofdstuk 3. Literatuuronderzoek

Er is heel wat literatuur beschikbaar over de ontwikkeling en het opstellen van een benchmarkwaarde. Hoewel het reduceren van de milieu-impact van gebouwen in Europese context steeds aan aandacht wint, is er nog steeds gebrek aan duidelijkheid in de methodiek naar benchmarking. In dit hoofdstuk worden tien verschillende bronnen, afkomstig uit zeven Europese landen, aan de hand van bepaalde thematieken en invloedparameters uitgelicht. Tabel 3 geeft een overzicht van die bronnen met de bijhorende resultaten en kenmerken. De gehanteerde methodiek in elk van die studies is de bottom-up approach, dewelke ook in dit thesisonderzoek zal worden ingezet. Vervolgens wordt afgesloten met de vergelijking van de reeds bekomen en verplichte benchmarks in de Europese landen. Hierbij komen zowel top-down en bottom-up als dual benchmarks aan bod.

Bron	Land	Aantal cases	Typologie	Ingebedde emissies	Operationele emissies	Totale milieu-score	Eenheid	Functionele eenheid	RSP [jaar]	Modules
(Mouton et al., 2022)	België	12	één- en meergezin- woningen	415	764	1206	kgCO ₂ - eq/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	60	A1-A5, B2, B4, B6, C1- C4
(Mouton et al., 2022)	België	12	één- en meergezin- woningen	45	39	82	mPt/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	60	A1-A5, B2, B4, B6, C1- C4
(Mouton et al., 2023)	België	5	ééngezins- woningen	49	40	89	mPt/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	60	A1-A5, B2, B4, B6, C1- C4
(Mouton et al., 2024)	België	117	één- en meergezin- woningen	613	382	1015	kgCO ₂ - eq/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	60	A1-A5, B2, B4, B6, C1- C4
(Mouton et al., 2024)	België	117	één- en meergezin- woningen	63	41	107	mPt/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	60	A1-A5, B2, B4, B6, C1- C4
(Zimmermann et al., 2021)	Denemarken	60	residentieel en utiliteit	183,5-542	11-229	475	kgCO ₂ - eq/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	50	A1-A3, B4, B6, C3-C4
(Zimmermann et al., 2021)	Denemarken	60	residentieel en utiliteit	248,8-760	13,6-344	640	kgCO ₂ - eq/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	80	A1-A3, B4, B6, C3-C4
(Zimmermann et al., 2023)	Denemarken	23	renovaties: residentieel en utiliteit	140	350	490	kgCO ₂ - eq/m ²	m ² bruto- vloeroppervlakte	50	A1-A3, B4, C3-C4

(Décret n° 2021-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023)	Frankrijk	ongekend	residentieel, limietwaarde 2022	/		640	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B4, B6, C1-C4
(Décret n° 2021-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023)	Frankrijk	ongekend	residentieel, limietwaarde 2030	100	4	415	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B4, B6, C1-C4, D
			meergezinswoningen				kgCO ₂ -eq/m ²	m ² netto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B7, C1-C4
(Izaola et al., 2023)	Spanje	ongekend	meergezinswoningen (2013)	598,75	1345,25	1944	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² netto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B7, C1-C4
(Izaola et al., 2023)	Spanje	ongekend	meergezinswoningen (BEN)	229,46	515,54	745	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² netto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B7, C1-C4
(Braune et al., 2021)	Duitsland	50	residentieel en kantoren	435	/	/	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B5, C1-C4
			residentieel en utiliteit, renovaties				kgCO ₂ -eq/m ²	m ² verwarmd vloeroppervlakte	60	A1-A3, B4
(Wiik et al., 2020)	Noorwegen	113		396	/	/	kgCO ₂ -eq/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	75	A1-A5, B1-B5, C1-C4, D
(W/E adviseurs, 2017)	Nederland	ongekend	residentieel	33	/	/	€/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	50	A1-A5, B1-B5, C1-C4, D
(W/E adviseurs, 2017)	Nederland	ongekend	kantoren	24	/	/	€/m ²	m ² bruto-vloeroppervlakte	50	

Tabel 3: Overzicht van bestaande bottom-up benchmarks

3.1. Levenscyclusfasen

De eerste vragen bij het opstellen van een benchmark zijn: wat willen we beoordelen? Wordt de volledige levenscyclus van een gebouw bekeken of wordt enkel rekening gehouden met een aantal individuele levenscyclusfasen? Wordt er gekeken naar het volledige gebouw of slechts naar een beperkt aantal gebouwelementen (Hollberg et al., 2019)?

Uit tabel 3 blijkt dat de productiefase (A1-A3) de enige levenscyclusfase is die in elke milieubeoordeling wordt meegenomen. Verscheidene onderzoeken concluderen dat die modules vaak de meest invloedrijke bijdragers zijn (Mouton et al., 2023; Özdemir et al., 2022; Zimmermann et al., 2021 en Wiik et al., 2020). Bijgevolg is het niet onlogisch dat de productiefase in elk van bovenstaande studies wordt beoordeeld. Hetzelfde geldt eveneens voor de vervangingen (B4) in de gebruiksfase. Volgens Wiik et al. (2020) levert ook de module B4 een aanzienlijke bijdrage, waarbij in Noorwegen slechts enkel de grootste bijdragers van de levenscyclusfasen, zoals A1-A3 en B4, worden meegenomen. In de studies van Mouton (2022, 2023, 2024), Décret n° 2012-1004 (2021, als in Izaola et al., 2023), Braune et al. (2021), (Izaola et al., 2023) en W/E adviseurs (2017) worden zowel de volledige module A als C, respectievelijk productie- en constructiefase en eindelevensfase, beschouwd. Gezien het merendeel van de studies beide modules in rekening brengen, kan hieruit worden geconcludeerd dat eveneens de eindelevensfase een behoorlijke invloed op de milieubelasting heeft en dat er reeds een degelijke kennis over bestaat. Bovendien wordt in elk onderzoek, met uitzondering van Noorwegen, uit de eindelevensfase telkens de afvalverwerking en -verwijdering meegenomen in de analyse (Mouton et al., 2022, 2023, 2024; Zimmermann et al., 2021, 2023; Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023; Braune et al., 2021; Izaola et al., 2023; W/E adviseurs, 2017). Volgens Zimmermann et al. (2021) zijn niet enkel de productiefasen en de vervangingen de meest invloedrijke bijdragers. Ook het operationeel energiegebruik (B6) en de afvalproductie en -verwijdering (C3-C4) tonen een significante invloed.

Welke modules van de gebruiksfase in de onderzoeken worden meegenomen, toont een grote spreiding. In de studies van Zimmermann et al. (2023), W/E adviseurs (2017), Wiik et al. (2020) en Braune et al. (2021) wordt de analyse enkel uitgevoerd voor de ingebedde emissies. Het operationeel energiegebruik (module B6) wordt bijgevolg buiten beschouwing gelaten. Daarentegen beoordelen de analyses van Mouton et al. (2022, 2023, 2024), Zimmermann et al. (2021), Décret n° 2012-1004 (2021, als in Izaola et al., 2023) en Izaola et al. (2023) de milieu-impact van een gebouw zowel aan de hand van de ingebedde als operationele emissies. Bijgevolg is het mogelijk om op die manier twee individuele benchmarkwaardes voor enerzijds ingebedde en anderzijds operationele emissies te bekomen (Hollberg et al., 2019).

Hoewel de kennis over module D eerder beperkt is, voegen W/E adviseurs (2017) toch hergebruik, herstelling en recyclage (module D) aan de milieubeoordeling toe. Volgens de tabel wordt eveneens in Frankrijk module D in rekening gebracht. Echter wil de Franse wetgeving RE2020 tegen 2030 een schatting van de module meenemen in de LCA-analyse (Décret n° 2021-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023). Volgens Stichting Nationale Milieudatabase (2022) wordt de levenscyclusfase D in de milieuanalyse beoordeeld door het grondstoffenequivalent te bepalen. Dit equivalent geeft de hoeveelheid en welk primaire productieproces aan dat een secundair materiaal of secundaire brandstof kan uitsparen.

3.2. Functionele eenheid

Volgens Souza et al. (2021) is m^2 vloeroppervlakte de meest gebruikelijke functionele eenheid. Uit de tabel blijkt dat elke beschouwde studie de vloeroppervlakte als functionele eenheid inzet. Hierbij wordt een bijkomend onderscheid gemaakt tussen m^2 nettovloeroppervlakte, m^2 brutovloeroppervlakte en m^2 verwarmde vloeroppervlakte. De studie van Wiik et al. (2020) verkiest als enige m^2 verwarmde vloeroppervlakte als functionele eenheid. In tegenstelling tot de studie van Wiik et al. (2020), opteren de meeste studies voor de brutovloeroppervlakte (Mouton et al., 2022; Mouton et al., 2023; Mouton et al., 2024; Zimmermann et al., 2021; Braune et al., 2021; W/E adviseurs, 2017 en Zimmermann et al., 2023), terwijl Izaola et al. (2023) kiezen voor nettovloeroppervlakte. Naast m^2 vloeroppervlakte is het volgens Souza et al. (2021) ook mogelijk een LCA genormaliseerd naar andere functionele eenheden uit te voeren. De onderzoekers specificeren volgende opties: personen equivalent, m^3 , comfort, volledig gebouw. In deze masterproef wordt eveneens kritisch omgegaan met de normalisatiefactor (m^2 brutovloeroppervlakte). Die factor wordt in vraag gesteld en er wordt gezocht naar diverse mogelijke opties als functionele eenheid.

3.3. Referentiestudieperiode

Een LCA wordt uitgevoerd over een bepaalde levensduur of referentiestudieperiode. Uiteindelijk resulteert dit in een score die de totale milieubelasting beschrijft, waarin het aantal vervangingen van materialen afhankelijk is van de referentiestudieperiode (W/E adviseurs, 2017). De beschouwde studies leggen, vanuit hun onderzoek, een bepaalde levensduur vast, maar dat is niet altijd het geval. In studies waarbij de referentiestudieperiode niet op voorhand is vastgelegd, gaat men uit van een defaultwaarde van 50 jaar, om zo een uiteindelijke vergelijking tussen individuele benchmarks toe te laten (Trigaux et al., 2021).

Bovendien opteert de meerderheid van de onderzoeken voor een RSP van 50 jaar (Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023; Braune et al., 2021; Izaola et al., 2023 en Zimmermann et al., 2023). Analooq gaan W/E adviseurs (2017) uit van een levensduur van 50 jaar voor kantoorgebouwen, maar voor residentiële gebouwen wordt echter een langere levensloop van 75 jaar voorzien. Daarnaast analyseren Zimmermann et al. (2021) in een eerste deelonderzoek 60 gebouwen aan de standaardwaarde en vergelijkt dit vervolgens met een langere levensduur van 80 jaar. Uit de resultaten concluderen de onderzoekers dat de productiefase (A1-A3), de afvalverwerking en verwijderingsfase (C3-C4) lagere waardes aannemen bij een toenemende levensduur. Dit is te wijten aan het spreiden van de belasting over een langere periode. Bijkomend verlaagt eveneens de impact van het operationele energieverbruik (B6) omdat de onderzoekers rekening houden met het toekomstig stijgend gebruik van hernieuwbare energie. Het aantal vervangingen over een periode van 80 jaar is echter hoger, waardoor module B4, in tegenstelling tot vorige modules, toeneemt bij een hogere RSP. De emissies die vrijkomen tijdens die extra vervangingen wegen niet op tegen de reductie van overige modules. Evenals Zimmermann et al. (2021) vinden W/E adviseurs (2017) een gelijkaardige conclusie wanneer de resultaten van een 50-jarige levensduur wordt vergeleken met die van een RSP van 75 jaar. Hieruit volgt

rechtstreeks: een langere levensduur zorgt voor een lagere milieubelasting, maar die afname is niet evenredig met het toenemen van de levensduur (W/E adviseurs, 2017). In tegenstelling tot de defaultwaarden en invloeden van een langere levensduur, opteren studies van Mouton et al. (2022, 2023, 2024) en Wiik et al. (2020) voor een RSP van 60 jaar. Aangezien deze masterproef zich toewijdt aan Vlaamse referentiegebouwen, wordt net als in de studies van Mouton (2022, 2023, 2024) de gebouwanalyses op basis van een referentiestudieperiode van 60 jaar uitgevoerd.

3.4. Gebouwtypologie

De literatuur vertoont een brede waaier aan beschouwde gebouwtypologieën. Enkele studies nemen enkel residentiële gebouwen voor hun rekening (Mouton et al., 2022, 2023, 2024; Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023 en Izaola et al., 2023), terwijl de overige studies zowel residentiële gebouwen als utiliteitsfuncties onderzoeken (Zimmermann et al., 2021, 2017; Braune et al., 2021; Wiik et al., 2020 en W/E adviseurs, 2017). De onderzochte gebouwtypes binnen de residentiële en utiliteitsgebouwen verschillen naar gelang het onderzoek. Zo analyseert Mouton et al. (2023) slechts drie residentiële gebouwtypologieën: vrijstaande, halfopen en rijwoningen. Hierbij voegen Mouton et al. (2022, 2024) een vierde typologie – appartementen – aan toe. Analooch beschouwen W/E adviseurs (2017) diezelfde vier woningtypes, maar beschouwen bijkomend het galerijtype en een aantal kantoorgebouwen. Daarnaast bekijken Zimmermann et al. (2021), Décret n° 2012-1004 (2021, als in Izaola et al., 2023) en Zimmermann et al. (2023) vrijstaande woningen, rijwoningen en appartementen, terwijl Izaola et al. (2023) slechts enkel een appartementsgebouw representatief voor het Spaanse gebouwenbestand analyseert. Bijkomend analyseren Zimmermann et al. (2021), naast woningen, eveneens kantoorgebouwen, een school, een ziekenhuis en multifunctionele gebouwen. Ook in de volgende studie van Zimmermann et al. (2023) worden utiliteitsfuncties, zoals een cultureel gebouw, kantoorgebouwen, een hotel, een ziekenhuis en een instituut beschouwd. Hoewel Braune et al. (2021) en Wiik et al. (2020) niet specificeren welke residentiële gebouwtypes onder de loep worden genomen, analyseren Braune et al. (2021) daarnaast voornamelijk kantoorgebouwen, terwijl Wiik et al. (2020) focussen op een bib, musea, een kinderopvang, rusthuizen, kantoren, scholen, zwembaden, een sporthal en een hotel. Analooch aan de studies van Mouton et al. (2022, 2023, 2024) wordt in deze masterproef de focus enkel op residentiële gebouwen gelegd.

Verschillende studies tonen aan dat het gebouwtipe een invloed heeft op de bekomen benchmark. Dit ondervinden Mouton et al. (2022, 2023, 2024) bij het bestuderen van verschillende typologieën van residentiële gebouwen. Hierbij speelt voornamelijk de compactheid van de gebouwtypologie een significante rol. Uit de onderzoeken blijkt dat de meest compacte gebouwtypologieën, zoals appartementseenheden en rijwoningen, resulteren in de laagste milieu-impact. Ondanks dat een unit van een appartement de meest compacte geometrie kent, stijgt de milieu-impact van de wooneenheid op zich door een bijkomende verdeling van de belasting van de gemeenschappelijke delen (Mouton et al., 2022). Eveneens W/E adviseurs (2017) en Zimmermann et al. (2021) ondervinden een analoge conclusie.

3.5. Indicatoren en eenheden

Uit tabel 3 wordt duidelijk dat de meeste onderzoekers hun resultaten uitdrukken volgens de milieu-impactindicator klimaatverandering of climate change (Mouton et al., 2022, 2024; Zimmermann et al., 2021, 2023; Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023; Braune et al., 2021; Izaola et al., 2023 en Wiik et al., 2020). Die milieu-impactindicator wordt door de bijhorende eenheid kg CO₂-equivalenten gekenmerkt (Janssen et al., 2013), waardoor dit in combinatie met de functionele eenheid m² vloeroppervlakte leidt tot kg CO₂-eq/m². Hoewel CO₂-equivalenten de meest voorkomende uitstoot is, tonen Mouton et al. (2024) aan dat een verschuiving van meest invloedrijke milieu-impactindicator in de toekomst mogelijk is. De onderzoekers bewijzen dit door varianten op de onderzochte cases te maken die aan toekomstgerichte regelgeving voldoen. Uit die resultaten concluderen de onderzoekers de verschuiving in meest nefaste indicator. Dit resulteert echter niet meer in de klimaatverandering, maar in de uitputting van abiotische grondstoffen/mineralen. Hieruit rijst de vraag of het uitdrukken van de resultaten in CO₂-equivalenten in de toekomst nog relevant zal zijn.

Bovendien drukt Mouton et al. (2022, 2023, 2024) naast het broeikaseffect, de resultaten ook uit in mPt (millipunten). Dit is te wijten aan de gebruikte Belgisch LCA-tool TOTEM, waaruit een geaggregeerde milieuscore, rekening houdend met twaalf milieu-impactindicatoren, resulteert (Mouton et al., 2024). In tegenstelling tot vorige bronnen, kijken W/E adviseurs (2017) naar een compleet andere eenheid, namelijk schaduwkosten. Die schaduwkosten worden uitgedrukt in €. Hieruit volgt de geaggregeerde score uitgedrukt in €/m².

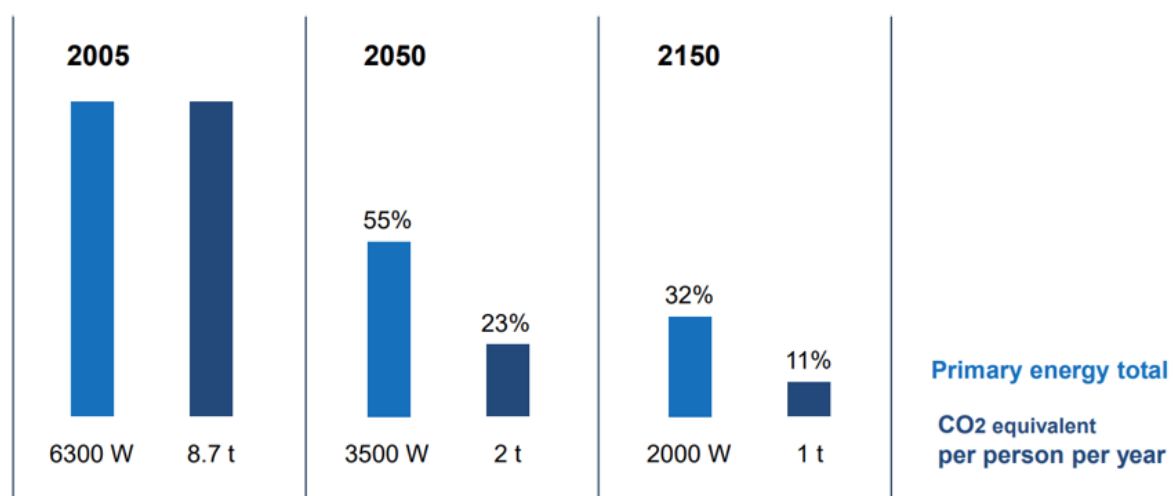
3.6. Benchmarks in Europese context

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de reeds bestaande en verplichte benchmarks in Europa. Startende met de top-down benchmarks wordt vervolgens overgegaan naar de bottom-up benchmarks. Om uiteindelijk te eindigen met de dual benchmarks. Waar mogelijk worden de benchmarkwaardes met elkaar vergeleken, al is dit vaak een complexe opgave. Hoewel een vergelijking niet onmogelijk is, zijn benchmarks echter landafhankelijk (en studieafhankelijk) omwille van bouwmethododes, energie-eisen, gebouwtypologieën, toegepaste methodiek, etc. Toch gaat Röck et al. (2022) op zoek naar een benchmarkingsysteem op Europees vlak. Hierbij bestaat de moeilijkheid data van verschillende landen te aggregeren tot een Europese referentiewaarde. Bovendien stellen de onderzoekers twee hoofdparameters – levenscyclusfasen en beoordelingsmethode – voorop die verschillen en de vergelijkbaarheid tussen benchmarks beïnvloeden.

3.6.1. Top-down benchmarks

Röck et al. (2020) stellen een algemeen doel voor de milieuprestatie van een residentieel gebouw voorop. Vertrekkende vanuit het Parijse Akkoord wordt een algemeen geldende en vereenvoudigde berekening gemaakt. Hierbij koppelen ze een reductie van de broeikasgasemissies van 1 ton CO₂-eq per persoon per jaar aan de doelstelling in verband met het limiteren van de globale opwarming tot 1,5°C. Die reductie dient als een tussentijds doel op weg naar ‘net-zero’. Er wordt veronderstelt dat men gebouwen kan – en uiteindelijk ook moet – ontwerpen op een manier waarbij de operationele broeikasgasemissies gelijk zijn aan nul, waardoor de begroting van de uitstoot van broeikasgasemissies bijgevolg volledig te danken is aan de ingebedde emissies. In deze context bedraagt ‘near-zero’, volgens Röck et al. (2020), 1-2 kg CO₂-eq/m²/jaar aan ingebedde emissie.

Analoog ontwikkelt Zwitserland in dit kader een strategie, de SIA 2040. Het beschrijft een energie-efficiëntie-pad waarbij een benchmarksysteem volgens de 2000-Watt-Society wordt opgesteld. Figuur 4 weerspiegelt die reductie. Zo legt het een streefdoel vast voor 2050 en 2150, waarbij, in vergelijking met 2005, in 2150 drie keer minder energie wordt verbruikt en negen keer minder broeikasgasemissies in onze leefwereld terecht komen. In 2050 streeft men echter naar 2 ton CO₂-equivalent per persoon per jaar. Hieraan gekoppeld worden richtlijnen van drie individuele benchmarkwaardes, uitgedrukt in kg CO₂-eq/m², verworven. Het streefdoel is bovendien opgesplitst in een richtwaarde voor ingebedde en operationele emissies en een bijkomende waarde voor mobiliteit. Voor de volledigheid wordt de richtlijn voor mobiliteit vermeld, maar valt verder buiten het bereik van dit onderzoek. De waarde voor constructie en onderhoud bedraagt 9 kg CO₂-eq/m², over een referentiestudieperiode van 60 jaar. Gezien de grote aandacht naar het reduceren van operationele energie, is de richtwaarde voor de operationele emissie heel wat lager. Het bedraagt slechts 2 kg CO₂-eq/m². Het totale ontwerpdoel, exclusief mobiliteit, is bijgevolg gelijk aan 11 kg CO₂-eq/m² (Aumann, 2019).



Figuur 4: 2000-Watt Society doelen (Aumann, 2019)

Denemarken maakt gebruik van de Reduction Roadmap, een manier die helpt bij het ontwikkelen van een operationele tool voor de constructiesector. Het doel is het opstellen van een tijdslijn waarbij de planetaire grenzen voor klimaatverandering worden vertaald naar reductiedoelen voor nieuwe residentiële gebouwen. Die tijdslijn steunt op de CO₂-budgetten van het Parijse Akkoord. Die budgetten worden verdeeld over de verschillende landen op basis van het percentage aan bevolking in dat land (Hill-Hansen et al., 2022). De Vlaamse klimaatstrategie (Vlaamse Regering, 2019) en Reduction Roadmap (Hill-Hansen et al., 2022) geven een limietwaarde geldend respectievelijk voor de gehele bouwsector en residentiële gebouwen. Zo geldt voor Denemarken, na verscaling naar het Deense aandeel, een limiet op CO₂-emissies van 1,9 miljoen ton CO₂-eq/jaar. De hiervoor voorziene deadline is het jaar 2030 (Hill-Hansen et al., 2022). Op analoge wijze geldt voor België een limietwaarde van 2,3 miljoen ton CO₂-eq, met de uiterste deadline tegen 2050 (Vlaamse Regering, 2019).

De studies van Röck et al. (2020) en de Zwitserse strategie SIA 2040 (Aumann, 2019), stellen gelijke streefwaarden van de CO₂-uitstoot per persoon per jaar voorop. Beide kijken ze eveneens naar de streefwaarden geldend voor het concept BEN-woning, waarbij de waarden verschillen met 10 kg CO₂-eq/m². In België en Denemarken wordt echter niet per individueel gebouw gekeken, maar wordt uitgegaan van het (residentiële) gebouwenpark. De focus van de vier studies ligt telkens op andere aspecten waardoor een vergelijking tussen de individuele top-down benaderingen wordt bemoeilijkt. Onderzoek naar hoe top-down benchmarks worden vertaald naar individuele gebouwen is bovendien nodig, alsook de manier waarop gebouwen aan die vooropgestelde eis kunnen voldoen. De top-down benchmarks zullen bijgevolg verschillen van land tot land.

3.6.2. Bottom-up benchmarks

In tabel 3 worden per studie de gevonden bottom-up benchmarkwaardes weergegeven. Hoewel bepaalde landen reeds benchmarks in hun regelgeving hebben geïmplementeerd (Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023; Braune et al., 2021 en MilieuPrestatie Gebouwen – MPG, 2017), zijn andere waarden gebaseerd op lopend onderzoek met als doel om nationale benchmarks op te stellen (Mouton et al., 2022, 2023, 2024; Zimmermann et al., 2021, 2023; Izaola et al., 2023 en Wiik et al., 2020). Waarbij de ene studie zich focust op de totale milieubelasting met eventueel bijkomende benchmarks voor ingebedde en operationele emissies (Mouton et al., 2022, 2023, 2024; Zimmermann et al., 2021, 2023; Izaola et al., 2023 en Décret n° 2012-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023), zet het ander onderzoek immers enkel in op ingebedde emissies (Braune et al., 2021; Wiik et al., 2020 en W/E adviseurs, 2017).

De paragraaf wordt ingeleid met de vooropgestelde benchmarkwaardes in België. Hoewel nog geen definitieve limietwaarde is ontwikkeld, zoeken Mouton et al. (2022, 2023, 2024) naar een referentiewaarde voor de Vlaamse residentiële gebouwen. In de eerste studie vinden de onderzoekers een totale milieubelasting van 82 mPt/m² of 1206 kg CO₂-eq/m² (Mouton et al., 2022). In de daaropvolgende studie wordt een hogere waarde van 89 mPt/m² gevonden (Mouton et al., 2023). Bovendien neemt in de laatste studie de referentiewaarde opnieuw toe en wordt een benchmark van 107 mPt/m² bekomen. Hoewel de geaggregeerde benchmarkwaarde een hogere

waarde aanneemt dan in voorgaande studies, vinden de onderzoekers een lagere waarde voor de klimaatveranderingsindicator, nl. 1015 kg CO₂-eq/m² (Mouton et al., 2024). Dit is te verklaren door de weging van de indicatoren om tot de geaggregeerde score te komen. In de studie wordt duidelijk dat een verschuiving van de meest invloedrijke indicator, van klimaatverandering naar de uitputting van abiotische stoffen, ontstaat. Naast de totale milieubelasting wordt een bijkomend onderscheid gemaakt tussen de ingebedde en operationele emissies. Uit de analyses vinden Mouton et al. (2022, 2023, 2024) 415 kg CO₂-eq/m² en 45 mPt/m², 49 mPt/m² en 613 kg CO₂-eq/m² of 63 mPt/m² als ingebedde benchmarkwaardes en 764 kg CO₂-eq/m² en 39 mPt/m², 40 mPt/m² en 382 kg CO₂-eq/m² of 41 mPt/m² als operationele benchmarkwaardes. Hoewel Mouton et al. (2022) hogere operationele emissies vinden, verschuift dit in later onderzoek van Mouton et al. (2024) naar hogere ingebedde emissies. Hieraan is duidelijk te merken dat voornamelijk wordt ingezet op het reduceren van de operationele emissies, wat een reactie is op de stelselmatige verstrenging van de energieprestatie-eisen. Ondanks deze verschuiving en bijhorende reductie van de totale milieubelasting, blijft de milieu-impact van de Vlaamse residentiële gebouwen relatief hoog.

Analoog aan Mouton et al. (2022, 2023, 2024) maken Zimmermann et al. (2021) en Izaola et al. (2023) een onderscheid tussen operationele, ingebedde en totale milieubenchmarks. Zimmermann et al. (2021) onderscheiden volgende referentiewaarden 184-542, 11-229 en 475 kg CO₂-eq/m², voor respectievelijk ingebedde emissies, operationele emissies en totale benchmarkwaardes. Naast een referentiestudieperiode van 60 jaar, worden diezelfde benchmarks eveneens opgesteld voor de referentiegebouwen met een levensduur van 80 jaar. Zoals reeds vermeld leidt dit tot een lagere CO₂-uitstoot per m² per jaar, maar de totale impact over de volledige levensduur is hoger. Zo leggen de onderzoekers volgende waarden voorop, respectievelijk 249-760, 14- 344 en 640 kg CO₂-eq/m². In tegenstelling tot Mouton et al. (2022, 2024) en Zimmermann et al. (2021), bekomen Izaola et al. (2023) een zeer hoge milieu-impact voor een Spaans appartementsgebouw daterend van 2013. Dit geldt zowel voor de ingebedde als operationele emissie en bijgevolg ook voor de totale milieubelasting, respectievelijk met referentiewaarden gelijk aan 599, 1345 en 1944 kg CO₂-eq/m². Datzelfde appartement wordt in een volgende stap gemodificeerd om te voldoen aan de BEN-eisen. Hierdoor worden vorige referentiewaardes min of meer gehalveerd en ontstaan nieuwe mogelijke bottom-up waardes van 229, 516 en 745 kg CO₂-eq/m². Evenals Mouton et al. (2022, 2024), vinden Zimmermann et al. (2021) lagere waarden voor operationele benchmarks in vergelijking met de ingebedde benchmarks. Bijgevolg blijkt hieruit dat in Denemarken eveneens reeds wordt ingezet op het reduceren van de operationele emissies. Daartegenover en hoewel Izaola et al. (2023) rekening houdt met BEN-standaarden, bestaat die shift van grootste bijdrager van operationele emissies naar ingebedde emissies echter niet.

In Nederland geldt sinds het Bouwbesluit van 2012 dat de milieuprestatie voor nieuwe woningen en kantoren vanaf een oppervlakte van 100 m²BVO dient te worden berekend. In dit kader wordt het MPG of de milieuprestatie van gebouwen ontwikkeld. Die berekening resulteert in een geaggregeerde score van de ingebedde impact (W/E adviseurs, 2017). De opgelegde eis, sinds januari 2018, limiteert de milieuprestatie van een nieuwe woning of kantoor tot een maximum grenswaarde van 1. Daarnaast vindt een bijkomende verstrenging plaats in 2021 waarop de milieubelasting voor uitsluitend nieuwe woningen wordt aangescherpt naar een limietwaarde van 0,8. Deze eis zal stapsgewijs scherper worden gesteld tot uiterlijk in 2030 de grenswaarde is gehalveerd (MilieuPrestatie Gebouwen - MPG, 2017). Om de resultaten van W/E adviseurs (2017), uitgedrukt over de volledige levensloop, te vergelijken met de opgelegde eis van 2021 moeten de waarden eerst geharmoniseerd worden. Zo bekomt de studie van W/E adviseurs (2017) de waarden 0,44 €/m²BVO/jaar en 0,48 €/m²BVO/jaar voor respectievelijk bestaande woningen en kantoren. Hieruit blijkt dat de hedendaagse typologieën reeds aan de eis voldoen.

Net als W/E adviseurs (2017) leggen Braune et al. (2021) en Wiik et al. (2020) eveneens de focus op ingebedde benchmarks. Wiik et al. (2020) onderzoeken met als doel de broeikasgasemissies in Noorwegen met 50% te reduceren tegen 2030. Het onderzoek resulteert in een mediane waarde van 396 kg CO₂-eq/m² of 6,6 kg CO₂-eq/m²/jaar. Analooq ontstaat de studie van Braune et al. (2021) wegens een gebrek aan kennis in Duitsland en de reeds wetenschappelijke interesse in het reduceren van operationele emissies. Uit de analyse volgt een gemiddelde waarde van 435 kg CO₂-eq/m² of 8,7 kg CO₂-eq/m²/jaar, dewelke reeds ongeveer 8% lager is dan de referentiewaarde, daterend van 2021, van DGNB (Duitse vereniging voor duurzaam bouwen).

Naast Nederland en Duitsland, legt ook Frankrijk een limietwaarde op aan de Franse woningbouw. De Franse regelgeving RE2020 (Décret n° 2021-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023), hiervoor verantwoordelijk, ontwikkelde een limietwaarde in 2022 voor de totale milieuprestatie van 640 kg CO₂-eq/m². Die waarde wordt verder aangescherpt in 2030 tot een totale milieubelasting van 415 kg CO₂-eq/m² voor vrijstaande en rijwoningen wordt bekomen. Aanvullend ontwikkelt de regelgeving eveneens drempelwaardes voor operationele en ingebedde CO₂-emissies, respectievelijk 4 kg CO₂-eq/m²/jaar en 100 kg CO₂-eq/m².

Daarnaast doen slechts twee studies ook een uitspraak over renovatieprojecten. Zimmermann et al. (2023) onderzoeken 23 werkelijke renovaties, waaronder voornamelijk residentiële gebouwen. Indien enkel naar de operationele energie wordt gekeken, bedragen de gemiddelde waarden 13,5 kg CO₂-eq/m²/jaar en 7,0 kg CO₂-eq/m²/jaar, respectievelijk voor en na de renovatie. Dit impliceert een besparing in broeikasgasemissies van ongeveer 50%. Daarnaast resulteren de ingebedde emissies in een gemiddelde waarde van 2,8 kg CO₂-eq/m²/jaar, wat beduidend lager is dan de operationele emissies. De spreiding in ingebedde emissie is te danken aan de impact van de verschillende renovatieactiviteiten. Uit het onderzoek blijkt echter dat voornamelijk de focus ligt op het verminderen van de operationele energie. Bovendien bekijken Wiik et al. (2020), naast de brede waaier aan bouwtypologieën, ook veertien renovatieprojecten. Uit de vergelijking van de resultaten van de LCA-analyses, voor zowel de renovatieprojecten als voor alle bouwtypes, concluderen de onderzoekers een lagere milieu-impact bij renovatieprojecten. Het gevonden resultaat van de renovaties bedraagt 2,3 kg CO₂-eq/m²/jaar, wat 4,3 kg CO₂-eq/m²/jaar minder is

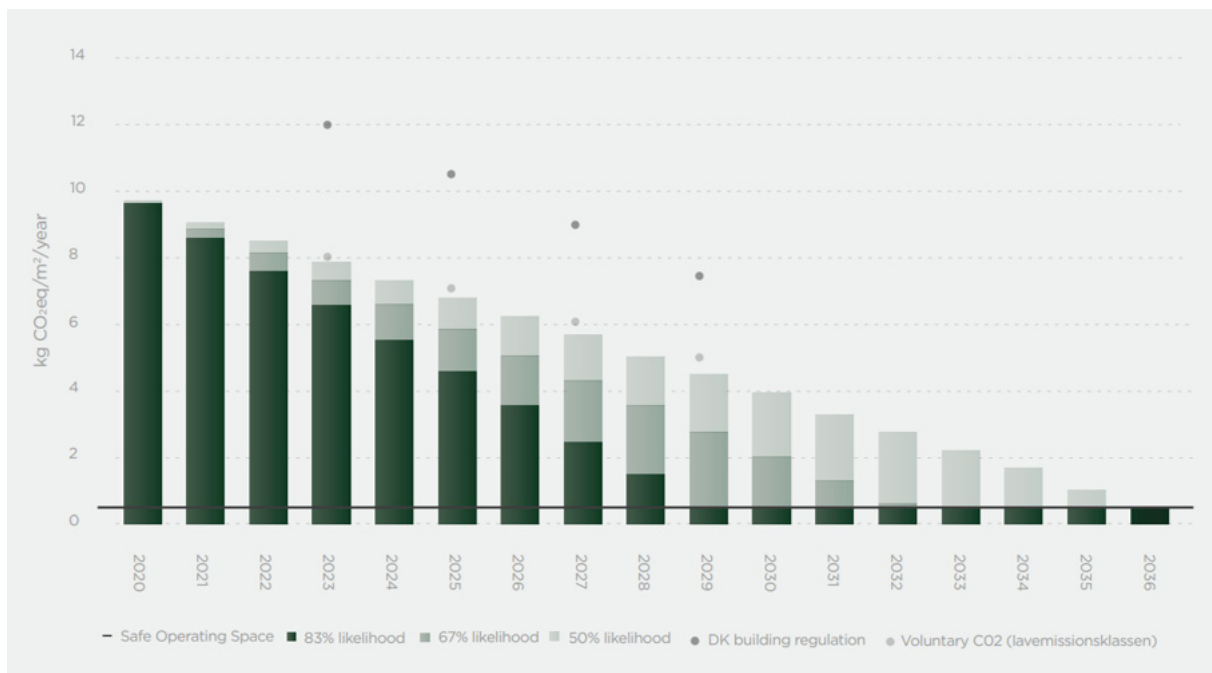
dan de mediane waarde. Uit de resultaten van beide studies kan bijgevolg worden geconcludeerd dat renovatieprojecten zorgen voor een gunstig effect op de milieuscore van een gebouw.

3.6.3. Dual benchmarks

Deze paragraaf focust op de relatie tussen een bottom-up en top-down benadering. Wegens een gebrek aan kennis wordt immers geen definitieve benchmarks naar voren zijn geschoven. Zo wordt slechts één studie gevonden die de bottom-up resultaten koppelt aan de top-down resultaten. Verder onderzoek is bijgevolg vereist.

Zoals reeds vermeld in paragraaf 3.6.1. moet vanuit een Deense strategie de CO₂-uitstoot tegen 2030 tot 1,9 miljoen ton CO₂-eq/jaar worden beperkt. De Reduction Roadmap geeft drie verschillende scenario's weer om die limietwaarde te bereiken. Figuur 5 geeft die reductiepaden weer, waarbij de doelwaarde reeds wordt bereikt binnen de 9 tot 16 jaar ten opzichte van 2020. De scenario's verschillen aan de hand van het risico dat men wil nemen bij het reduceren. Een snellere reductie gaat immers gepaard met een hoger politiek en maatschappelijk risico. De reductiepaden worden van hoog naar laag risico weergegeven: een reductie van 83% waarschijnlijkheid tot het limiteren van de klimaatsopwarming tot 1,5°C, een reductie van 67% waarschijnlijkheid en een reductie van 50% waarschijnlijkheid (Hill-Hansen et al., 2022). Daarnaast blijkt uit de bottom-up benadering dat de gemiddelde emissies van nieuwe residentiële gebouwen 9,63 kg CO₂-eq/m²/jaar bedraagt (Tozan et al., 2021, als in Hill-Hansen et al., 2022). Uitgaande van een constante snelheid van constructie is op analoge wijze een even grote reductie toegepast als bij de top-down benadering. Dit stemt overeen met een doelniveau van 0,4 kg CO₂-eq/m²/jaar of 20 kg CO₂-eq/m² tegen 2030. Als referentiewaarden zijn ook de doelwaarden van de Deense regelgeving en de lage emissieklassen weergegeven (Hill-Hansen et al., 2022). Zo geldt in 2023 een limietwaarde voor de gebouwregelgeving van 12 kg CO₂-eq/m²/jaar en voor de vrijwillige CO₂-klasse een limietwaarde van 8 kg CO₂-eq/m²/jaar (Andersen et al., 2023).

De studie geeft op die manier een aanzet om een tool te ontwikkelen die de methode en voorwaarden voor het vertalen van de planetaire grenzen naar reductiewaarden voor nieuwe gebouwen voorschrijft (Hill-Hansen et al., 2022). Het blijft echter onduidelijk dat indien nieuwe residentiële gebouwen in 2030 voldoen aan een gemiddelde waarde van 0,4 kg CO₂-eq/m²/jaar, er eveneens voldaan is aan de eis van de Deense strategie van 1,9 miljoen ton CO₂-eq/jaar.



Figuur 5: Reductiecurve voor nieuwe Deense residentiële gebouwen en de toekomstige CO₂-limieten volgens de Deense gebouwregelgeving (Hill-Hansen et al., 2022)

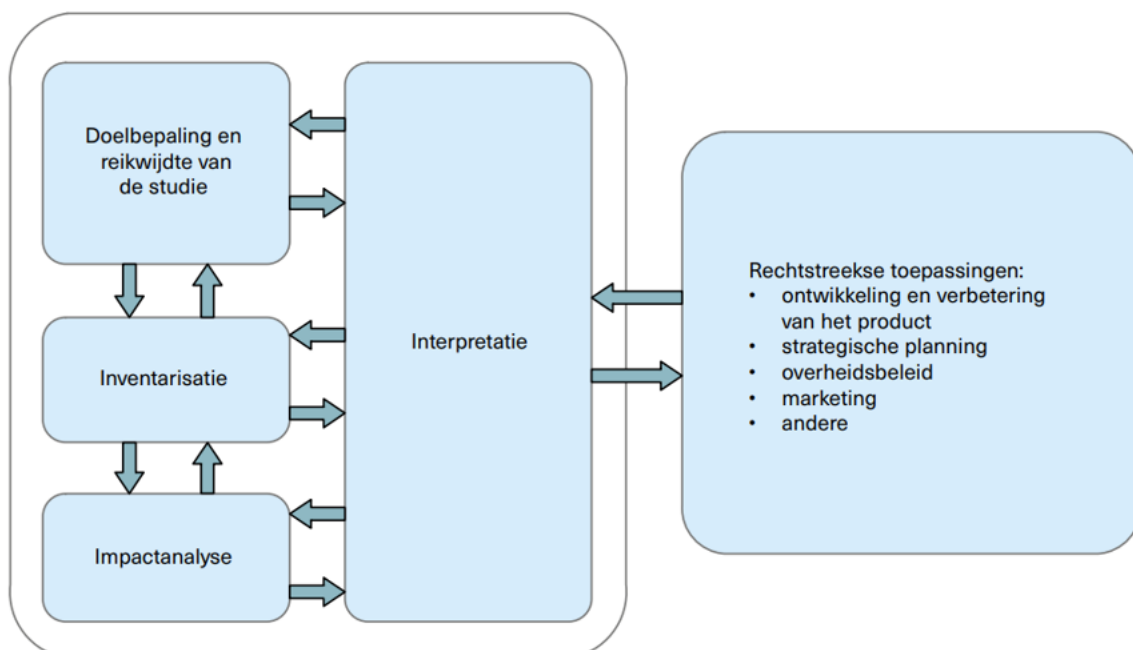
Hoofdstuk 4. Methodologisch kader

4.1. Levenscyclusanalyse

Kortweg is een levenscyclusanalyse een methode om de milieu-impact van een product, gebouwelement of een gebouw in zijn geheel te beoordelen (Janssen et al., 2013). In dit hoofdstuk wordt dieper gekeken naar de uitvoering van een LCA in kader van deze masterproef.

Voorgaande studies in België (Mouton et al., 2022, 2023, 2024) hanteren TOTEM als LCA-tool. In deze studie worden TOTEM en de software SimaPro aangewend voor het uitvoeren van de milieubeoordeling. Hierbij wordt SimaPro enkel ingezet voor de berekening van de trap, aangezien TOTEM hiervoor geen mogelijkheden aanbiedt. Bovendien baseren beide tools zich op de ISO-norm 14040 (CEN, 2020a), dewelke vier stappen (zie figuur 6) voorop stelt die dienen te worden ondernomen bij het uitvoeren van een LCA:

- I. doelbepaling en reikwijdte;
- II. levenscyclusinventarisatie (LCI);
- III. levenscyclusimpactanalyse (LCIA);
- IV. interpretatie.



Figuur 6: Overzicht van de vier stappen in een LCA (Janssen et al., 2013)

4.2. Methodologie

De LCA-tool waar dit onderzoek voornamelijk op steunt is TOTEM. Bijgevolg worden in deze paragraaf, specifiek voor de tool TOTEM, de vier stappen van de ISO-norm verder uitgelicht. Echter vertoont SimaPro beperkte verschillen waar niet dieper op wordt ingegaan, aangezien slechts in beperkte mate op de software wordt gesteund.

4.2.1. Doel en reikwijdte

Bij de opstart van een levenscyclusanalyse hoort het doel en de reikwijdte op voorhand te worden vastgelegd. Het doel geeft de vraagstelling en reden tot het uitvoeren weer. Daarnaast omvat het eveneens een omschrijving van het doelpubliek en het beoogde gebruik van de bekomen resultaten (Janssen et al., 2013). Het doel van deze masterproef is het berekenen van de milieu-impact van gebouwen representatief aan de Vlaamse woningbouw en aan de hand hiervan een bottom-up benchmark op te stellen. Naast de hoofddoelstelling, onderzoekt de nevendoeelstelling wat de invloed van geometrie, materialiteit en typologie op de milieuprestatie van een gebouw is. De resultaten dienen als referentiepunt en als inzicht waarmee ontwerpers tijdens het ontwerpproces aan de slag kunnen om zo de milieuprestatie van het te ontwerpen gebouw te reduceren.

De reikwijdte, daarentegen, schetst het methodologisch kader waarbinnen de LCA plaatsvindt. Dit betekent dat een transparante beschrijving van het systeem wordt gegeven, waarbij de beschouwde levenscyclusfasen en de systeemgrenzen worden bepaald. Bijkomend wordt in deze fase de functionele eenheid en ook de voorziene levensduur vastgelegd (Janssen et al., 2013).

Functionele eenheid

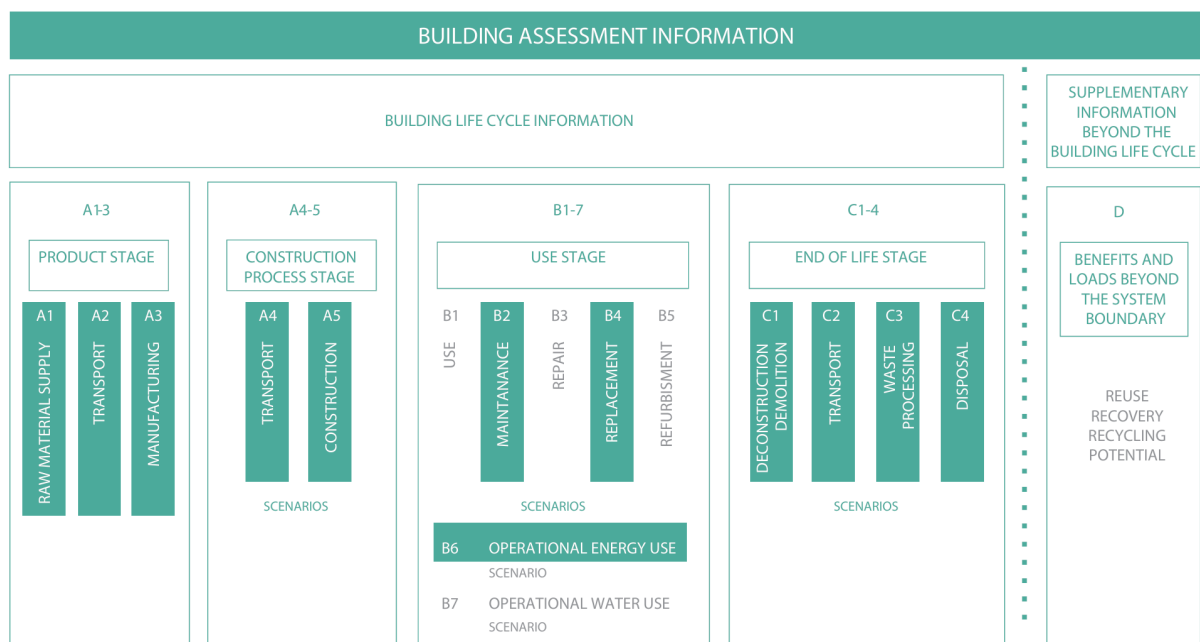
De functionele eenheid is de referentie-eenheid die toe laat om de vergelijking tussen de milieuprestaties van elementen of gebouwen te maken (Servaes et al., 2023). Bijgevolg definieert het de functie(s) en eigenschappen van het te analyseren systeem (Janssen et al., 2013). In het vorige hoofdstuk werd de functionele eenheid reeds besproken aan de hand van gevonden onderzoeken. Zo komt uit de studies van Mouton et al. (2022, 2023, 2024) naar voor dat in België m^2 brutovloeroppervlakte als functionele eenheid wordt gehanteerd. Servaes et al. (2023) definiëren m^2 nuttige vloeroppervlakte als functionele eenheid. Die nuttige vloeroppervlakte komt overeen met bruto verwarmd vloeroppervlakte zoals voorgeschreven in de EPB-regelgeving. Bijgevolg zal in deze masterproef eveneens gekozen worden voor m^2 brutovloeroppervlakte als functionele eenheid, maar er wordt ook kritisch omgegaan met de normalisatie naar deze functionele eenheid.

Levensduur

Net als de functionele eenheid, komt de levensduur eveneens aan bod in het vorige hoofdstuk. Servaes et al. (2023) stelt dat de specifieke eisen voor de levensduur van een gebouw in de meeste gevallen wordt vastgelegd door de klant. Bij het ontbreken van die eisen, wordt in België gekozen voor een standaard referentiestudieperiode van 60 jaar, die zowel geldt voor woongebouwen, kantoren, scholen en winkels. Bovendien passen Mouton et al. (2022, 2023, 2024) eveneens een levensduur van 60 jaar toe. Servaes et al. (2023) merkt op dat de gemiddelde werkelijke levensduur van een gebouw vaak langer bedraagt dan die voorgeschreven 60 jaar. Toch wordt 60 jaar verkozen omdat men ervan uitgaat dat het gebouw, met uitzondering van de structuur, hierna zal moeten worden gerenoveerd. In analogie wordt in deze thesis ook geopteerd voor een referentiestudieperiode van 60 jaar.

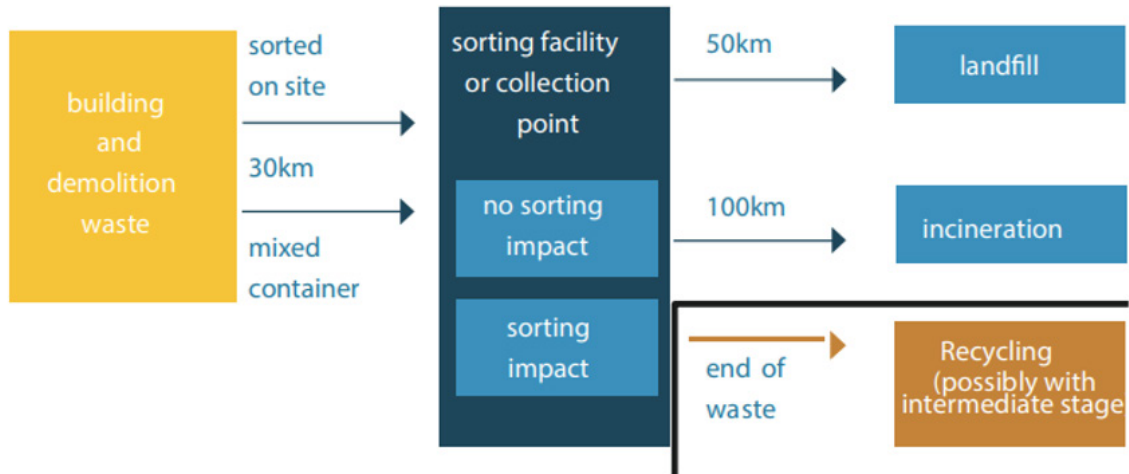
Systeemgrenzen en allocatiemethode

De Europese norm voor gebouwen NBN EN 15978 (CEN, 2012) verplicht een LCA van wieg tot graf, indien op gebouwniveau wordt gekeken. Bijgevolg wordt in deze studie geopteerd voor het type LCA wieg tot graf (cradle-to-grave). Hierin worden de verschillende levensfasen, namelijk de productiefase, de constructiefase, de gebruiksfase en de eindelevensfase, al dan niet in hun geheel in de analyse meegenomen (Janssen et al., 2013). Elke fase of module definieert bovendien de grenzen waarbinnen de analyse plaatsvindt en brengt elk een individuele impact met zich mee (Servaes et al., 2023).



Figuur 7: Overzicht van de verschillende levenscyclusfasen en de bijhorende systeemgrenzen volgens de Europese standaard EN 15978 (CEN, 2011). De huidige versie van TOTEM neemt de modules ingekleurd in het groen mee (Servaes et al., 2023).

Figuur 7 geeft een overzicht van de verschillende levenscyclusfasen en de bijhorende systeemgrenzen. De donkergekleurde modules worden in het onderzoek meegenomen. De eerste module, module A, omvat zowel de productie- als de constructiefase. In de productiefase (A1-A3) spelen de winning van grondstoffen, vervolgens het transport ervan tot de fabrikant en de effectieve productie in de fabriek een rol. Per materiaalcategorie worden bovendien bepaalde aannames voor de transportafstanden en het type transportmiddel gemaakt, waarbij de aannames volgens OVAM worden gevolgd. Daarnaast bestaat de constructiefase (A4-A5) uit twee deelprocessen, enerzijds het transport van het geproduceerd product tot de site en anderzijds de installatie ervan. In deze fase wordt voor praktische redenen 5% materiaalverlies, bijvoorbeeld door versnijdingen, ingerekend. Opnieuw wordt voor het transport rekening gehouden met de aannames van OVAM. De tweede module is de gebruiksfase (B1-B7) en omvat onder andere schoonmaak, onderhoud, herstellingen en vervangingen gedurende de levensduur. Wanneer de levensduur van het materiaal korter is dan de totale levensduur van het gebouw zullen vervangingen nodig zijn om de technische en functionele prestatie van het gebouw te garanderen. Het aantal vervangingen wordt immers bepaald door de levensduur van het gebouw te delen door de levensduur van het materiaal en dit resultaat vervolgens te verminderen met één, aangezien rekening wordt gehouden met de initiële installatie. Vertoont het resultaat een geheel getal, dan is dit het aantal vervangingen dat nodig zal zijn. Indien dit geen geheel getal is, zijn er twee mogelijkheden. Is het materiaal belangrijk voor de veiligheid en/of het comfort, dan wordt het getal afgerond naar boven. Bijgevolg is de vervanging noodzakelijk. Indien de vervanging echter enkel in esthetische overweging plaatsvindt, worden een aantal vuistregels toegepast. Zo wordt gesteld dat wanneer de resterende levensduur van het gebouw kleiner is dan de helft van de levensduur van het materiaal, dan wordt het niet-gehele getal naar beneden afgerond en vice versa. Bijkomend zitten eveneens het operationeel energieverbruik, gebaseerd op de equivalente graaddagenmethode, en waterverbruik in deze fase vervat. Daarna volgt de module C, ook de einde-levensfase (C1-C4) genoemd (Servaes et al., 2023). Deze module brengt de sloop en ontmanteling, het transport vanaf de werf, de afvalverwerking en -verwijdering in rekening. Onder afvalverwerking wordt het sorteren en de voorbereiding voor recyclage en hergebruik verstaan, terwijl afvalverwijdering het stortings- en het verbrandingsproces van afval inhoudt (Janssen et al., 2013). De afvalverwerking en het transport vanaf de werf volgen opnieuw de aannames van OVAM. In dit geval is het transportvoertuig een vrachtwagen van 16-32 ton. De afstand die de vrachtwagen hoort af te leggen is afhankelijk van het verwijderingsproces en wordt in figuur 8 verduidelijkt. Er wordt namelijk 80, 130 of 30 km gerekend, respectievelijk voor storten, verbranden en recycleren of hergebruik. De laatste levenscyclusfase, module D, omvat de voor- en nadelen die gepaard gaan met de recyclage of het hergebruik van het materiaal (Servaes et al., 2023), maar valt buiten de systeemgrenzen van dit onderzoek.



Figuur 8: Transportafstanden afhankelijk van het afvalverwerkingsproces na deconstructie of afbraak (Servaes et al., 2023). De impacts die binnen de systeemgrenzen vallen zijn in blauw gekleurd en de impacts die buiten de systeemgrenzen vallen zijn weergegeven in oranje.

Binnen een LCA moet bovendien rekening worden gehouden met allocatie. Allocatie vindt plaats van zodra een specifiek proces verschillende producten voortbrengt, i.e. één hoofdproduct en meerdere co-producten en/of bijproducten. Bijgevolg wordt de milieubelasting over de verscheidene producten verdeeld. De manier waarop die verdeling plaatsvindt, heeft een invloed op de LCA-resultaten. Bovendien worden hergebruikte en gerecycleerde materialen eveneens geconfronteerd met de allocatieproblematiek. Hierbij worden de milieubaten, zoals besparing van energie of primaire grondstoffen, en de milieulasten, zoals energieverbruik voor het inzamelen en het verwerken van de afvalstoffen, verdeeld over het recycleerbare product of het product op basis van het gerecycleerd materiaal. Via systeemgrenzen en module D leggen de Europese normen regels voor om die allocatieproblematiek op te lossen (Janssen et al., 2013).

4.2.2. Levenscyclusinventarisatie

De volgende stap binnen het uitvoeren van een LCA-onderzoek is de levenscyclusinventarisatie of life cycle inventory (LCI). In deze fase worden alle gegevens die nodig zijn voor de analyse, zoals de in- en output, verzameld. Concreet betekent dit: elke module en elk deelproces vraagt een bepaalde input en produceert vervolgens een output. Het zijn die overeenkomende input- en outputstromen die uiteindelijk worden geïnventariseerd. Voorbeelden van inputstromen zijn verbruik van primaire grondstoffen, energie, hulpbronnen en land, terwijl outputstromen emissies naar bodem, lucht en water, productie van afval, gewijzigd landschap en bijproducten omvatten. De hoeveelheden van de input- en outputstromen worden per proces gerelateerd aan de in de analyse beschouwde referentie-eenheid of functionele eenheid (Janssen et al., 2013).

De gegevens die nodig voor het uitvoeren van de analyse omvat generieke en/of specifieke data en zijn in verschillende databanken zoals de Ecoinvent LCI-databank, GABI-databank of IVAM-databank vastgelegd. De meest gebruikelijke databank is de Ecoinvent LCI-databank (Janssen et al., 2013). De Zwitserse databank bevat meer dan 20.000 inventarisatiegegevens van gemodelleerde menselijke activiteiten en processen, uit verschillende sectoren (Ecoinvent, 2024). Gezien de Zwitserse oorsprong van de databank, zijn de gegevens voornamelijk representatief voor Zwitserland, Duitsland en West-Europa, en dus ook voor België. Zo zijn zelfs een aantal specifieke Belgische processen (bv. elektriciteitsmix) in de databank opgenomen (Janssen et al., 2013). De verworven data wordt in een volgende stap toegepast in de LCA-tool. In het kader van dit onderzoek steunt TOTEM enerzijds op data afkomstig uit Ecoinvent, maar anderzijds op gevalideerde en geverifieerde B-EPDs. Zij bevatten data van gebouwproductfabrikanten die verkrijgbaar zijn op de Belgische markt of die gebruikt worden bij de bouw van Belgische gebouwen. Die data wordt bovendien verkregen vanuit de Belgische B-EPD database (Servaes et al., 2023).

4.2.3. Levenscyclusimpactanalyse

Na de inventarisatie volgt de levenscyclusimpactanalyse of life cycle impact assessment (LCIA). In die stap worden de potentiële milieu-impacts op basis van de resultaten van de levenscyclusinventarisatie beoordeeld. Om dit te kunnen verwezenlijken, wordt de inventarisatiedata gelinkt met specifieke milieu-impacts of milieu-impactcategorieën. Uiteindelijk wordt een totale milieu-impact van een gebouw of een element weergegeven in de vorm van een milieuprofiel (Servaes et al., 2023).

Milieu-impactindicatoren

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de milieu-impactindicatoren met hun bijhorende eenheid. Die indicatoren worden geclusterd in 12 hoofd-milieu-impactcategorieën (Servaes et al., 2023). Volgens Janssen et al. (2013) refereren de categorieën naar de milieuproblematieken en -thema's die zich in de huidige maatschappij voordoen. Welke indicatoren bijgevolg worden meegenomen in de studie is afhankelijk van de doelstelling van de LCA. Zo worden in deze thesis de resultaten enerzijds in functie van een totaalscore (uitgedrukt in milieupunten of mPt) en anderzijds met oog op de klimaatverandering (uitgedrukt in kg CO₂-eq) weergegeven. Om herhaling te vermijden worden de resultaten met oog op de klimaatverandering telkens in bijlage toegevoegd.

Hoofd milieu-impactcategorie	Milieu-impactindicator	Eenheid
Klimaatverandering	Klimaatverandering - totaal Klimaatverandering - fossiel Klimaatverandering - biogeen Klimaatverandering - landbezetting en verandering landbezetting	kg CO ₂ eq
Aantasting van de ozonlaag	Aantasting van de ozonlaag	kg CFC 11 eq
Verzuring	Verzuring	mol H ⁺ eq
Eutrofiëring	Eutrofiëring - aquatisch zoetwater Eutrofiëring - aquatisch marine Eutrofiëring - terrestrisch	kg P eq kg N eq mol N eq
Fotochemische vorming van ozon	Fotochemische vorming van ozon	kg NMVOC eq
Uitputting van abiotische grondstoffen	Uitputting van abiotische grondstoffen - mineralen en metalen Uitputting van abiotische grondstoffen - fossiele brandstoffen	kg SB eq MJ
Watergebruik	Watergebruik	m ³ world eq deprived
Fijnstof	Fijnstof emissies	disease incidence
Ioniserende straling	Ioniserende straling - menselijke gezondheid	kBq U235 eq
Eco-toxiciteit	Eco-toxiciteit - vers water	CTUe
Menselijke toxiciteit	Menselijke toxiciteit - kanker Menselijke toxiciteit - niet kanker	CTUh
Landbezetting	Landbezetting gerelateerd aan impact-/ bodemkwaliteit	dimensieloos

Tabel 4: Overzicht van de milieu-impactindicatoren inclusief de eenheden (Servaes et al., 2023)

Evaluatiemethode

De totaalscore of geaggregeerde score wordt bekomen door een combinatie van de verschillende resultaten van de individuele milieu-impactindicatoren te nemen. Gezien de eenheid per milieu-indicator verschilt, wordt het verkrijgen van een ééngetalscore immers bemoeilijkt. Dit probleem wordt aangepakt door vooraf facultatieve stappen te ondernemen (Janssen et al., 2013). De Belgische tool TOTEM steunt hiervoor op de PEF-wegingsbenadering of de *Product Environmental Footprint* wegings-benadering en omvat zowel een normalisatie- als wegingsstap (Servaes et al., 2023 en Vieira, 2016). Voorafgaand aan de normalisatie en weging, vindt volgens Vieira (2016) de classificatie en karakterisatie van de indicatoren plaats. Servaes et al. (2023) stelt dat TOTEM hiervoor verschillende *Model impact methods* per indicator gebruikt. Zo wordt bijvoorbeeld voor eutrofiëring het EUTREND model toegepast. Daarna wordt overgegaan naar de normalisatie, waarbij eenzelfde eenheid voor alle indicatoren wordt bekomen (Janssen et al., 2013). Dit wordt mogelijk door de resultaten van de individuele indicatoren te delen door normalisatiefactoren, uitgedrukt in impact per land per jaar. Vervolgens worden de genormaliseerde waarden vermenigvuldigd met weegfactoren die op basis van een waardeoordeel worden bepaald. Bovendien voorziet TOTEM vaste normalisatie- en wegingsfactoren per milieu-impactindicator (Servaes et al., 2023). Uiteindelijk wordt een enkelvoudige geaggregeerde score of ééngetalscore bekomen door de resultaten van de genormaliseerde en gewogen indicatoren te sommeren (Janssen et al., 2013).

4.2.4. Interpretatie

Ten slotte wordt in de vierde en laatste stap gecontroleerd of de resultaten uit voorgaande stappen antwoord bieden op de LCA-vraagstelling. De resultaten moeten bijgevolg worden besproken en worden geïnterpreteerd, wat vaak tot nieuwe vragen leidt. Tijdens die interpretatie moet rekening worden gehouden met volgende stappen:

- identificatie van significante punten;
- verificatie op vlak van volledigheid, gevoeligheid en coherentie;
- besluiten, aanbevelingen en verslaggeving (Janssen et al., 2013).

Hoofdstuk 5. Bepaling gebouwvarianten

Het opstellen van een benchmark steunt op de milieu-impact van een aantal referentiegebouwen die symbool staan voor de woningbouw in België, daarom wordt een set aan negen verschillende gebouwtypologieën bekeken. Per gebouwtypologie wordt gestart van een referentiecasse, die nadertijd aangepast wordt naar gelang de geometrie. Op die manier worden meerdere geometrische varianten per gebouwtypologie bekomen en wordt bijgevolg een brede waaier aan diverse gebouwen gevormd. In dit hoofdstuk worden eerst de referentiewoningen per gebouwtipe en daarna de geometrische varianten toegelicht.

5.1. Referentiewoningen per gebouwtypologie

De referentiewoningen worden in twee grote groepen onderverdeeld: de één- en meergezinswoningen. Bovendien bestaan ééngezinswoningen uit drie typologieën: rijwoningen, halfopen en vrijstaande woningen. Dit zijn de drie meest typerende gebouwtypologieën in de Belgische context. Daarnaast wordt eveneens een onderscheid gemaakt in de meergezinswoningen. Gezien dit een brede waaier aan appartementen omvat, wordt hier echter een afbakening gemaakt die toch zes appartementstypologieën in rekening brengt. Zo worden twee wooneenheden op de gelijkvloerse verdieping met ofwel één gemeenschappelijke wand en drie buitenwanden, ofwel twee gemeenschappelijke wanden en twee buitenwanden, onderscheiden. Die tweedelige opsplitsing wordt eveneens toegepast op twee verdieplings- of ingesloten appartementen en op twee dakappartementen. Hoewel een meergezinswoning, naast het private deel, bestaat uit gemeenschappelijke delen (bv. inkomhal/trappenhal), wordt enkel de wooneenheid zelf beschouwd bij het berekenen van de milieuprestatie. De gemeenschappelijke delen worden bijgevolg niet verdeeld over het aantal woonunits in het volledige gebouw en worden dus volledig buiten beschouwing gelaten.

5.1.1. Ééngezinswoningen

Hieronder worden de verschillende referentiecasses per ééngezinswoningtypologie grafisch weergegeven en beschreven. Als eerste komt de rijwoning aan bod. Daarna wordt de halfopen woning kort geschetst en de vrijstaande woning sluit deze paragraaf af. Telkens worden de afmetingen en de bijhorende plannen, gevelaanzichten en snedes weergegeven. Bovendien wordt in het onderzoek elke typologie op een unieke manier afgekort. Dit zorgt voor een betere leesbaarheid in de grafieken van volgende hoofdstukken. De afkorting wordt bij elke typologie tussen haakjes vermeld.

Rijwoning (RW)

De casestudy betreft een arbeiderswoning. De typische rijwoning beslaat drie bouwlagen en heeft een uitbouw, gelegen aan de achtergevel, op de gelijkvloerse verdieping. De totale hoogte tot de nok van de woning bedraagt 10 meter. Daarnaast is de woning 5 meter breed en heeft een diepte van 13,4 en 8,64 meter, respectievelijk op het gelijkvloers en op de overige verdiepen. Uiteindelijk wordt de diepte gelijkgesteld aan 13 meter om de werkbaarheid van de berekeningen te verhogen. De plannen, gevelaanzichten en de snede worden in figuur 9 weergegeven. Uit de snede blijkt echter dat de rijwoning bijkomend een kelderverdieping bevat. Om de complexiteit van het onderzoek niet verder te verhogen, wordt de kelder buiten beschouwing gelaten.



Figuur 9: Grondplannen - gelijkvloers en eerste verdieping (bovenaan), gevelaanzichten - voor- en achtergevel (links) en snede (rechts) van de rijwoning (Van Der Veken et al., 2015)

Halfopen woning (HO)

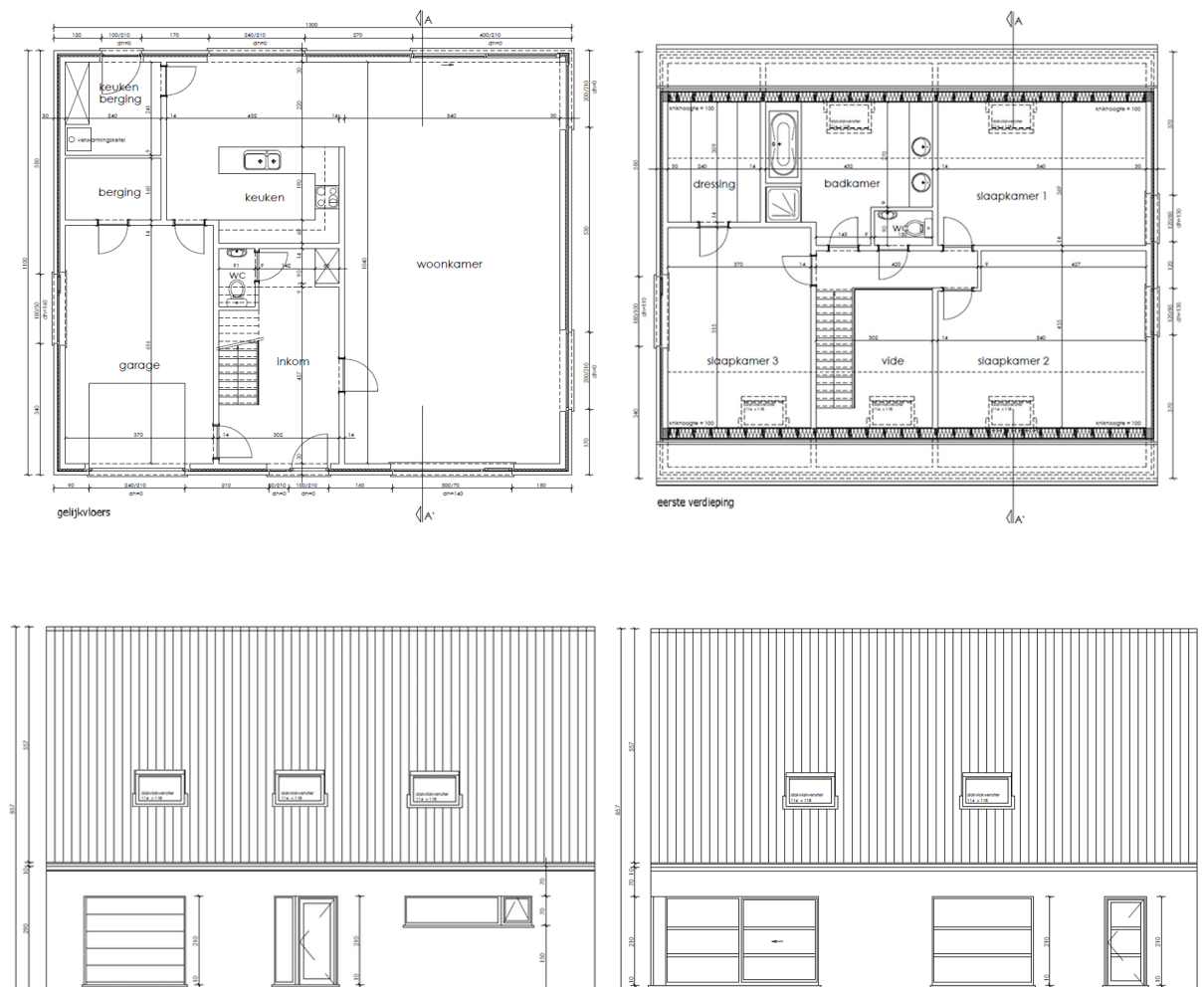
De halfopen referentiewoning bestaat uit twee bouwlagen en een zolderverdieping onder een hellend dak. De woning heeft een rechthoekig plan zonder uitbouwen, met een breedte van 8,29 meter en een diepte van 11,30 meter. Omwille van analoge redenering als bij de rijwoning, worden ook hier de afmetingen vereenvoudigd. De woning zal uiteindelijk op een breedte van 8 meter en een diepte van 11 meter eindigen. Daarnaast bedraagt de totale hoogte van de woning 8,95 meter. De grondplannen, gevelaanzichten en de snede worden in figuur 10 weergegeven.



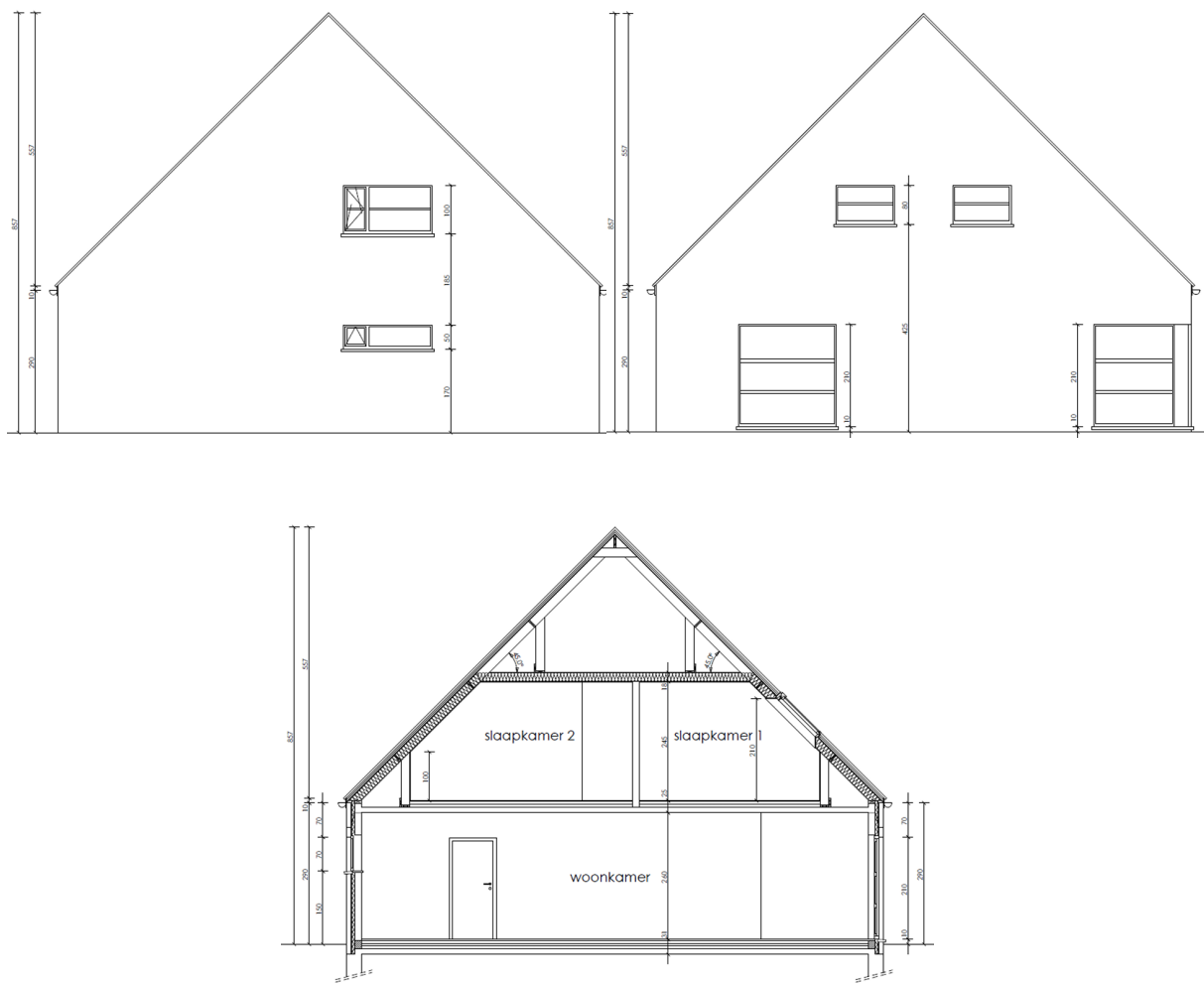
Figuur 10: Grondplannen - gelijkvloers en eerste verdieping (bovenaan), gevelaanzichten - voor- en achtergevel (midden), zijgevel (onderaan links) en snede (onderaan rechts) van de halfopen woning (Van Der Veken et al., 2015)

Vrijstaande woning (VS)

Als referentiewoning voor een vrijstaande woning wordt gekozen voor een fermette. Dit betreft een woning met twee bouwlagen en een hellend dak. De totale hoogte van het residentiële gebouw bedraagt 8,57 meter. Daarnaast heeft het rechthoekige plan een breedte van 11 meter op een diepte van 13 meter. Aangezien deze afmetingen reeds gehele getallen zijn, wordt op dit plan geen vereenvoudiging toegepast en kan het oorspronkelijke plan bijgevolg als referentiecasse worden beschouwd. De plannen, gevelaanzichten en de snede worden opnieuw hieronder weergegeven.



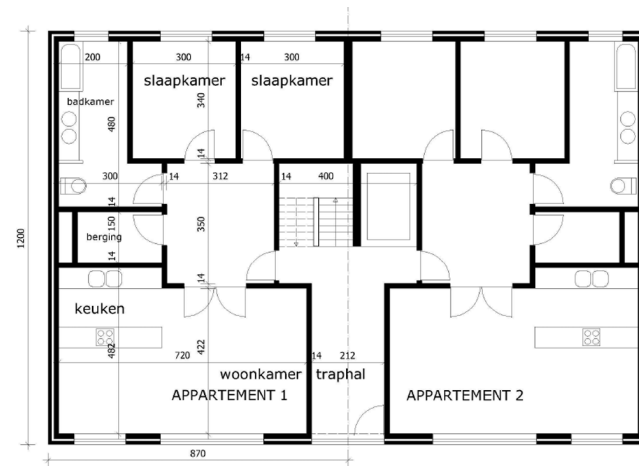
Figuur 11: Grondplannen - gelijkvloers en eerste verdieping (bovenaan) en gevelaanzichten - voor- en achtergevel (onderaan) van de vrijstaande woning (Van Der Veken et al., 2015)



Figuur 12: Zijgevels - links en rechts (bovenaan) en snede (onderaan) van de vrijstaande woning (Van Der Veken et al., 2015)

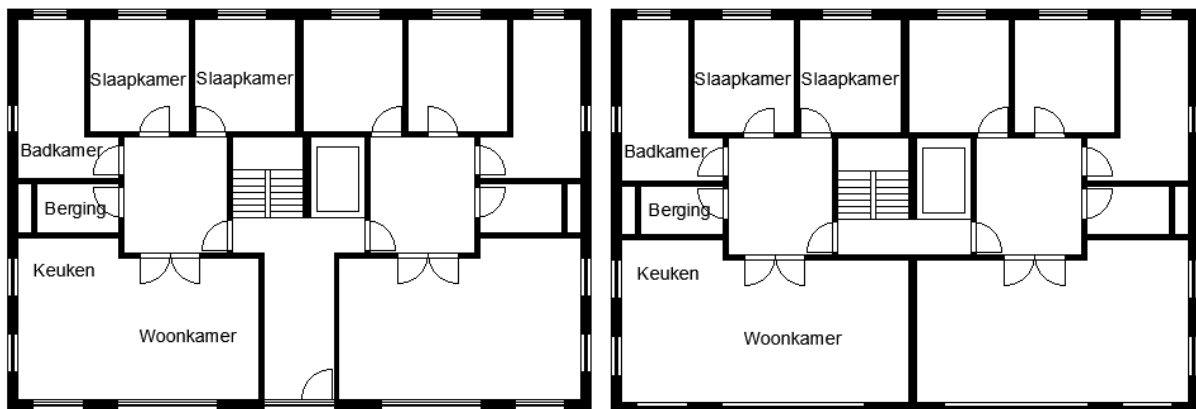
5.1.2. Meergezinswoningen

Naast de drie ééngezinswoningen, worden bijkomend zes typologieën aan meergezinswoningen meegenomen in dit onderzoek. Er wordt gestart vanaf het basisplan van een wooneenheid in een appartementsgebouw. Onderstaande figuur geeft dit plan weer, inclusief de bijhorende geveltekeningen. Hoewel een snede doorheen het volledige appartementsgebouw ontbreekt, kan op basis van de gevelaanzichten de verdiepingshoogte van een wooneenheid worden geschat. Het appartementsgebouw is bovendien 9,10 meter hoog. Daarnaast betreft het grondplan een breedte van 8,70 meter en een diepte van 12 meter. Analooq aan de ééngezinswoningen wordt een vereenvoudiging toegepast en zal de breedte van het grondplan naar 9 meter worden herleid.



Figuur 14: Grondplan appartement op het gelijkvloers (Van Der Veken et al., 2015)

Na het intekenen van de inkomhal, zijn de plannen van alle horizontaal ingesloten appartementen compleet. Er rest slechts enkel de plannen voor de hoekappartementen. Dit wordt verwezenlijkt door de linkerwand te beschouwen als een buitenwand. Aangezien het appartement niet rechtstreeks aansluit op een andere gebouw, biedt dit de mogelijkheid om extra licht binnen te brengen in de wooneenheid. Bijgevolg wordt de buitenwand voorzien van drie raamopeningen. Figuur 15 geeft de plaatsing van de ramen weer. Zo wordt een eerste opening aan de badkamer toegevoegd. De overige twee ramen worden in de keuken en woonkamer aangebracht.



Figuur 15: Referentiegrondplannen hoekappartementen

5.2. Variatie op geometrie

De negen bovenstaande referentiewoningen zijn niet voldoende om een degelijke benchmark aan op te stellen. Er is nood aan een bredere waaier aan woningen. Die wordt bijgevolg verkregen door te spelen met de geometrie van de woningtypologieën. Hierbij kan zowel de breedte en diepte als de verdiepingshoogte een wijziging ondergaan. Om een aanvaardbare en interpreteerbare set aan woningen te verkrijgen wordt een beperking opgelegd op het aantal variaties. Dit leidt tot de keuze van telkens drie afmetingen voor zowel de breedte, diepte als de verdiepingshoogte, die op hun beurt met elkaar worden gecombineerd.

Dit wordt nader toegelicht aan de hand van de referentiecasse van de rijwoning. Het plan van de woning beslaat een oppervlakte van 5 op 13 meter. De verdiepingshoogte (vrije hoogte) op het gelijkvloers bedraagt 3,5 meter en op de eerste verdieping 2,65 meter. De tabel hieronder geeft de drie wijzigingen per parameter weer. Uit de tabel blijkt dat de verdiepingshoogtes niet overeenkomen met de oorspronkelijke vrije hoogte van de gelijkvloerse verdieping. Dit komt doordat geopteerd wordt voor meer courante afmetingen die aansluiten bij de Vlaamse woningbouw. Bijgevolg worden dezelfde afmetingen voor de vrije hoogte(s) aangenomen in de overige referentiecasses. De geometrische parameters van de resterende woningtypologieën zijn terug te vinden in bijlage A.

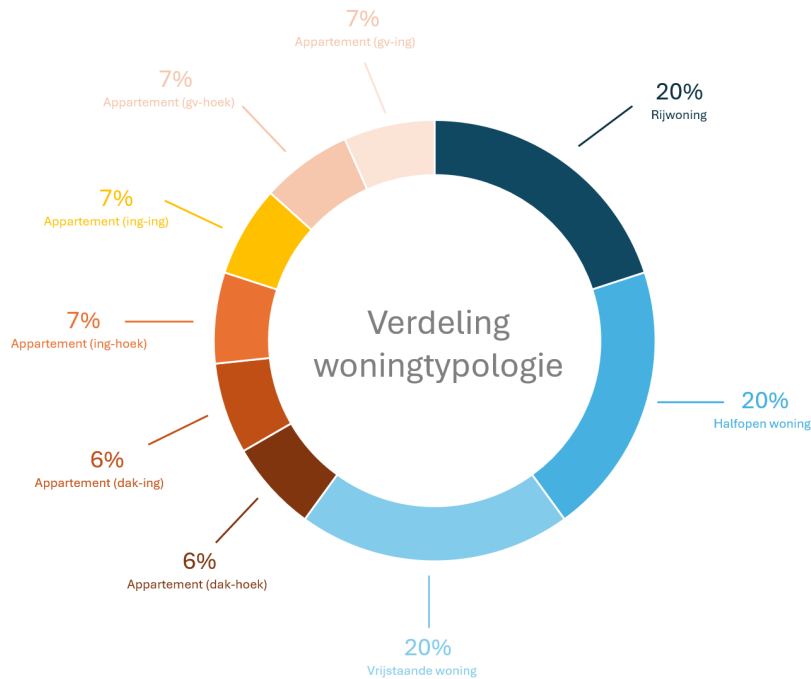
Breedte [m]	Lengte [m]	Verdiepingshoogte gelijkvloers [m]	Verdiepingshoogte eerste verdiep [m]
5	11	2,60	2,60
7	13	2,80	2,80
10	16	3	3

Tabel 5: Variaties op de geometrische parameters van rijwoningtypologie

Bij het aanpassen van de geometrische parameters variëren logischerwijs de gevels, daken en vloeren. Dit leidt ertoe dat zowel binnenmuren als raamopeningen mee verscalen met die geometrische parameters. In het achterhoofd moet worden gehouden dat de woningen steeds de realiteit moeten voorstellen en geen onwerkelijke composities mogen krijgen. Daarom zullen de trap, toiletruimte en deuropeningen niet verscalen, maar behouden hun oorspronkelijke dimensies in elk mogelijk woonscenario.

Door de wijzigende geometrische parameters breidt de waaier aan doorrekenbare woningen uit van 9 referentiecasses tot 405 varianten. Het aandeel per typologie wordt weergegeven in procenten in figuur 16. De 20% per typologie van ééngezinswoningen is gelijk aan 81 varianten aan rijwoningen, 81 aan halfopen woningen en 81 aan vrijstaande woningen. Die ééngezinswoningen bestaan steeds uit twee verdiepen. Hieruit volgt dat beide verdiepingen drie onderling verschillende hoogtes kan aanemen. In tegenstelling tot de ééngezinswoningen, bestaat de wooneenheid van de meergezinswoning uit slecht één enkele verdieping. Bijgevolg leidt dit tot drie keer minder varianten, wat wil zeggen dat er slechts 27 varianten per appartementstypologie worden verkregen. Dit komt overeen met de 6% à 7% in figuur 16.

Bijgevolg verschilt elke variant naargelang de brutovloeroppervlakte, het volume, de verliesoppervlakte, de compactheid en de vormefficiëntie van de woning. De varianten en hun geometrische karakteristieken worden eveneens per woningtypologie in bijlage A weergegeven. Hoe die karakteristieken zich definiëren, wordt hieronder, eventueel inclusief een formule, bondig beschreven:



Figuur 16: Percentage woningvarianten per typologie, inclusief de variaties op de geometrie

Brutovloeroppervlakte (BVO)

De brutovloeroppervlakte of bruikbare vloeroppervlakte wordt bekomen door de brutovloeroppervlakte van elk vloerniveau binnen het beschermd volume te sommeren (Vlaams Energie- & Klimaatagentschap, z.d.-b).

Verliesoppervlakte (A_v)

De (warmte)verliesoppervlakte is de som van de oppervlakten waarlangs warmte, afkomstig van het beschermd volume, verloren gaat naar de buitenomgeving, naar de grond en naar alle aangrenzende onverwarmde ruimtes die niet tot dit beschermd volume behoren (Vlaams Energie- & Klimaatagentschap, z.d.-c).

(Beschermd) volume (V)

Het beschermd volume wordt verkregen door het volume van alle ruimten in het gebouw die thermisch worden afgesloten van de buitenomgeving, van de grond en van de aangrenzende onverwarmde ruimtes te sommeren (Vlaams Energie- & Klimaatagentschap, z.d.-d).

Compactheid (C)

De compactheid is de verhouding van het beschermd volume ten opzichte van de verliesoppervlakte van de woning (Vlaams Energie- & Klimaatagentschap, z.d.-a). De formule is bijgevolg:

$$C = \frac{V}{A_t}$$

Vormefficiëntie (VE)

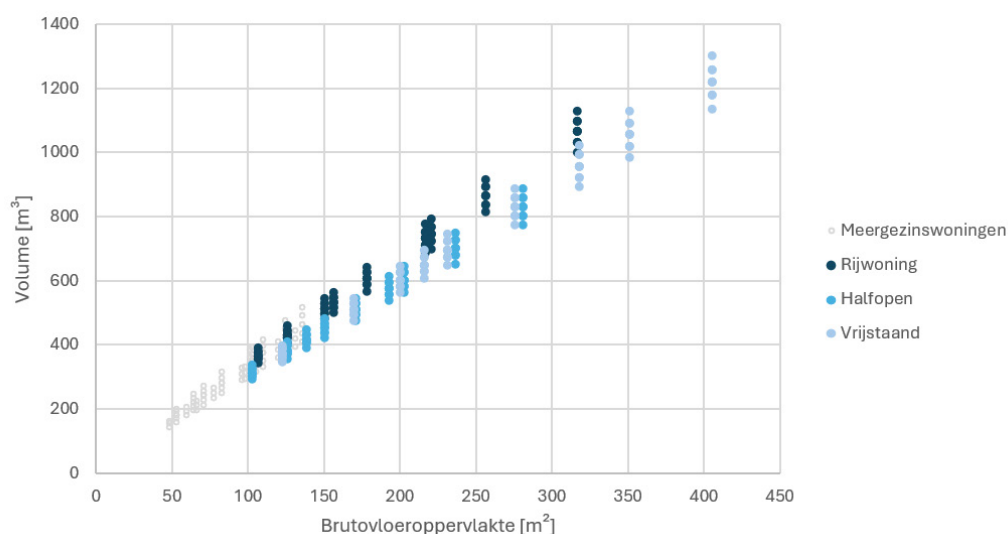
De vormefficiëntie van een gebouw sluit nauw aan bij de compactheid en is een alternatieve eenheid die grote gebouwen niet bevoordeelt. Hierbij wordt de verliesoppervlakte vergeleken met de equivalente boloppervlakte. De formule van de equivalente boloppervlakte volgt uit de berekening van de oppervlakte van een bol en het volume van een bol. Vervolgens wordt de vormefficiëntie bekomen door de equivalente boloppervlakte van de woning te delen door de verliesoppervlakte van de woning (Vlaams Energie- & Klimaatagentschap, z.d.-e). De formules voor de equivalent boloppervlakte en voor de vormefficiëntie staan hieronder uitgeschreven:

$$\text{Equivalente boloppervlakte} = 4 * \pi * \left(\frac{3 * V}{4 * \pi} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\text{Vormefficiëntie} = \frac{\text{equivalente boloppervlakte}}{A_t}$$

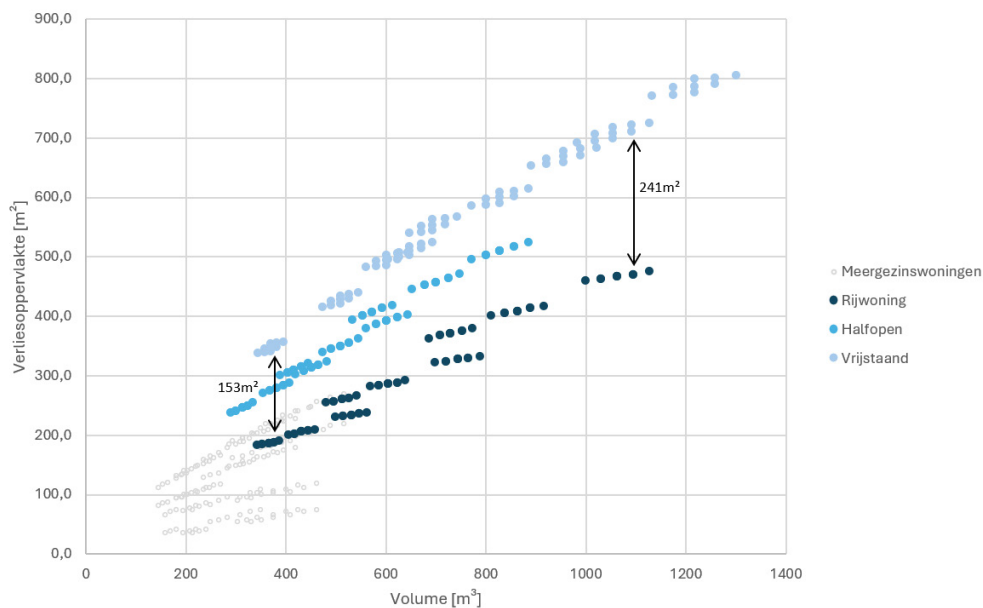
5.2.1. Eéngesinswoningen

Eens de geometrische karakteristieken van een woning zijn toegelicht, wordt er dieper ingezoomd op de werkelijke waarden van die karakteristieken per woningvariant. In een eerste stap, en om de leesbaarheid van de grafieken te behouden, wordt er enkel gekeken naar de eéngesinswoningen. In de volgende paragraaf worden op analoge wijze de meergezinswoningen in kaart gebracht. In figuur 17 wordt het volume per variant tegenover de brutovloeroppervlakte uitgezet. In eerste instantie valt op dat het volume stijgt naarmate de brutovloeroppervlakte toeneemt. De kleinste cases, in zowel brutovloeroppervlakte als volume, zijn de rij- en halfopen woningvarianten. Bovendien sluiten alle varianten van de rijwoning en halfopen woning relatief nauw bij elkaar aan. Echter, de vrijstaande woning sluit hier minder goed bij aan. Elke overeenkomstige variant van de vrijstaande woning is steeds groter in brutovloeroppervlakte en in volume. Dit is in werkelijkheid vaak ook het geval.



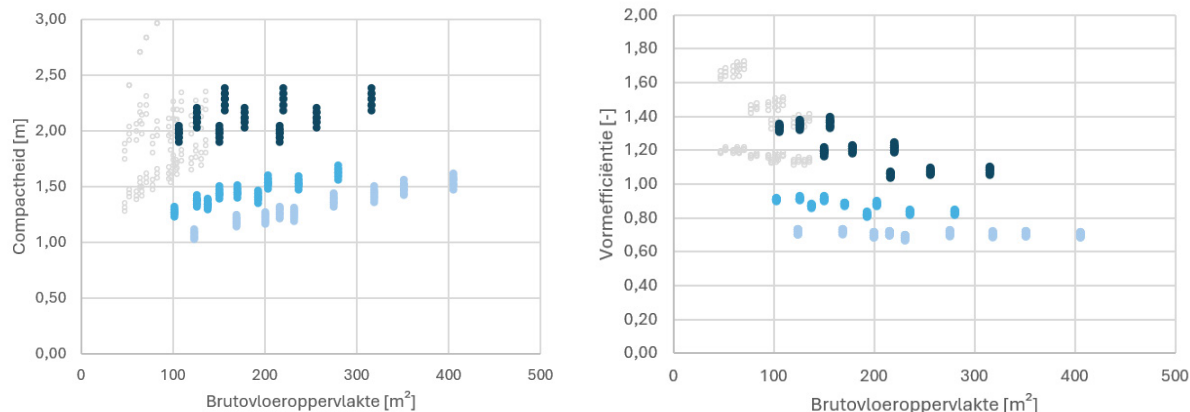
Figuur 17: Het volume (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle eéngesinswoningen

Analoog aan figuur 17, is in figuur 18 op te merken dat de verliesoppervlakte toeneemt indien het volume stijgt. Dit geldt voor de drie typologieën. Bovendien hebben vrijstaande woningen steeds een groter verliesoppervlakte, wat logischerwijs te wijten is aan de afwezigheid van gemene muren, dewelke wel terug te vinden zijn bij halfopen en rijwoningen. Om diezelfde reden is de verliesoppervlakte van de halfopen woning, waarbij slechts één muur grenst aan een andere woning, steeds groter dan de verliesoppervlakte van de rijwoning met twee gemeenschappelijke wanden. Verder vertoont de verliesoppervlakte van de vrijstaande woning een sterkere stijging. Dit is te zien aan de steeds groter wordende spreiding tussen de typologieën. Bij de kleinste varianten is het verschil in verliesoppervlakte 153m^2 , terwijl de grotere varianten al snel neigen naar een verschil van 250m^2 bij een even groot volume van beide woningen.



Figuur 18: De verliesoppervlakte (y-as) uitgezet tegenover het volume (x-as) voor alle ééngezinswoningen

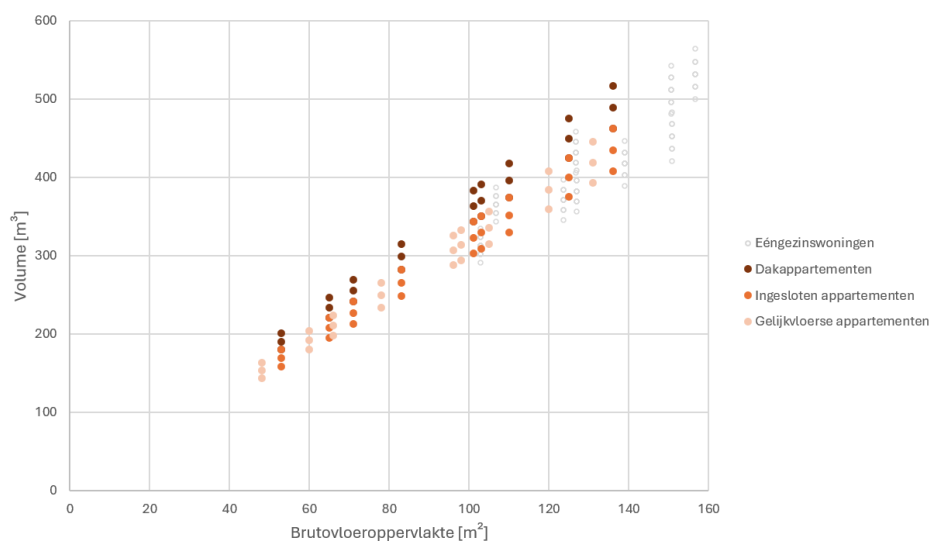
Daarnaast tonen onderstaande grafieken de relatie tussen enerzijds de compactheid en de brutovloeroppervlakte (grafiek links) en anderzijds de vormefficiëntie en de brutovloeroppervlakte (grafiek rechts). Uit beide grafieken wordt duidelijk dat de rijwoningstypologie een grotere compactheid en vormefficiëntie heeft. De hogere compactheid is de wijten aan de kleinere verliesoppervlakte bij een rijwoning. Daarna volgen de halfopen woningen. De kleinste compactheid komt voor bij de vrijstaande woningen met de kleinste brutovloeroppervlakte en het kleinste volume. Naarmate het volume van de woning toeneemt, evolueert eveneens de compactheid in toenemende zin. Verder stijgt de compactheid, globaal gezien, met de toename van de brutovloeroppervlakte. Echter, bij de vormefficiëntie doet zich het omgekeerde voor, namelijk een lichte daling van de vormefficiëntie bij een toename van de brutovloeroppervlakte, wat bij de rijwoning duidelijk naar voren springt. In tegenstelling tot de rijwoningstypologie, blijft de vormefficiëntie van de halfopen en vrijstaande woningen min of meer constant.



Figuur 19: De compactheid (links) en de vormefficiëntie (rechts) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle ééngezinswoningen. Dezelfde legende als in figuur 17 en 18 is hier toepasbaar.

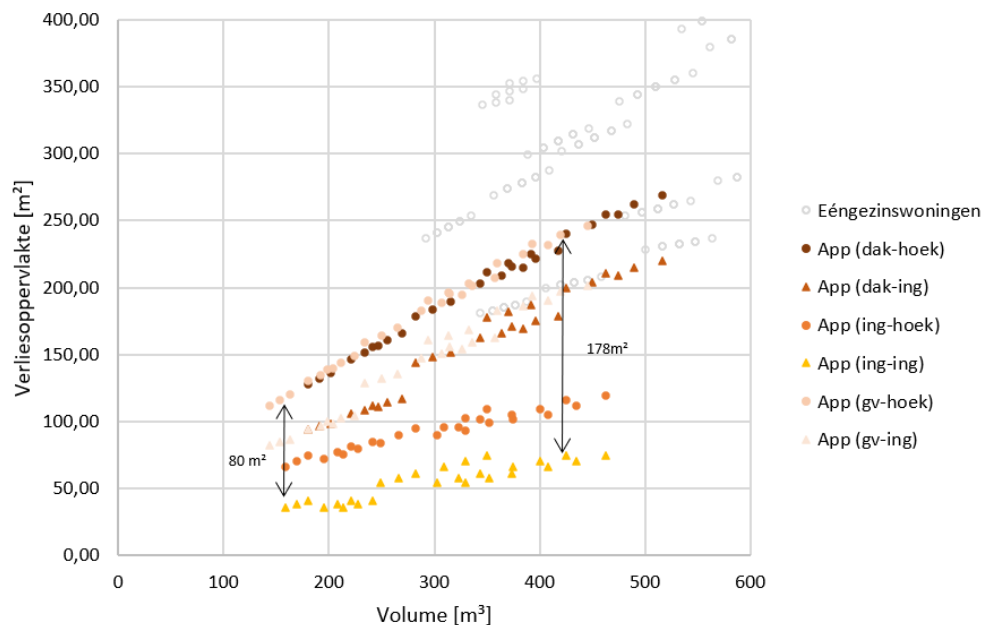
5.2.2. Meergezinswoningen

Appartementen zijn in het algemeen kleiner in zowel hun volume als in hun brutovloeroppervlakte dan ééngezinswoningen, wat op te merken is bij het naast elkaar leggen van figuren 17 en 20. Bovendien is in onderstaande figuur dezelfde trend te zien als bij de ééngezinswoningen, namelijk een stijging van de brutovloeroppervlakte impliceert een toename van het volume. Aangezien de zes typologieën, onderverdeeld in drie categorieën (dak-, verdiepings- en gelijkvloerse appartementen) vertrekken vanaf hetzelfde grondplan en slechts enkel verschillen in de totale hoogte en het oppervlak van de inkom van het appartementsblok, liggen de brutovloeroppervlakten min of meer in dezelfde lijn. Verder vertoont het dakappartement telkens een hoger volume aangezien bij de totale hoogte van het appartement eveneens de dakopbouw wordt meegerekend. Het gelijkvloerse appartement is echter kleiner in oppervlak door de aanwezigheid van de hoofdingang en heeft bijgevolg steeds een lager volume dan de overige twee categorieën.



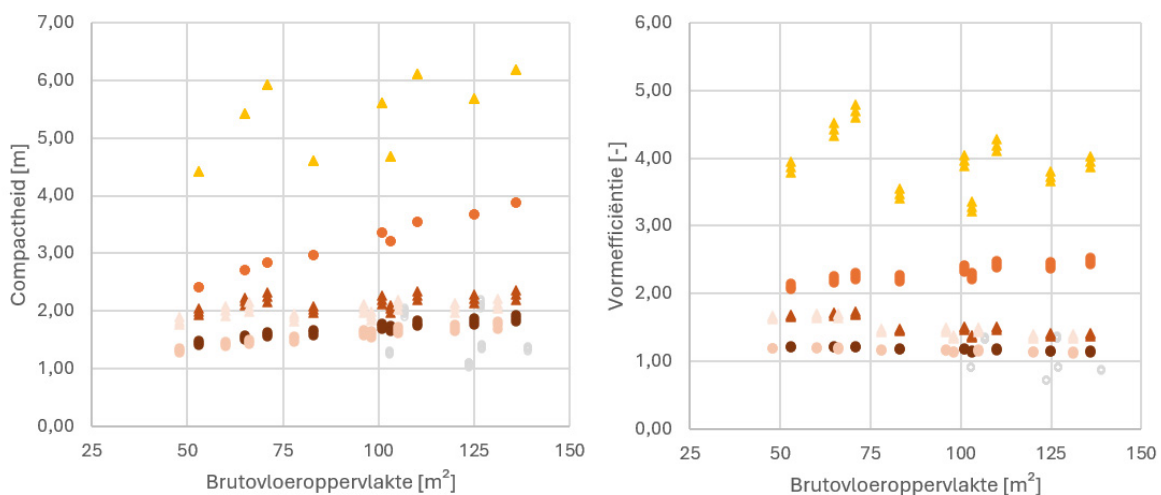
Figuur 20: Het volume (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle meergezinswoningen

Analoog aan de vorige paragraaf wordt in figuur 21 het verband tussen de verliesoppervlakte en het volume onderzocht. Drie van de zes typologieën zijn langs twee zijden omsloten door burens, terwijl de overige drie slechts naast één buur zijn gelegen. Dit verklaart het verschil in verliesoppervlakte in de grafiek. Bovendien is te zien dat de verliesoppervlakte toeneemt naarmate het volume van de wooneenheid stijgt. Analoog aan de ééngezinswoningen, vertoont de verliesoppervlakte van een bepaalde typologie een sterkere stijging dan de andere typologie. Zo stijgt de verliesoppervlakte van het gelijkvloerse appartement gelegen op een hoek in sterkere mate dan het horizontaal en verticaal omsloten appartement.



Figuur 21: De verliesoppervlakte (y-as) uitgezet tegenover het volume (x-as) voor alle meergezinswoningen

De compactheid en de vormefficiëntie worden in figuur 22 uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte. In beide grafieken vertoont het ingesloten verdiepingsappartement een hogere compactheid en vormefficiëntie. Beide geometrische karakteristieken zijn afhankelijk van de verliesoppervlakte, waardoor de kleine verliesoppervlakte van de woning die hoge waardes verklaart.



Figuur 22: De compactheid (links) en de vormefficiëntie (rechts) (y-as) uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte (x-as) voor alle meergezinswoningen. Dezelfde legende als in figuur 20 en 21 is hier toepasbaar.

Hoofdstuk 6. Bepaling materiaalvarianten

Residentiële gebouwen verschillen niet enkel op vlak van geometrie, maar bestaan vaak uit differentiërende opbouwen van de gebouwelementen. Om een voorbeeld te geven: niet elke wandopbouw is opgebouwd als de klassieke bakstenen spouwmuur. Bovendien wordt door het aanbrengen van verscheidene opbouwen de waaier aan representatieve woningen verder uitgebreid.

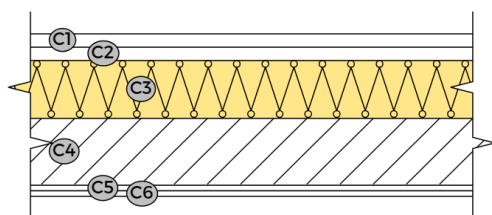
6.1. Elementniveau

De materiaalvarianten worden bijgevolg per gebouwelement bepaald. Hiervoor wordt gesteund op de voorgedefinieerde bibliotheek van de tool TOTEM. De eerste stap bestaat erin om twee hoofdcategorieën of bouwmethoden te onderscheiden. Dat wil zeggen dat er enerzijds gekeken wordt naar massiefbouw en anderzijds naar houtskeletbouw. Vervolgens wordt de hoofdcategorie verder onderverdeeld in vier subcategorieën die een indicatie geven over de milieu-impact van de gekozen opbouw. Het onderzoek start uitgaande van twee uitersten en twee gemiddelde waarden voor de milieuprestatie. Dit leidt bijgevolg tot de vier subcategorieën: uiterst hoog, gemiddeld hoog, gemiddeld laag en uiterst laag. Die rangschikking baseert zich op het uitdrukken van de milieuprestatie in mPt. Dat betekent dat een opbouw uit de uiterst hoge categorie resulteert in een hogere milieuscore dan de overige categorieën. Bovendien worden de resultaten, naast in millipunten, eveneens in kgCO₂ uitgedrukt. Aangezien TOTEM de milieuscore toekent als een geaggregeerde score, betekent de hoogste milieu-impact in mPt niet automatisch de hoogste milieu-impact uitgedrukt in kgCO₂. Het is bijgevolg mogelijk dat de rangschikking verloren gaat bij de resultaten met oog op de indicator klimaatverandering. Onderstaande paragrafen geven meer informatie over de gekozen elementen en hun bijhorende milieu-impact, en dit opgesplitst aan de hand van de twee bouwmethoden: massief- en houtskeletbouw.

6.1.1. Massiefbouw

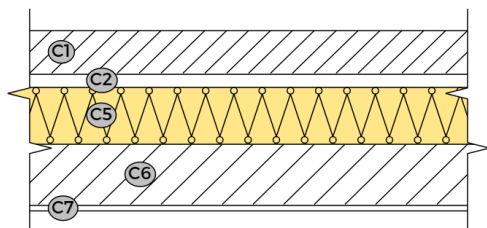
Massiefbouw is de meest gebruikelijke bouwwijze in België. Elk gebouwelement krijgt vier opbouwen met een variërende milieuscore en past telkens binnen de kenmerken van die bouwmethode. Welke opbouw voor de buitenwand wordt gekozen, wordt in figuur 23 weergegeven. De opbouwen van de overige gebouwelementen zijn op analoge wijze vermeld in bijlage B.

Uiterst hoog - Holle bakstenen kalkzandsteen



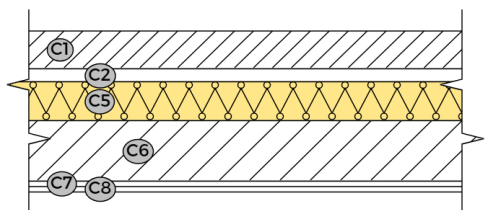
- C1: Granieten buitenbekleding (paneel: 1100x600x30 mm)
- C2: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C3: Glaswoldeken (130 mm)
- C4: Holle bakstenen kalkzandsteen (298x150x148 mm)
- C5: Gipspleister (12 mm)
- C6: Acrylverf

Gemiddeld hoog - Holle bakstenen kalkzandsteen



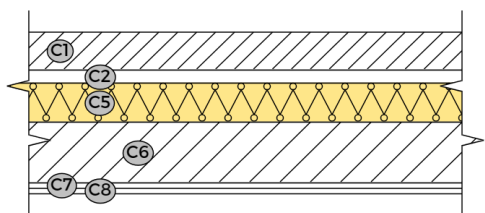
- C1: Keramische stenen (210x100x65 mm)
- C2: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C3: Spouwhaken (210 mm - $\varnothing$ 4 mm - 4 haken per m²)
- C4: Isolatieclips (4 clips per m²)
- C5: Rotswoldeken (130 mm)
- C6: Holle bakstenen kalkzandsteen (290x140x140 mm)
- C7: Geglazuurde keramieke tegels (200x200x9 mm)

Gemiddeld laag - Holle blokken beton



- C1: Keramische stenen (188x88x48 mm)
- C2: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C3: Spouwhaken (180 mm - $\varnothing$ 3,5 mm - 4 haken per m²)
- C4: Isolatieclips (4 clips per m²)
- C5: PUR (90 mm)
- C6: Holle blokken beton (290x140x190 mm)
- C7: Gipspleister (12 mm)
- C8: Acrylverf

Uiterst laag - Isolerende keramische bakstenen



- C1: Keramische stenen (188x88x48 mm)
- C2: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C3: Spouwhaken (180 mm - $\varnothing$ 3,5 mm - 4 haken per m²)
- C4: Isolatieclips (4 clips per m²)
- C5: Rotswoldeken (140 mm)
- C6: Isolerende keramische bakstenen (288x138x138 mm)
- C7: Kleipleister (20 mm)

Figuur 23: Opbouw buitenwand in massiefbouw (Bron: TOTEM)

Tabel 6 geeft per gebouwelement de bijhorende milieuscore en U-waarde weer, en dit telkens voor elke subcategorie. Voor de scores uitgedrukt in kgCO_2/m^2 wordt verwezen naar tabel 33 in bijlage C. Bij de keuze van de opbouwen wordt rekening gehouden met de U-waarde zodat die min of meer in lijn liggen met elkaar. Hoewel dit niet altijd mogelijk is door de beperkte gedefinieerde elementenbibliotheek van TOTEM, wordt toch naar een zo groot mogelijke overeenkomst tussen de U-waardes per subcategorie gestreefd. Daarnaast biedt de TOTEM bibliotheek niet de mogelijkheid om een trap te implementeren, waardoor uitzonderlijk op de softwaretool SimaPro wordt gesteund. Het is opmerkelijk dat hier een negatieve waarde wordt bekomen. Dit valt eenvoudig te verklaren door de materialiteit van de trap. Hout slaat namelijk CO_2 uit de atmosfeer op en stoot die aan het einde van de levensduur opnieuw uit. Er wordt bijgevolg meer CO_2 door het materiaal opgevangen dan uiteindelijk zal worden uitgestoten. Daarnaast biedt TOTEM een tweede beperking. Bij de gemene muren bekijkt TOTEM de volledige opbouw, terwijl slechts de helft van de milieuscore in rekening moet worden gebracht. Bijgevolg wordt de milieuscore manueel gehalveerd. Analoog voor de interne vloeren bij de meergezinswoningen: de vloer doet hier echter dienst als scheidend element tussen twee wooneenheden, waardoor de milieuscore eveneens over de twee woningen moet worden verdeeld.

Gebouwelement [mPt'en]	Uiterst - hoog U [W/m ² K] [mPt/m ²]		Gemiddeld - hoog U [W/m ² K] [mPt/m ²]		Gemiddeld - laag U [W/m ² K] [mPt/m ²]		Uiterst - laag U [W/m ² K] [mPt/m ²]	
Buitenwand	0,24	36,18	0,23	23,86	0,23	16,84	0,21	12,01
Gemene muur	0,54	14,48	0,43	4,79	0,52	4,555	0,48	2,35
Vloer op volle grond	0,23	48,77	0,17	32,18	0,2	25,13	0,23	16,95
Plat dak	0,23	69,79	0,24	25,74	0,22	19,14	0,23	15,4
Hellend dak	0,24	41,95	0,24	29,18	0,24	17,72	0,23	10,8
Raamopeningen	1,58	82,56	1,55	59,8	1,13	50,6	0,9	43,67
Buitendeur	1,26	118,4	1,26	118,4	1,13	113,91	1,13	113,91
Dragende wanden	2,24	7,03	1,79	5,65	3,18	2,5	2,13	0,93
Niet-dragende wanden	1,5	27,6	1,98	6,95	2,13	4,42	0,66	3,49
Interne vloer	0,71	36,04	2	21,31	0,73	19,01	1,53	11,51
Binnendeur	2,34	88,99	2,34	14,72	2,34	14,72	3,58	13,38
Trap	/	-0,041	/	-0,041	/	-0,041	/	-0,041
Garagepoort	1,38	224,37	1,38	224,37	1,38	224,37	1,38	224,37

Tabel 6: U-waarde en milieuscore per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, respectievelijk uitgedrukt in $\text{W/m}^2\text{K}$ en mPt/m^2

De milieuscore is de totaalscore van de som van de ingebedde en operationele impact. In tabel 7 worden de ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement samengevat. Opnieuw wordt doorverwezen naar bijlage C waarin tabel 34 de belastingen op basis van de klimaatsverandering beschrijft. Terwijl de ingebedde impact slaat op de impact van de verschillende materialen waaruit het gebouwelement is opgebouwd, staat de operationele impact in relatie tot de transmissieverliezen. Dit verklaart waarom in onderstaande tabel enkel aan de schilelementen een waarde van de operationele impact wordt toegekend. Bij binnenelementen treden echter geen transmissieverliezen op en is bijgevolg de operationele impact gelijk aan nul.

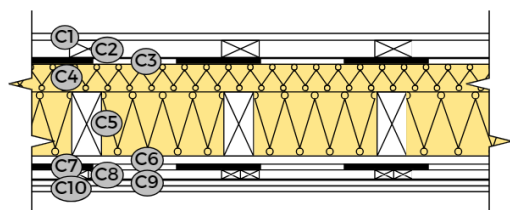
Gebouwelement [mPt'en]	Uiterst - hoog		Gemiddeld - hoog		Gemiddeld - laag		Uiterst - laag	
	II	OI	II	OI	II	OI	II	OI
Buitenwand	30,02	6,17	17,79	6,08	10,75	6,09	6,47	5,55
Gemene muur	14,48	0	4,79	0	4,555	0	2,35	0
Vloer op volle grond	43,83	4,94	28,45	3,73	20,82	4,3	12,02	4,93
Plat dak	63,83	5,96	19,46	6,28	13,28	5,87	9,46	5,93
Hellend dak	35,58	6,36	22,84	6,34	11,32	6,4	4,65	6,15
Raamopeningen	41,17	41,39	19,19	40,61	20,99	29,6	20,04	23,63
Buitendeur	57,6	60,8	57,6	60,8	59,25	54,66	59,25	54,66
Dragende wanden	7,03	0	5,65	0	2,5	0	0,93	0
Niet-dragende wanden	27,6	0	6,95	0	4,42	0	3,49	0
Interne vloer	36,04	0	21,31	0	19,01	0	11,51	0
Binnendeur	88,99	0	14,72	0	14,72	0	13,38	0
Trap	-0,041	0	-0,041	0	-0,041	0	-0,041	0
Garagepoort	16,75	207,62	16,75	207,62	16,75	207,62	16,75	207,62

Tabel 7: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, uitgedrukt in mPt/m²

6.1.2. Houtskeletbouw

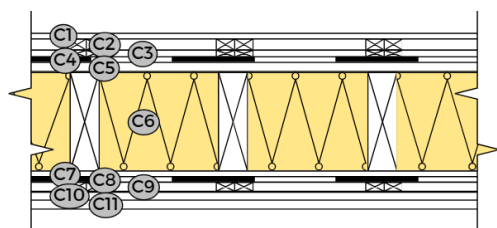
Houtskeletbouw is naast massiefbouw een veelvoorkomende bouwmethode die in de Vlaamse woningbouw wordt toegepast. Deze paragraaf is analoog aan paragraaf 6.1.1. Startend met de vier opbouwen van de buitenwand in figuur 24 wordt overgegaan naar de tabellen 8 en 9. Hierbij geeft tabel 8 de U-waardes en milieuscores weer, terwijl tabel 9 de totale milieuscore verdeeld over de ingebedde (II) en operationele impact (OI). Opnieuw worden de opbouwen van de overige gebouwelementen aan bijlage B en de tabellen, uitgedrukt in kgCO₂/m², aan bijlage C toegevoegd. Bovendien zijn de gemaakte vaststellingen voor de trap, de gemene muren en interne vloeren nog steeds geldig. Daarnaast valt uit de vergelijking van tabellen 6 en 8 op dat voor bepaalde gebouwelementen, bijvoorbeeld het hellend dak, geen onderscheid in bouwwijze wordt gemaakt.

Uiterst hoog - Naaldhout (hardhout)



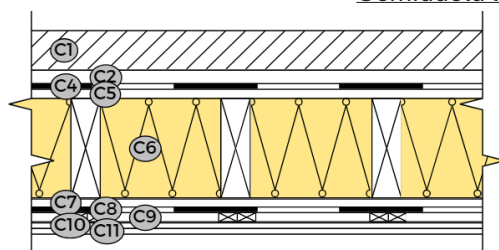
- C1: Kunststofpaneel (17 mm)
- C2: Naaldhouten latten (38x38 mm - h.o.h. 300 mm)
- C3: PE-folie (0,22 mm)
- C4: Geëxpandeerde kurkplaat (60 mm)
- C5: Naaldhout + geëxpandeerde kurkgranulaten (140 mm)
- C6: Multiplexplaat (18 mm)
- C7: PE-folie (0,22 mm)
- C8: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C9: Gipsvezelplaat (12,5 mm)
- C10: Geglazuurde keramische tegels (200x200x9 mm)

Gemiddeld hoog - Naaldhout (hardhout)



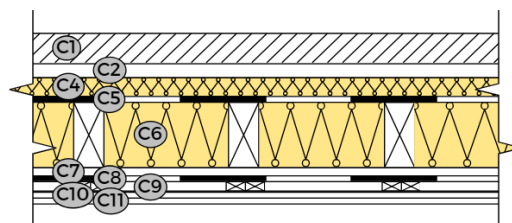
- C1: Vezelcement platen (600x320x4 mm)
- C2: Naaldhouten latten (36x27 mm - h.o.h. 275 mm)
- C3: Naaldhouten latten (30x15 mm - h.o.h. 400 mm)
- C4: PE-folie (0,22 mm)
- C5: Houtvezelplaat (22 mm)
- C6: Naaldhout + hennepplaat (220 mm)
- C7: Houtvezelplaat (8 mm)
- C8: PE-folie (0,22 mm)
- C9: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C10: Houtvezelplaat (18 mm)
- C11: Kleipleister (20 mm)

Gemiddeld laag - Naaldhout (hardhout)



- C1: Keramische stenen (188x88x48 mm)
- C2: Niet-geventileerde luchtpouw (30 mm)
- C3: Spouwvakken (180 mm - $\varnothing$ 3,5 mm - 4 haken per m²)
- C4: PE-folie (0,22 mm)
- C5: Houtvezelplaat (22 mm)
- C6: Naaldhout + glaswoldeken (220 mm)
- C7: Spaanplaat (18 mm)
- C8: PE-folie (0,22 mm)
- C9: Naaldhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C10: Gipsvezelplaat (12,5 mm)
- C11: Acrylverf

Uiterst laag - Naaldhout (hardhout)



- C1: Keramische stenen (210x65x50 mm)
- C2: Niet-geventileerde luchtpouw (30 mm)
- C3: Spouwvakken (180 mm - $\varnothing$ 3,5 mm - 4 haken per m²)
- C4: Rotswoldeken (40 mm)
- C5: PE-folie (0,22 mm)
- C6: Naaldhout + rotswoldeken (140 mm)
- C7: Spaanplaat (18 mm)
- C8: PE-folie (0,22 mm)
- C9: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C10: Gipspleister (12,5 mm)
- C11: Behangpapier (1 mm)

Figuur 24: Opbouw buitenwand in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

Gebouwelement [mPt'en]	Uiterst - hoog U		Gemiddeld - hoog U		Gemiddeld - laag U		Uiterst - laag U	
	[W/m ² K]	[mPt/m ²]	[W/m ² K]	[mPt/m ²]	[W/m ² K]	[mPt/m ²]	[W/m ² K]	[mPt/m ²]
Buitenwand	0,24	31,34	0,22	18,76	0,2	14,1	0,23	12,82
Gemene muur	0,21	15,055	0,19	4,985	0,22	4,185	0,23	3,915
Vloer op volle grond	0,23	48,77	0,17	32,18	0,2	25,13	0,23	16,95
Plat dak	0,25	17,67	0,24	15,41	0,23	14,09	0,13	9,9
Hellend dak	0,24	41,95	0,24	29,18	0,24	17,72	0,23	10,8
Raamopeningen	1,58	82,56	1,55	59,8	1,13	50,6	0,9	43,67
Buitendeur	1,26	118,4	1,26	118,4	1,13	113,91	1,13	113,91
Dragende wanden	0,26	7,68	1,09	4,55	1,09	4,55	1,14	3,07
Niet-dragende wanden	0,47	10,06	0,38	7,35	0,4	5,91	0,4	5,39
Interne vloer	0,51	27,14	1,09	18,32	0,54	16,77	0,48	7,65
Binnendeur	2,34	88,99	2,34	14,72	2,34	14,72	3,58	13,38
Trap	/	-0,041	/	-0,041	/	-0,041	/	-0,041
Garagepoort	1,38	224,37	1,38	224,37	1,38	224,37	1,38	224,37

Tabel 8: U-waarde en milieuscore per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m²K en mPt/m²

Gebouwelement [mPt'en]	Uiterst - hoog		Gemiddeld - hoog		Gemiddeld - laag		Uiterst - laag	
	II	OI	II	OI	II	OI	II	OI
Buitenwand	25,01	6,33	12,99	5,77	8,85	5,26	6,79	6,04
Gemene muur	15,055	0	4,985	0	4,185	0	3,915	0
Vloer op volle grond	43,83	4,94	28,45	3,73	20,82	4,3	12,02	4,93
Plat dak	11,23	6,44	9,16	6,25	7,97	6,13	6,44	3,47
Hellend dak	35,58	6,36	22,84	6,34	11,32	6,4	4,65	6,15
Raamopeningen	41,17	41,39	19,19	40,61	20,99	29,6	20,04	23,63
Buitendeur	57,6	60,8	57,6	60,8	59,25	54,66	59,25	54,66
Dragende wanden	7,68	0	4,55	0	4,55	0	3,07	0
Niet-dragende wanden	10,06	0	7,35	0	5,91	0	5,39	0
Interne vloer	27,14	0	18,32	0	16,77	0	7,65	0
Binnendeur	88,99	0	14,72	0	14,72	0	13,38	0
Trap	-0,041	0	-0,041	0	-0,041	0	-0,041	0
Garagepoort	16,75	207,62	16,75	207,62	16,75	207,62	16,75	207,62

Tabel 9: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, uitgedrukt in mPt/m²

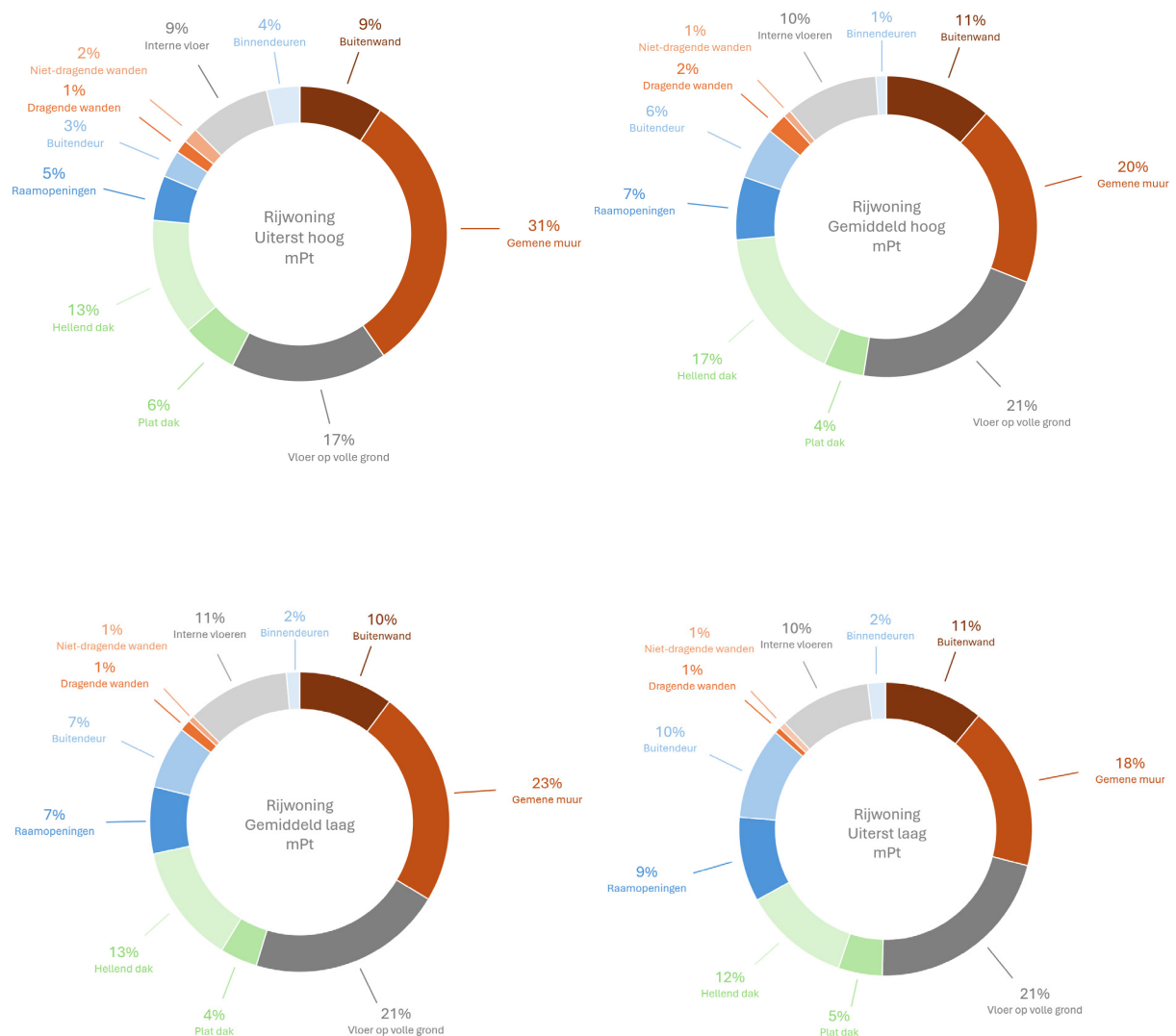
6.2. Gebouwniveau

Na het definiëren op elementniveau wordt overgeschakeld naar gebouwniveau. Dit wordt verwezenlijkt door de gebouwelementen per subcategorie met elkaar te combineren. Dit betekent dus dat een opbouw van een buitenwand met een uiterst hoge milieu-impact wordt gecombineerd met een opbouw van een gemene wand met een uiterst hoge milieu-impact, etc. Er wordt bijgevolg nooit een combinatie gemaakt tussen opbouwen uit een andere subcategorieën. Dit zou uiteindelijk tot een te grote en moeilijk interpreteerbare set aan data leiden. Deze paragraaf maakt onderscheid tussen de twee bouwmethoden, waarbij het aandeel van de gebouwelementen per milieu-impactniveau wordt onderzocht.

6.2.1. Massiefbouw

Om het aandeel van de gebouwelementen te schetsen wordt vertrokken van de referentiecasse van de rijwoningtypologie. Hierop worden alle gebouwelementen uit een bepaalde subcategorie gecombineerd zodat vier volwaardige gebouwen met differentiërende opbouwen worden bekomen. Dit leidt tot vier individuele milieuscores per gebouw, waarbij ieder gebouwelement een specifiek aandeel van de totale milieuprestatie bijdraagt. Volgende cirkeldiagrammen in figuur 25 geven het aandeel per gebouwelement weer. Deze diagrammen gelden voor de milieuscores uitgedrukt in mPt/m^2 . Echter zijn de resultaten met oog op de klimaatveranderingsindicator terug te vinden in figuur 67 van bijlage D. Bovendien wordt in elk van de grafieken zowel de trap als de garagepoort niet beschouwd. Dit komt doordat de trap een negatieve impact heeft, die bijkomend slechts beperkt en bijgevolg verwaarloosbaar is. Verder is geen garagepoort in de rijwoning aanwezig en levert bijgevolg geen bijdrage.

Uit de vier diagrammen komen dezelfde drie hoofdrolspelers naar voor. Dit wil zeggen dat in elk scenario de gemene muur, de vloer op volle grond en het hellend dak voor meer dan de helft de totale milieuscore bepalen. Met name de gemene muur en de vloer op volle grond dragen het meest bij, aangezien ze afwisselend het grootste aandeel van de milieuprestatie leveren. Hoewel de milieuscore van de gemene muur als individueel gebouwelement geen hoge waarde aanneemt, is het aandeel toch zeer hoog. Dit valt echter te verklaren door de grote oppervlakte aan gemeenschappelijke muren in de referentiecasse. In tegenstelling tot de gemene wanden, is de milieuscore van de vloer op volle grond aanzienlijk hoger. Bijgevolg leidt de combinatie van een dergelijke milieuscore met een vrij grote oppervlakte, eveneens tot een hoge milieuscore. Dit verklaart dus de aanzienlijke bijdrage van de vloer op volle grond. Verder worden de buitenwanden, raamopeningen en de interne vloeren steeds belangrijker naarmate de globale impact van de gebouwelementen daalt. Het aandeel van overige gebouwelementen blijft bovendien min of meer constant binnen de vier scenario's.



Figuur 25: Aandeel van de milieuscore (mPt/m^2) per gebouwelementen per subcategorie van massiefbouw, toegepast op een rijwoning

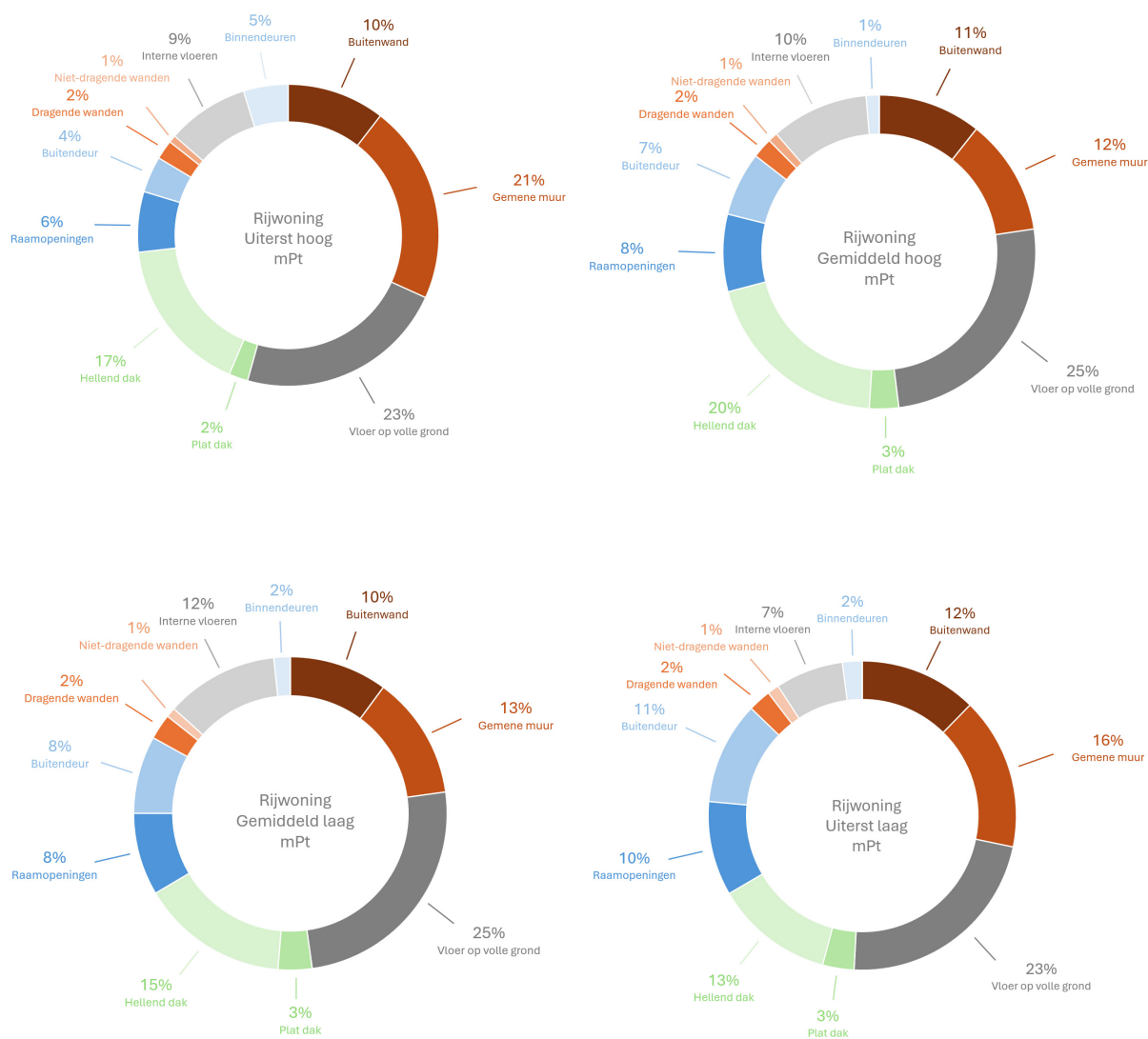
Vervolgens vertonen de grafieken in figuur 67 van bijlage D analoge hoofdrolspelers doorheen de verschillende scenario's. Echter is het aandeel van het hellend dak gereduceerd en staat het zijn hoofdrol af aan de buitenwand bij een gemiddeld hoge en gemiddelde lage materialenimpact. Bovendien delen beide elementen een gelijkwaardig aandeel in het scenario van de uiterst lage materialenimpact. Verder neemt het aandeel van de buitendeur toe naarmate de impact van de elementen daalt. Een mogelijke verklaring hiervoor is de geringe daling van de milieuscore van de buitendeur in vergelijking met de andere gebouwelementen. Analoge redenering komt voor bij de interne vloeren bij het scenario van de uiterst lage materialenimpact. Het volgende wat opvalt in het uiterst lage scenario, is dat de invloed van de dragende binnenwanden verwaarloosbaar klein wordt. Terwijl andere gebouwelementen slecht een geringe reductie van de milieuscore vertonen, vertoont de milieuscore van de dragende wanden een sterke dalen. De overige gebouwelementen behouden echter een constant aandeel doorheen de vier scenario's.

6.2.2. Houtskeletbouw

Analoge werkwijze aan vorige paragraaf wordt hier toegepast met het oog op houtskeletbouw. Dit leidt tot vier nieuwe cirkeldiagrammen die terug te vinden zijn in figuur 26. De overige vier diagrammen gebaseerd op de milieuscore uitgedrukt in kgCO_2/m^2 worden in figuur 68 in bijlage D vermeld.

Opnieuw springen dezelfde drie hoofdbijdragers naar voor: de vloer op volle grond, de gemene muur en het hellend dak. Hierbij is een analoge redenering als hierboven te bedenken. Verder valt op dat de vloer op de begane grond steeds het grootste aandeel levert en voor elke materialenimpact blijft hangen rond een aandeel van 25%. Daarnaast vergroten de bijdragen van de buitenwand en de interne vloeren naarmate de milieuscore van de subcategorie daalt. Echter in het uiterste geval, nl. de uiterst lage materiaalimpact, daalt de bijdrage van de interne vloeren. Dit valt te verklaren door de lage milieuscore van de interne vloer in vergelijking met de andere gebouwelementen in die specifieke subcategorie. De aandelen van de buitendeur en de raamopeningen verhogen eveneens wanneer de totale milieu-impact wordt verlaagd, wat het gevolg is van de hoge milieubelasting van de elementen in elk van de vier subcategorieën. Wanneer de individuele scores van die twee laatstgenoemde gebouwelementen met de overige gebouwelementen worden vergeleken, valt onmiddellijk op dat de milieuprestaties minder sterk reduceren naarmate de globale materialenimpact daalt. Bovendien blijft het aandeel van overige gebouwelementen ook hier min of meer constant.

Vervolgens steekt de vloer op volle grond er in elk scenario in figuur 68 met kop en schouders bovenuit. Dit is te wijten aan de hoge impact van de vloerafwerking, zoals keramische tegels, maar eveneens aan de impact van de PUR isolatie en het beton. Daarnaast vertonen het hellend dak, de buitenwanden, de raamopeningen en de gemene muren elk een aanzienlijke bijdrage die steeds zeer nauw op elkaar aansluiten. Bovendien stijgt eveneens het aandeel van de buitendeur indien de totale milieuscore van het gebouw daalt. Een analoge verklaring, als bij massiefbouw, is van toepassing. Zoals in vorige diagrammen reeds naar voor komt, blijven ook in dit geval de bijdragen van de binnendeuren, het plat dak en de dragende en niet-dragende binnenwanden ongeveer gelijk.



Figuur 26: Aandeel van de milieuscore (mPt/m²) per gebouwelementen per subcategorie van houtskeletbouw, toegepast op een rijwoning

Hoofdstuk 7. Benchmarking op de totale milieu-impact

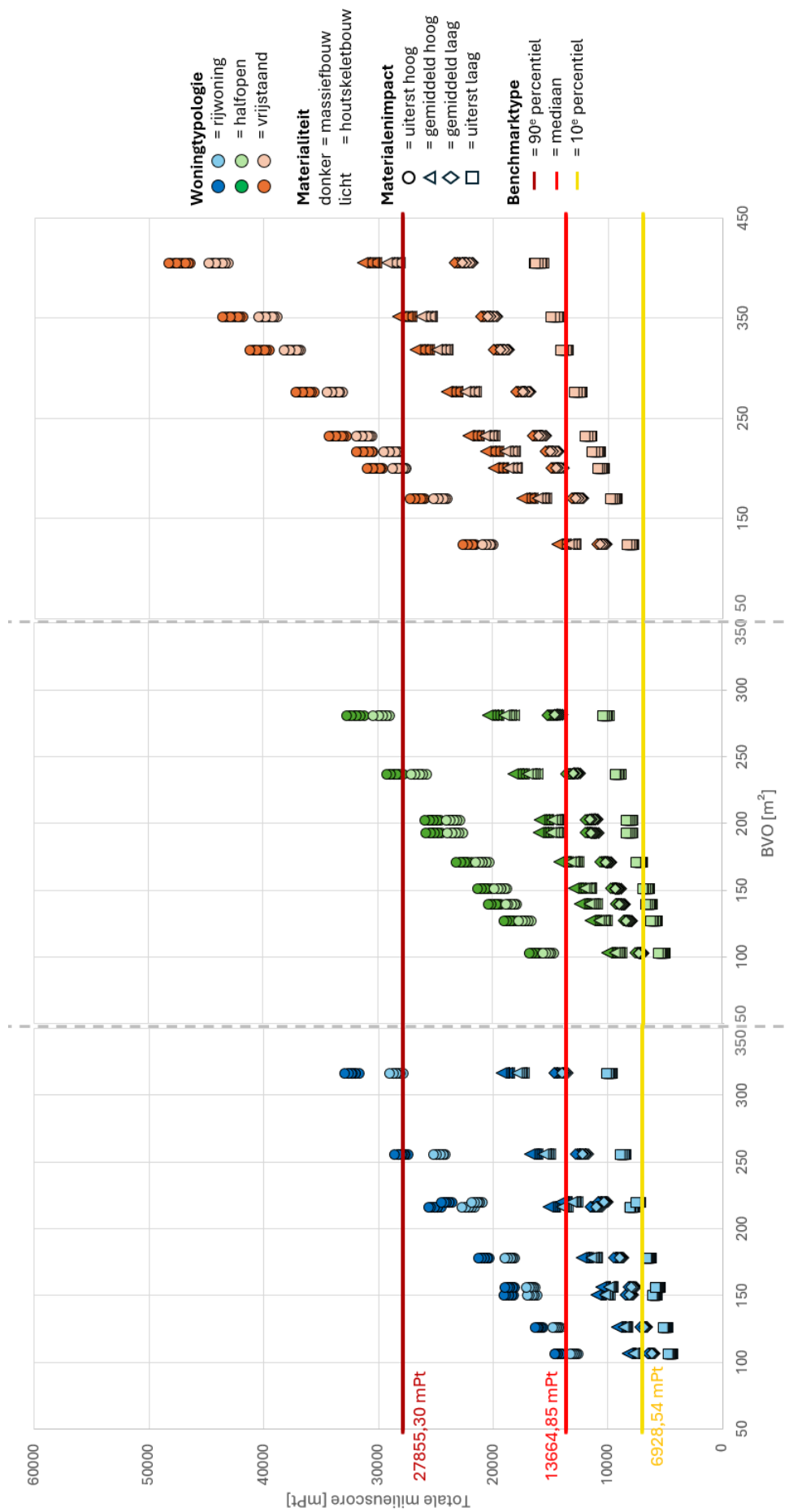
Na het definiëren van alle mogelijke varianten op basis van de typologie, geometrie en materialiteit is een volledige set aan cases verworven. In totaal leidt dit tot een gebouwen aantal van 3240 woningen waarvan in de volgende stap de milieu-impact wordt berekend. Op basis van die gebouwen wordt een aanzet gegeven van mogelijke benchmarkwaarden, dewelke op analoge wijze zoals in de literatuur verkregen worden. Op die manier verschijnen steeds drie lijnen op de grafieken die de mogelijke benchmarkwaardes weergeven. De bovenste en onderste lijn staan voor het gebied waarbinnen 80% van de cases zich bevinden. Bijgevolg staan de lijnen voor de boven- en ondergrens van de limietwaarde of respectievelijk het 10^e en 90^e percentiel. Er wordt echter gekozen voor deze percentielen, aangezien de Belgische studies van Mouton et al. (2022, 2023, 2024) eveneens deze grenzen hanteren. Bovendien wordt de referentiewaarde of benchmarkwaarde aangenomen als de mediane waarden van alle doorgerekende cases.

In dit hoofdstuk wordt de totale milieuscore zonder normalisatie onderzocht. Hierdoor kunnen reeds een aantal conclusies op vlak van typologie, geometrie en materialiteit getrokken worden. Het hoofdstuk wordt bovendien opgesplitst in één- en meergezinswoningen, waarbij twee verschillende benchmarks op beide hoofdtypologieën zullen worden bekomen. Daarnaast worden de benchmarkwaardes opnieuw berekend op de combinatie van de één- en meergezinswoningen. Hierdoor wordt duidelijk wat de keuze van de typologie op de benchmark teweegbrengt.

7.1. Ééngesinswoningen

De set aan ééngesinswoningen telt in totaal 1944 woningen met 648 varianten per typologie. De totale milieuscores worden in figuur 27 tegenover de bijhorende brutovloeroppervlakte van de woning uitgezet. De drie benchmarkwaardes zijn in dit geval enkel gebaseerd op de ééngesinswoningen. Uit de grafiek valt af te lezen dat de milieuscore stijgt naarmate de brutovloeroppervlakte van de woning toeneemt. Dit is een logisch gevolg van de extra hoeveelheid materiaal die nodig is voor het bouwen van een grotere woning. Vervolgens wordt duidelijk dat massiefbouw steeds in een hogere impact resulteert. Hieruit kan worden geconcludeerd dat omwille van ecologische redenen beter voor houtskeletbouw wordt geopteerd. Dit is voornamelijk het geval indien de categorie uiterst hoog is opgenomen, aangezien de spreiding tussen massief- en houtskeletbouw groter is. Naarmate de impact van de materialen echter daalt, reduceert eveneens de spreiding tussen beide bouwmethoden.

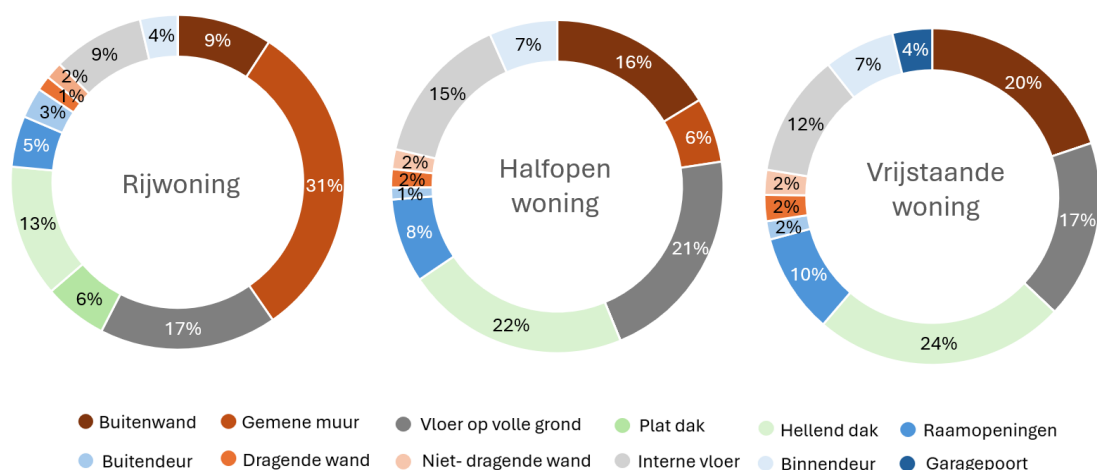
Vervolgens concludeert de grafiek dat wanneer een uiterst hoge materialenimpact wordt toegepast bij eender welke typologie, dat de milieuscore zich in elke situatie, met uitzondering van de rijwoningen met een oppervlakte van 106,67 m² en opgebouwd uit houtskeletbouw, boven de referentiewaarde van 13664,85 mPt bevindt. Hieruit kan worden gesteld: wanneer deze benchmarkwaarde wordt geaccepteerd, dan wordt bouwen met een hoge materialenimpact niet meer mogelijk.



Figuur 27: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle ééngezinshuizen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaarden gebaseerd op de ééngezinshuizen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt.

Globaal gezien kan echter gesteld worden dat eveneens het bouwen van een vrijstaande woning wordt bemoeilijkt. Het merendeel van hun milieuscore ligt boven de vooropgestelde benchmarkwaarde. Enkele varianten met een kleine brutovloeroppervlakte en/of een lage materialenimpact worden toegelaten. Dit leidt tot slechts 25% van de vrijstaande woningvarianten of 75 varianten die effectief worden aanvaard. Van die 75 varianten is 47% opgebouwd uit massiefbouw. Bovendien geeft figuur 28 weer aan welke gebouwelementen, met als bouwwijze massiefbouw, die hoge milieuscore te wijten is. Hieruit valt onmiddellijk op te merken dat de buitenwanden, de vloer op volle grond en het hellend dak voor 61% de totale milieuscore bepalen. Daarnaast geeft het ook de aandelen van de gebouwelementen voor de overige typologieën weer. Voor de rijwoning levert de gemene muur immers de grootste bijdrage, terwijl bij de halfopen typologie de interne vloeren de rol van derde invloedrijkste bijdrager op zich neemt.

In tegenstelling tot de vrijstaande woningen, bevinden er zich opvallend meer rijwoningen en halfopen woningen onder de mediane waarde. Het aandeel van de halfopen woningen en rijwoningen die volgens de referentiewaarde worden geaccepteerd bedraagt 60% en 65% respectievelijk. Hierbij is het merendeel van de toegelaten varianten echter opgebouwd uit houtskeletbouw. Zo is slechts 48% van de rijwoningen en 49% van de halfopen woningen opgebouwd uit massiefbouw. Daarnaast bevindt 20% van alle ééngezinswoningen zich buiten de grenzen van de benchmarking. Die grenzen worden gedefinieerd door de waarden 27855,30 en 6928,54 mPt, respectievelijk de onder- en bovengrens. Die woningen die bijgevolg buiten de grenzen vallen zijn voornamelijk vrijstaande woningen met een hoge materialenimpact en rijwoningen of halfopen woningen met een zeer kleine oppervlakte en een uiterst lage materialenimpact.



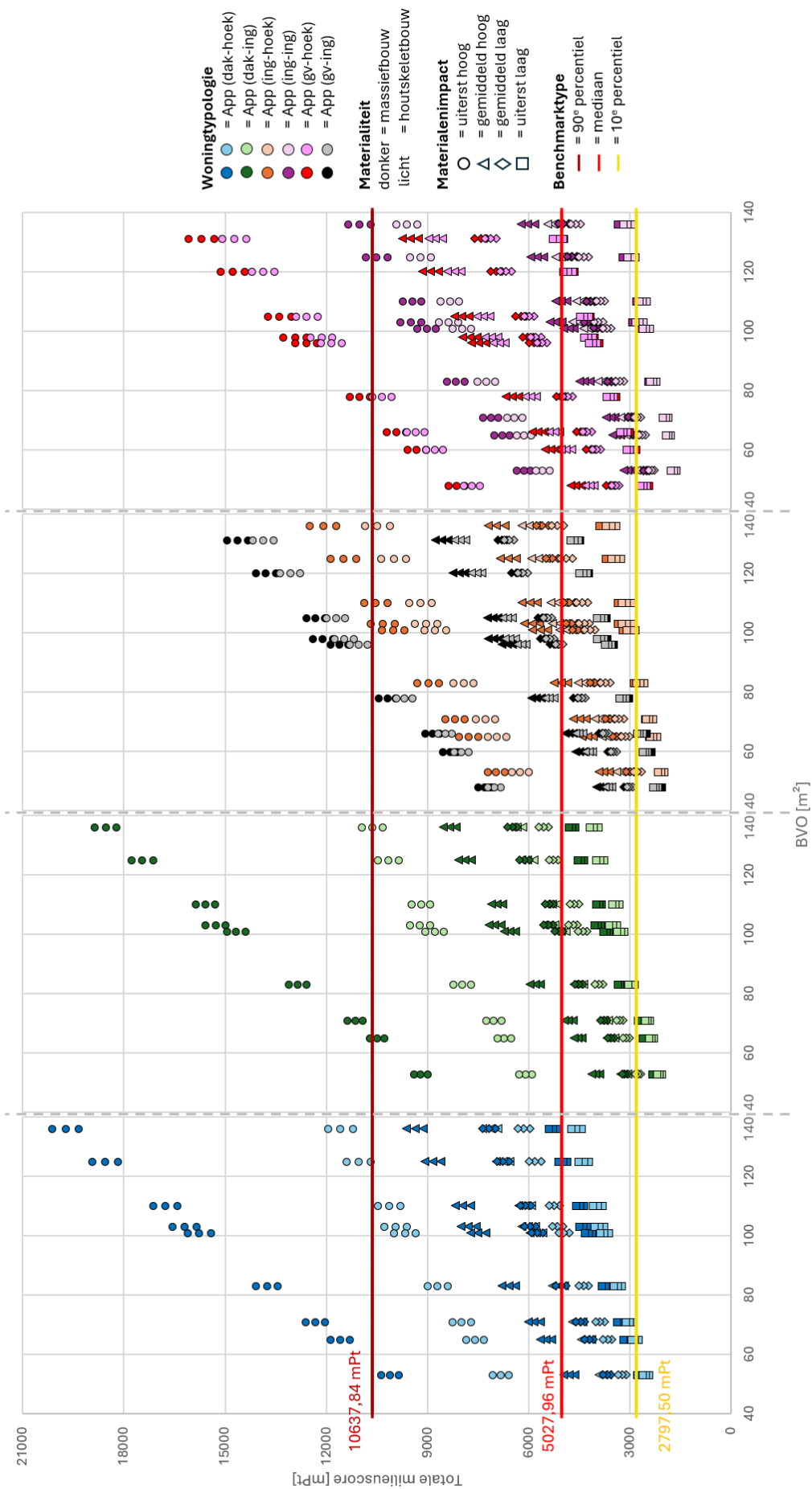
Figuur 28: Bijdrage aan de totale milieuscore van de gebouwelementen in massiefbouw per de ééngezinswoningstypologie, met het kleinste brutovloeroppervlakte en een uiterst hoge materialenimpact

Een analoge grafiek op basis van de klimaatveranderingsindicator is terug te vinden in figuur 69 van bijlage E. De grafiek levert een ander resultaat op, maar de globale conclusies blijven meestal gelden. Hieruit worden de referentiewaarde gelijk aan 151717,55 kgCO₂ en grenswaarden gelijk aan 87755,85 kgCO₂ en 268837,02 kgCO₂ gevonden. Daarnaast toont de grafiek meer spreiding tussen de resultaten binnen een subcategorie, aangezien de subcategorieën van de materiaalvarianten verloren gaan bij het uitdrukken van de milieuscore in kgCO₂. Verder stijgt het aantal toelaatbare rijwoningen met 9%. Slechts 47% van de rijwoningvarianten opgebouwd uit massiefbouw voldoen aan de opgelegde benchmarkwaarde. Analooch stijgt het aandeel van de toelaatbare halfopen woningen tot 65%, waarvan eveneens 47% opgebouwd is uit massiefbouw. In tegenstelling tot deze typologieën, daalt het aantal acceptabele vrijstaande woningen. 11% voldoet immers aan de opgelegde referentiewaarde, waarvan 59% opgebouwd is uit houtskeletbouw.

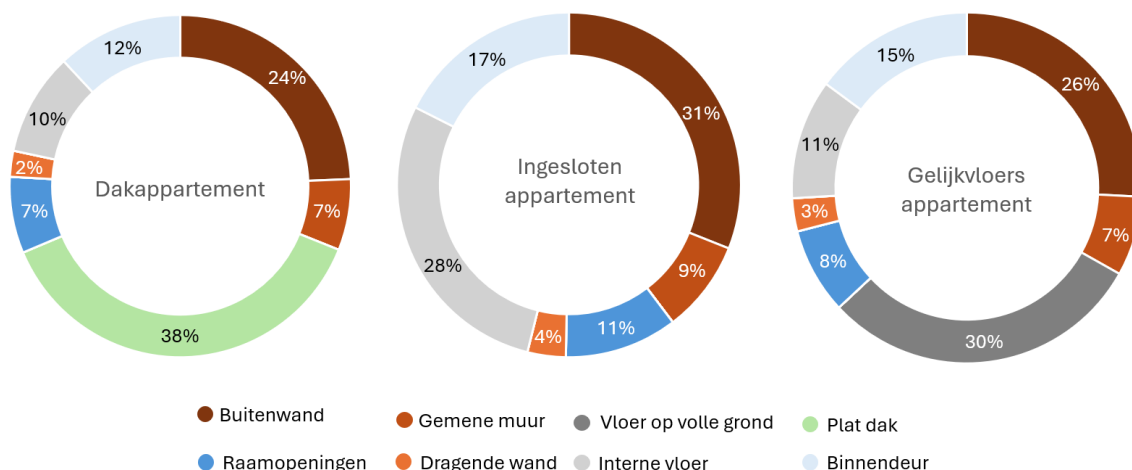
7.2. Meergezinswoningen

De overige 1296 woningen zijn onder te verdelen in de zes appartementstypologieën met elk 216 varianten per typologie. Analooch aan de vorige paragraaf wordt in figuur 29 de milieu-impact van de woningen, uitgedrukt in mPt, uitgezet tegenover de brutovloeroppervlakte, waarbij hetzelfde lineaire verband van toepassing is. Ook hier worden de benchmarktypes enkel bepaald op basis van de meergezinswoningen, wat leidt tot 5027,96 mPt als referentiewaarde, 10637,84 mPt als ondergrens en 2797,50 mPt als bovengrens. Deze waarden zijn aanzienlijk lager dan de benchmarktypes voor de ééngezinswoningen. Daarnaast wordt uit de grafiek duidelijk dat ook hier houtskeletbouw steeds beter scoort dan massiefbouw. Bovendien vertonen de twee typologieën van de dakappartementen een enorme spreiding tussen de verschillende bouwwijzen voor de materialen met een uiterst hoge impact. Aangezien dit probleem zich niet stelt bij de verdiepings- en gelijkvloerse appartementen, zal die spreiding te wijten zijn aan de impact van de dakopbouwen.

Bovendien zijn de zes typologieën onder te verdelen in drie hoofdtypologieën: dak-, verdiepings- en gelijkvloerse appartementen. Uit de grafiek blijkt dat de dakappartementen globaal een hogere milieuprestatie vertonen, wat te wijten is aan de bijdrage van het dak, zoals figuur 30 aangeeft. De figuur toont de bijdrage, in procent, aan de totale milieuscore per gebouwelement uit massiefbouw met een uiterst hoge materiaalimpact. Dit wordt bijkomend toegepast op een hoekappartement met de kleinste brutovloeroppervlakte. De milieuscores van de overige twee hoofdtypologieën is voornamelijk te danken aan de buitenwanden en interne vloeren bij verdiepingsappartementen en de vloer op volle grond bij gelijkvloerse meergezinswoningen.



Figuur 29: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de meergezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m² tot 140m² oploopt om daarna opnieuw te starten bij 40m².



Figuur 30: Bijdrage aan de totale milieuscore van de gebouwelementen in massiefbouw voor hoekappartementen, per hoofdtypologie, met het kleinste brutovloeroppervlakte en een uiterst hoge materialenimpact

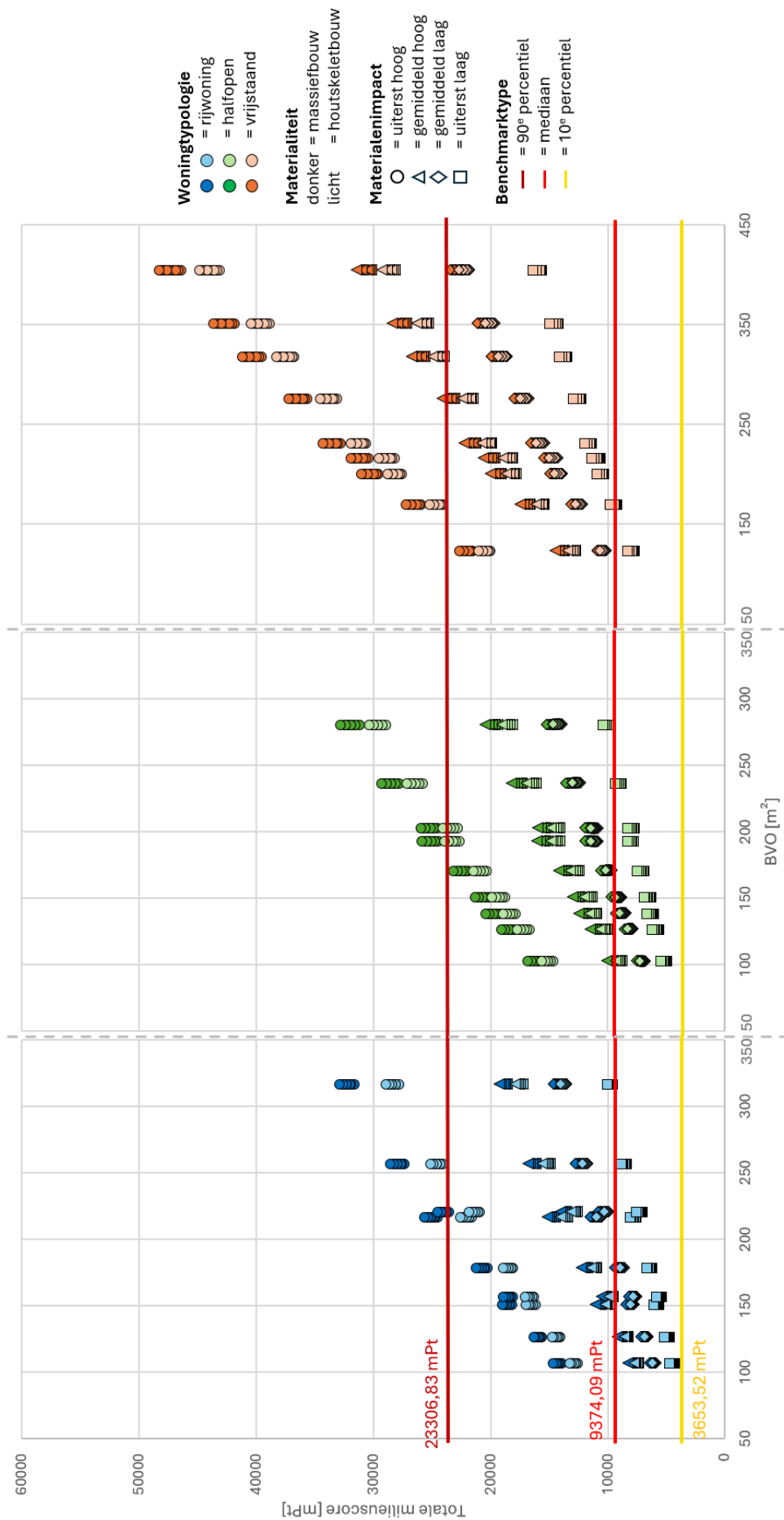
Verder is het opvallend dat de varianten met een uiterst hoge materiaalimpact steeds boven de referentiewaarde gelegen zijn. In tegenstelling tot de uiterst hoge materialenimpact, wordt de tegenpool, op een paar uitzonderingen na, steeds geaccepteerd ongeacht de grootte van de brutovloeroppervlakte. Daarnaast worden gemiddeld hoge en lage materialenimpact voorname-lijk toegelaten wanneer het appartement klein tot middelgroot is. Vanaf de oppervlakte te aanzien-lijk stijgt, worden deze varianten niet meer geaccepteerd. Het percentage aan meer gezinswoningen die voldoen aan de mediane waarde zijn: 41% van de dak-hoekappartementen, 51% van de dak-ingesloten appartementen, 58% van de verdiepings-hoekappartementen, 68% van de verdiepings-ingesloten appartementen, 38% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 45% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen. Analooq aan de ééngezinswoningen is telkens meer dan de helft, variërend tussen de 51% en 59%, van de varianten opgebouwd uit houtskeletbouw.

Indien de milieuscore in kgCO₂, weergegeven in figuur 71 van bijlage E, wordt uitgedrukt, naderen de gelijkvloerse appartementen de scores van de dakappartementen bij een uiterst hoge materialenimpact. Dit is te verklaren door de vloer op volle grond die een grotere invloed zal uitoefenen in deze scenario's. Bovendien geeft de grafiek de benchmarkwaarde van 56554,55 kgCO₂ weer. Daarnaast vertoont de hoeveelheid acceptabele appartementen immers een aanzienlijk verschil. Volgende percentages aan toelaatbare wooneenheden per typologie worden gevonden: 29% van de dak-hoekappartementen, 47% van de dak-ingesloten appartementen, 69% van de verdiepings-hoekappartementen, 82% van de verdiepings-ingesloten appartementen, 28% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 44% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen. Hierbij ontstaat een grote spreiding in het aandeel aan wooneenheden opgebouwd uit houtskelet. Dit varieert tussen de 52% en 73%, waarbij het grootste verschil tussen de twee bouwmethoden het meest zichtbaar is bij de dakappartementen.

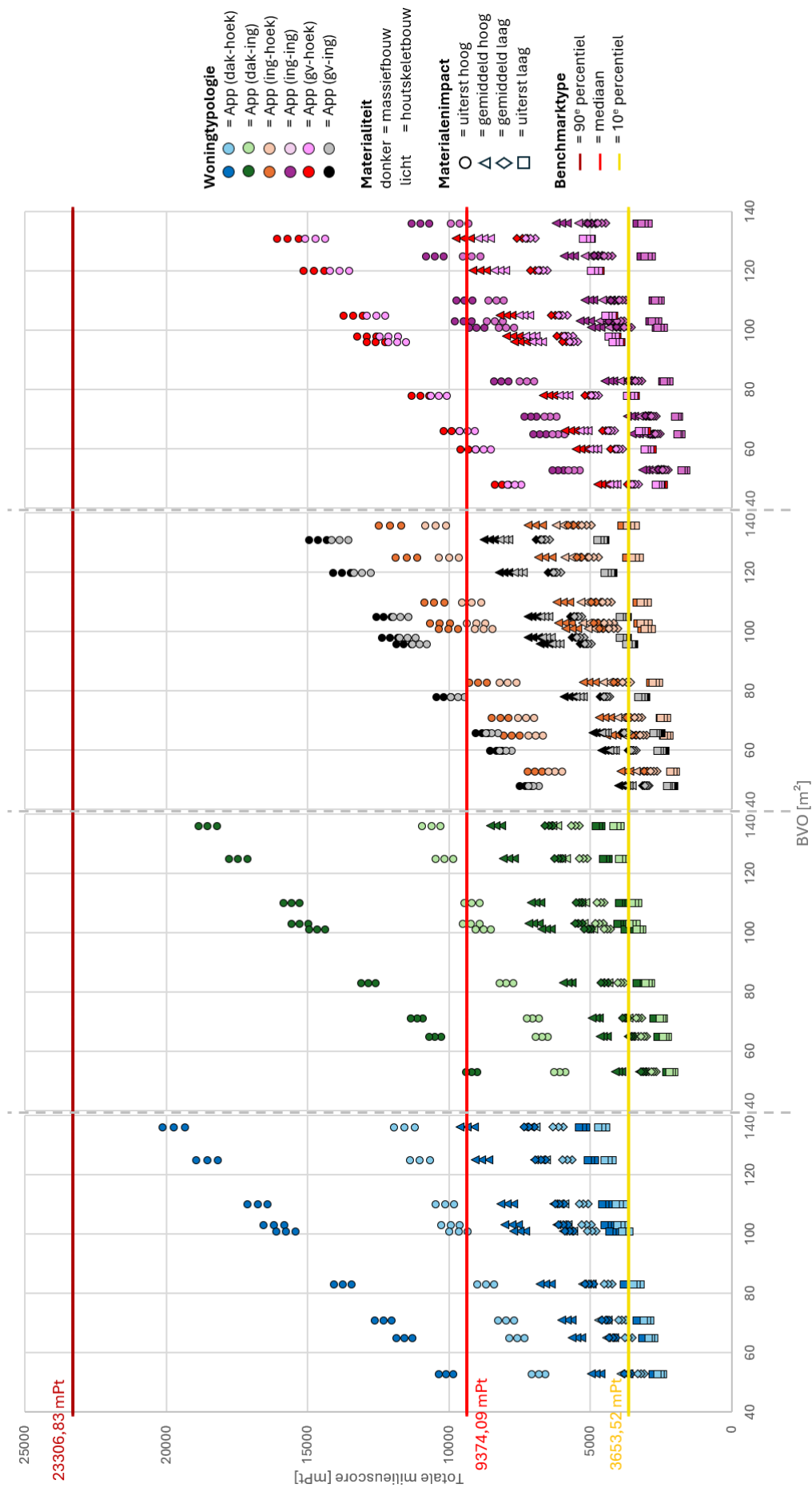
7.3. Alle woningtypologieën

De figuren 31 en 32 tonen analoge grafieken aan de vorige twee paragrafen, met het verschil dat de benchmarkwaardes nu berekend worden op basis van de volledige set aan 3240 woningen. De nieuwe benchmark is gelijk aan 9374,09 mPt. Aangezien de benchmarktypes afhankelijk zijn van de bekeken set van woningen, treedt een verschuiving van de horizontale lijnen ten opzichte van de grafieken in de figuren 27 en 29 op. Door de invloed van de meergezinswoningen schuiven de lijnen in figuur 27 verticaal naar beneden. Het inverse vindt plaats in figuur 32 ten opzichte van figuur 29.

In eerste instantie voldoet, door de invloed van de appartementen, geen enkele ééngezinswoningstypologie in combinatie met een uiterst hoge materialenimpact aan de nieuwe referentiewaarde. Verder valt op dat vrijstaande woningen zullen verdwijnen, met uitzondering van 15% van de varianten. Dit zijn voornamelijk de kleinste woningen met materialen die een uiterste lage impact hebben. 87% van de toegelaten vrijstaande varianten is immers opgebouwd uit een houtskelet. In tegenstrijd met de vrijstaande woningen, zullen meer halfopen en rijwoningen mogen gebouwd worden, respectievelijk zo'n 46% en 55% van de typologie. Bij deze typologieën worden meer massiefbouwvarianten toegelaten. Zo is 38% van de rijwoningen en 34% van de halfopen woning opgebouwd uit massiefbouw.



Figuur 31: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt.



Figuur 32: Totale milieuscore, uitgedrukt in mPt, voor alle meergezinswoningen in functie van de bruto vloeroppervlakte met benchmarkwaarden gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m² tot 140m² oploopt om daarna opnieuw te starten.

Vervolgens toont figuur 70 in bijlage E de nieuwe benchmark van 104780,80 kgCO₂. Bovendien volgen uit de vergelijking met figuur 31 analoge ondervindingen. Het grote verschil is dat de mogelijkheid tot het bouwen van een vrijstaande woning volledig verdwijnt. Er is namelijk geen enkel variant van die typologie die kan voldoen aan de nieuwe referentiewaarde. Echter blijven rijwoningen en halfopen woningen wel in het aanbod, maar daalt het aandeel aan varianten die voldoen. Uit de resultaten blijkt dat nog slechts 38% en 23% van respectievelijk rijwoningen en halfopen woningen, een lagere milieuscore vertonen.

In de volgende stap wordt de focus op de meergezinswoning gelegd. De figuren 32 en de bijhorende figuur 72 in bijlage E zijn hiervoor representatief. Door de aanzienlijke stijging, door de invloed van de ééngezinswoningen, van voornamelijk de ondergrens, bevindt geen enkele variant zich buiten die opgelegde grens. Ook de overige twee benchmarktypes (10^e percentiel en de mediaan) ondergaan een stijging, wat bijgevolg gepaard gaat met een verhoging van het aantal acceptabele woonvarianten. Zo resulteert uit figuur 32 dat alle appartementstypologieën, op enkele uitzonderingen per typologie na, een acceptabele milieuscore met zich meebrengen. Die uitzonderingen bestaan enkel uit varianten met een uiterst hoge materialenimpact, eventueel in combinatie met een groot brutovloeroppervlakte. Dit resulteert bijgevolg in volgende percentages aan acceptabele meergezinswoningen: 87% van de dak-hoekappartementen, 88% van de dak-ingesloten appartementen, 93% van de verdiepings-hoekappartementen, 95% van de verdiepings-ingesloten appartementen, 87% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 91% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen.

Daarnaast toont figuur 72 dat bijna alle appartementen aan de benchmark voldoen. Echter alle verdiepingsappartementen zijn onder de benchmarkwaarde gelegen. De uitzonderingen gaan slechts over een beperkt aantal cases die een (uiterst) hoge materialenimpact combineren met een groot brutovloeroppervlakte. De aandelen aan uitzonderingen per typologie resulteren in volgende percentages: 12% van de dak-hoekappartementen, 6% van de dak-ingesloten appartementen, 8% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 4% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen.

7.4. Besluit

Uit de analyse van de totale milieuscore blijkt dat houtskeletbouw steeds beter scoort dan massiefbouw. Zo blijkt dat natuurlijke materialen, zoals bijvoorbeeld hout, een lagere milieuscore hebben dan massieve materialen zoals beton en baksteen. De materiaalkeuze binnen het milieu- en duurzaamheidsverhaal is bijgevolg snel beslist: een houtskelet in combinatie met materialen met een lage impact. Verder wordt op vlak van typologie duidelijk dat vrijstaande woningen als typologie zullen verdwijnen. Zelfs ééngezinswoningen, in het algemeen, zijn moeilijker te realiseren indien enkel naar milieuprestatie wordt gekeken. De appartementstypologie wordt bijgevolg de hoofdrolspeler in het milieuverhaal. Hierbij springt één bepaalde hoofdtypologie naar voren: het verdiepingsappartement. De voorkeur gaat hierbij uit naar een horizontaal ingesloten wooneenheid. Bovendien is de totale milieuscore sterk afhankelijk van de grootte en het volume van de woning. Hoe meer materiaal, hoe hoger de impact op het milieu. Aangezien bepaalde typologieën blijken te verdwijnen, wordt in een volgende stap een normalisatie toegevoegd. Die zou er moeten voor zorgen dat de benchmark haalbaar blijft voor die typologieën zonder dat deze een aanzienlijke nefaste bijdrage leveren aan het milieu. Hierbij rijst de vraag: welke normalisatie sluit het best bij dit complex milieuvraagstuk aan?

Hoofdstuk 8. Normalisatie en benchmarking

Dit hoofdstuk biedt antwoord op de voorgaande vraag. Bovendien wordt de invloed van de normalisatie op de totale milieuscore onderzocht. Uit de literatuur wordt de milieuscore steeds genormaliseerd naar de vierkante meters vloeroppervlakte van de woning. In dit hoofdstuk wordt die vooropgestelde normalisatie in vraag gesteld en verder kritisch onderzocht. Zo wordt de milieuscore genormaliseerd naar andere geometrische karakteristieken afgetoetst. De invloed van de reeds vijf geïntroduceerde parameters wordt bijgevolg in dit deelonderzoek geanalyseerd. Die vijf geometrische karakteristieken zijn: de brutovloeroppervlakte, het volume, de verliesoppervlakte, de compactheid en de vormefficiëntie van de woning.

Daarna worden benchmarks op basis van de brutovloeroppervlakte en de best passende normalisatiefactor opgesteld. Opnieuw wordt dezelfde structuur als in voorgaande hoofdstukken behouden om de leesbaarheid van de onderzochte data te garanderen. In eerste instantie wordt dus gefocust op ééngezinswoningen om vervolgens de meergezinswoningen in kaart te brengen. Bovendien wordt elke benchmarkwaarde bekomen op basis van de totale set aan woonvarianten.

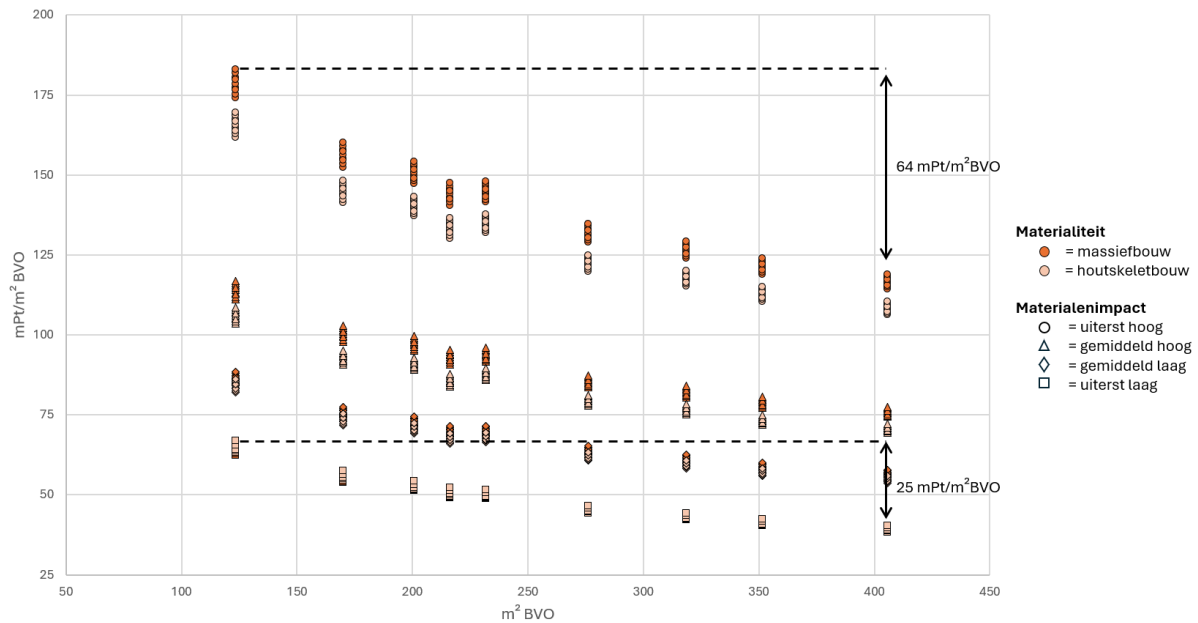
8.1. Normalisatie van de totale milieuscore

In deze paragraaf worden de vijf geometrische parameters op hun beurt als normalisatiefactor afgetoetst. Op basis van dit deelonderzoek wordt telkens duidelijk wat de voor- en/of nadelen van die normalisatie zijn.

8.1.1. Analyse: normalisatie naar de geometrische parameters

Dit deelonderzoek beperkt zich tot één enkele woontypologie. Die keuze wordt echter gemaakt om de data te vereenvoudigen aangezien analoge resultaten te verwachten zijn voor de overige typologieën. Omwille van de grote spreiding in de resultaten van één bepaalde typologie, wordt gekozen om het onderzoek af te toetsen aan de vrijstaande woningen. Alle mogelijke varianten van de vrijstaande woning worden in dit deelonderzoek geanalyseerd. Het onderzoek start met het analyseren van de normalisatie naar de brutovloeroppervlakte. Figuur 33 geeft het bekomen resultaat grafisch weer.

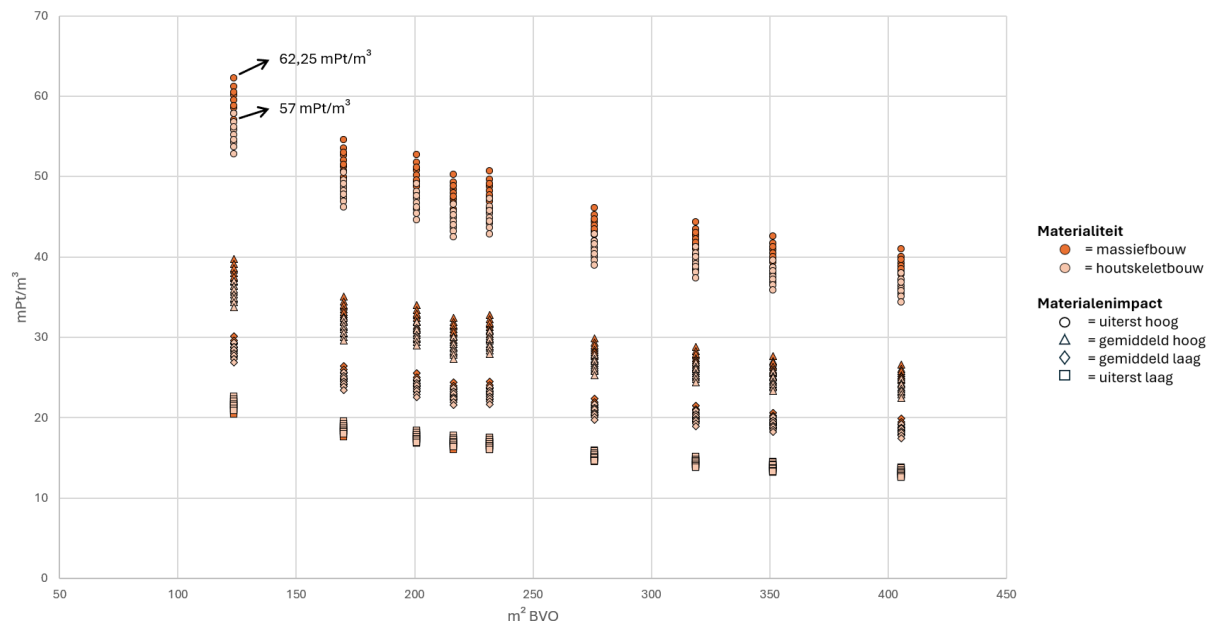
Uit vorig hoofdstuk blijkt dat de milieu-impact van een gebouw toeneemt naarmate de brutovloeroppervlakte vergroot. Figuur 33 toont echter het omgekeerde resultaat. Hoe kleiner de woning, hoe groter de milieuscore per m^2 brutovloeroppervlakte. Indien echter geopteerd wordt voor materialen met een hogere milieu-impact, dan toont de grafiek een sterkere daling van de milieuscore naarmate de grootte van de woning toeneemt. Dit wordt verduidelijkt door het vergelijken van twee woningvarianten met elk één van de uitersten in brutovloeroppervlakte. Hieruit volgt dat de varianten met een uiterst hoge materialenimpact een daling vertonen van $64 \text{ mPt/m}^2\text{BVO}$ terwijl bij een uiterst lage materiaalimpact het verschil immers slechts $25 \text{ mPt/m}^2\text{BVO}$ bedraagt.



Figuur 33: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de vrijstaande woningen naar de brutovloeroppervlakte, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning

Die conclusies zijn te wijten aan de toegepaste normalisatie. De totale milieuscore wordt namelijk verdeeld over het aantal vierkante meter vloeroppervlakte. Bij kleine residentiële gebouwen spreidt dit zich bijgevolg over een gering aantal vierkante meters, waardoor kleine woningen worden benadeeld. De voorkeur gaat daardoor uit naar het bouwen van eerder grote woningen, wat echter een ongewenst resultaat geeft. Om die reden worden andere normalisatiemogelijkheden verder onderzocht.

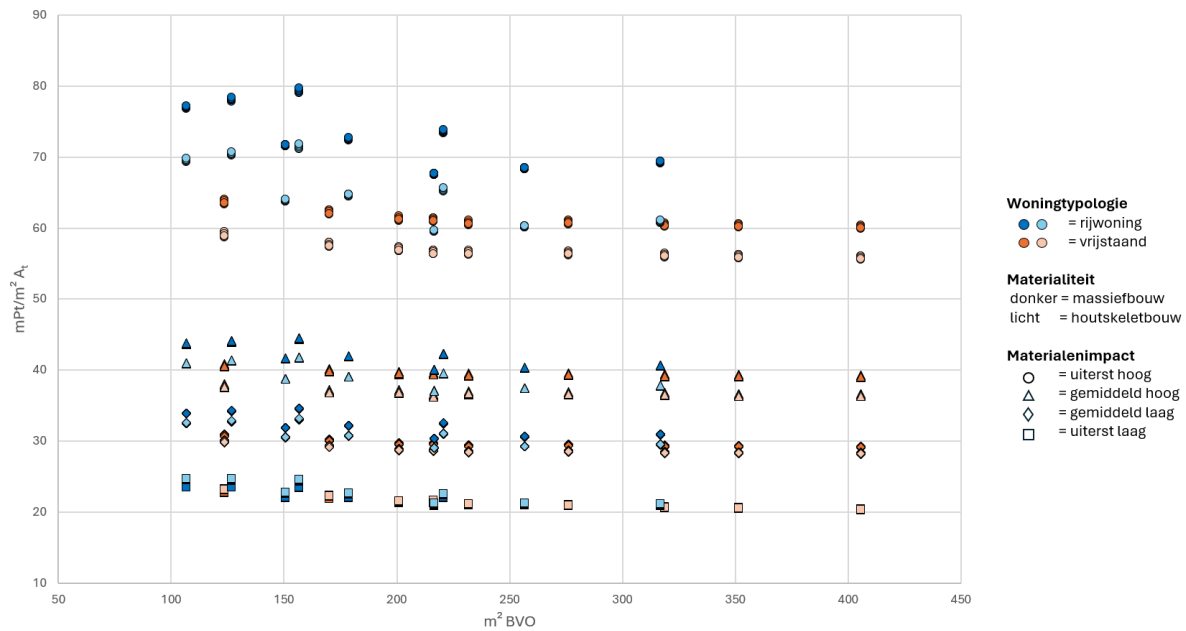
Vervolgens wordt de milieu-impact genormaliseerd naar het volume van de woning. Op analoge wijze wordt dit weergegeven in figuur 34. Hierin verhoudt de milieuscore, uitgedrukt in mPt/m^3 , zich tot de brutovloeroppervlakte van de woning. Dit levert een vrij gelijkaardige grafiek aan de figuur hierboven op. Een analoge dalende lijn is af te lezen. Dit wil zeggen dat de milieuscore daalt wanneer de brutovloeroppervlakte van de woning toeneemt. Bovendien is dit een logisch gevolg uit figuur 17, waarin het volume in verhouding tot de brutovloeroppervlakte wordt uitgedrukt. Uit deze figuur blijkt dat de twee parameters een lineair verband vertonen en dat dus analoge conclusies te verwachten zijn.



Figuur 34: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de vrijstaande woningen naar het volume, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning

De grafiek toont aan dat een aantal varianten met gelijke vloeroppervlaktes andere milieuscores hebben, wat te wijten is aan de mogelijke combinaties van breedte, lengte en verdiepingshoogte per variant. Zo ontstaan varianten met een gelijke brutovloeroppervlakte, maar met een differentiërende verdiepingshoogte, waardoor het volume van de woningen geringe verschillen vertoont. Om de invloed van het volume nader te onderzoeken, zijn in de grafiek twee woningen met een identieke brutovloeroppervlakte aangeduid. Die worden aangeduid door middel van hun milieuprestatie. Woningvariant 1 heeft een volume van $345,5 \text{ m}^3$ en resulteert in een impact van $62,25 \text{ mPt/m}^3$. Daarnaast bedraagt het volume en de milieuscore van woningvariant 2 respectievelijk $396,8 \text{ m}^3$ en 57 mPt/m^3 . Hieruit kan worden geconcludeerd dat woningen met een groot volume verkozen worden boven woningen met een beperkter volume. Een analoge redenering aan de brutovloeroppervlakte is hier van toepassing.

Aangezien de brutovloeroppervlakte en het volume geen ideale normalisatiefactoren blijken, wordt een volgende parameter onderzocht: de verliesoppervlakte. Uit de reeds verworven ervaring uit figuur 17 en door het lineair verband tussen het volume en de verliesoppervlakte (zie figuur 18), bestaat de kans dat ook de verliesoppervlakte geen optimale normalisatiefactor zal zijn. Ondanks deze hypothese, wordt het resultaat van de normalisatie naar de verliesoppervlakte weergegeven in figuur 35. In eerste instantie wordt de invloed enkel via de vrijstaande woningen in kaart gebracht, maar om een beter beeld te schetsen worden de rijwoningen aan deze analyse toegevoegd.

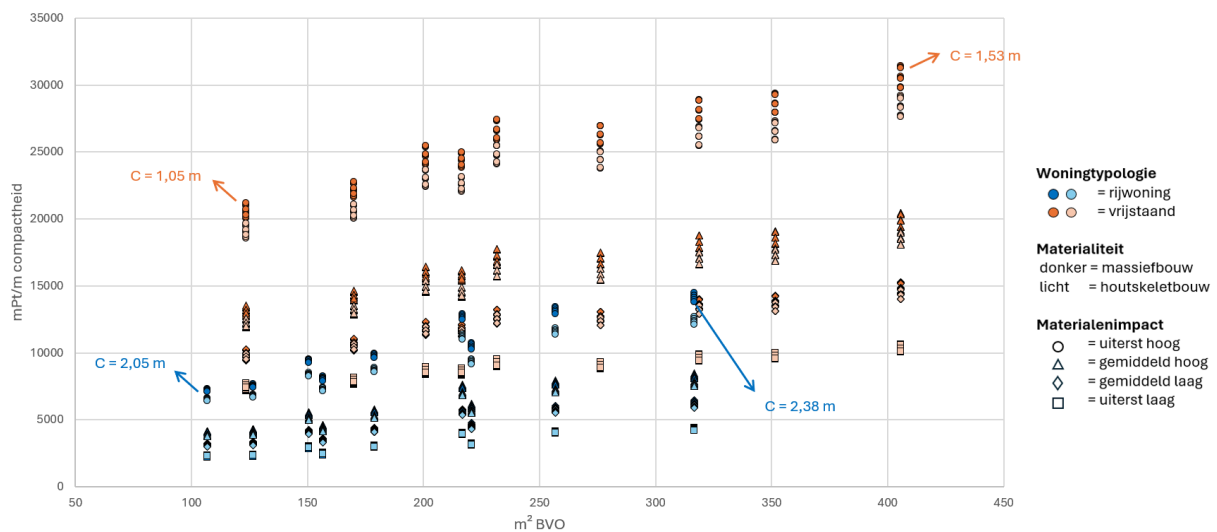


Figuur 35: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de verliesoppervlakte, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning

Uit de grafiek valt onmiddellijk af te lezen dat de milieu-impact, hier uitgedrukt in $\text{mPt}/\text{m}^2 A_t$, slechts in geringe mate daalt wanneer de woning in oppervlakte toeneemt. Dit is het meest duidelijk wanneer de focus op de vrijstaande woning wordt gelegd. De milieuscore wordt immers voornamelijk bepaald door de grote oppervlaktes aan gebouwelementen met een hoge impact. In de case van een vrijstaande woning zijn die invloedrijke elementen voornamelijk de vloer op volle grond, het hellend dak en de spouwmuren, inclusief raamopeningen. Hierdoor verhoudt de totale milieu-impact zich tot de verliesoppervlakte op een specifieke manier waardoor geen grote verschillen in de genormaliseerde resultaten opduiken. De grootte van die verschillen worden slechts enkel vastgelegd door de binnenelementen zoals bijvoorbeeld interne vloeren en binnenwanden. Bijgevolg impliceert dit geen duidelijke benadeling van kleine woningen of bevoordeling van grote woningen. In dit opzicht lijkt het normaliseren naar de verliesoppervlakte een mogelijke optie.

Indien de focus op beide woningtypologieën wordt gelegd, verliest immers de verliesoppervlakte het potentieel als de optimale normalisatiefactor. Bovendien toont grafiek 27 reeds aan dat de totale milieu-impact van een rijwoning steeds lager is dan die van de vrijstaande woning. Aangezien de gemene muren niet bijdragen aan de verliesoppervlakte van de woning, zal de verliesoppervlakte van een rijwoning steeds lager zijn dan die van een vrijstaande woning met een identieke geometrie. Dit leidt er eveneens toe dat de totale milieuscore van een rijwoning zich in mindere mate zal verhouden tot de verliesoppervlakte, wat bovendien te merken is in de grafiek. Een rijwoning met een kleinere vloeroppervlakte en lagere verliesoppervlakte resulteert in een hogere impact dan een vrijstaande woning met een grotere brutovloeroppervlakte en een hogere verliesoppervlakte.

Na de analyse van de types van oppervlakte en volume, wordt het onderzoek om een andere boeg gegooid. In deze fase wordt de compactheid in beeld gebracht als normalisatiefactor. De resultaten worden weergegeven in figuur 36. Opnieuw wordt geopteerd om naast de vrijstaande woningen een andere typologie mee te nemen in het onderzoek. De reden hiervoor is dat alle woningvarianten per typologie vertrekken van eenzelfde plan die slechts in beperkte mate varieert. De geometrie zal steeds zijn rechthoekig karakter behouden waardoor geen mogelijkheden ontstaan waarbij uitbouwen aan het plan worden toegevoegd. Hierdoor vertoont de compactheid van een specifieke woontypologie geen grote verschillen per variant. Door het toevoegen van de rijwoningen, vertrekkend vanuit een ander plan, en dus een andere verhouding van volume en verliesoppervlakte, ontstaat een groter verschil in de compactheid.



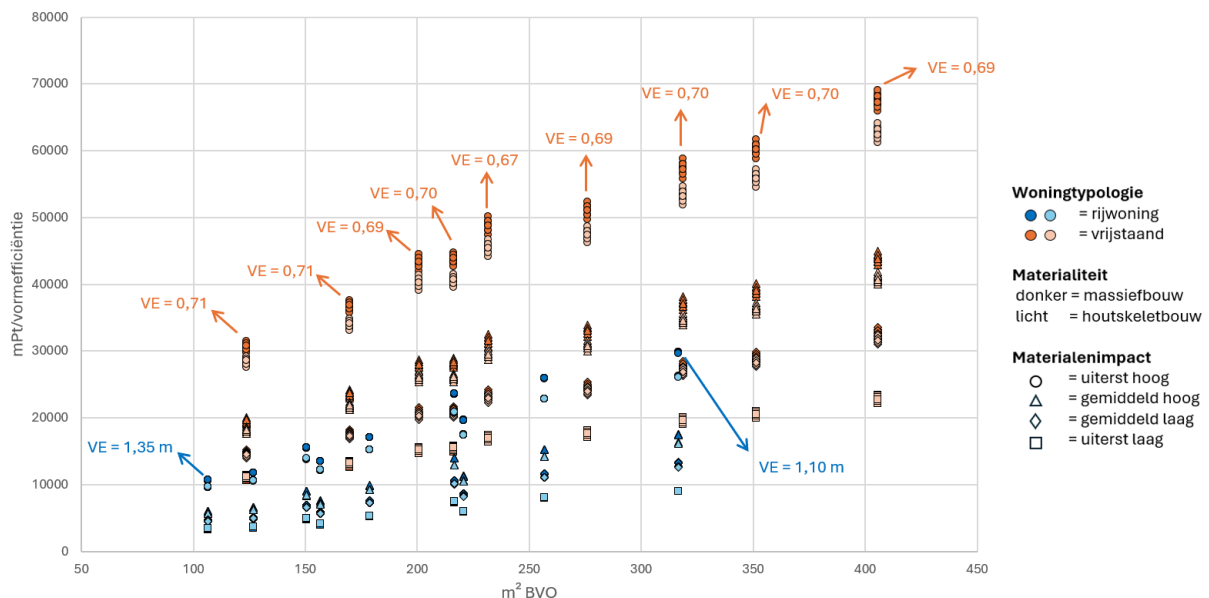
Figuur 36: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de compactheid, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning

Op het eerste zicht lijkt een logischere trendlijn tussen de resultaten te bestaan. Naarmate de brutovloeroppervlakte toeneemt, neemt eveneens de milieuscore toe. Bovendien is de milieuscore van de rijwoning steeds lager in vergelijking met de vrijstaande woning, wat te wijten is aan de grote compactheid van de rijwoning. Dit wordt in de grafiek verduidelijkt door de aanduiding van de compactheid voor twee varianten per typologie.

Toch gaat met de compactheid een groot nadeel gepaard. Het Vlaams Energie- & Klimaatagentschap (z.d.-a) toont aan dat twee gebouwen met eenzelfde vorm maar met een ander volume niet noodzakelijk dezelfde compactheid hebben. Om de uitspraak te verduidelijken maken ze de vergelijking tussen een grote en een kleine kubus. De grote kubus heeft een ribbe van 10m, waardoor het volume en de verliesoppervlakte respectievelijk gelijk zijn aan 1000 m^3 en 600 m^2 , waaruit bijgevolg een compactheid van 1,67 m volgt. De kleine kubus daarentegen heeft een ribbe van 1m, wat gepaard gaat met een volume van 1 m^3 en een verliesoppervlakte van 6 m^2 . De compactheid van de kleine kubus resulteert dus in een waarde die 10 keer kleiner is namelijk 0,167 m. Dit voorbeeld impliceert het bevoordelen van grote woningen, wat zoals bij de vorige parameters een ongunstig resultaat oplevert.

Uit de vier aangeduide cases volgt dat voor beide typologieën de grote woningen resulteren in een hogere compactheid zoals het voorbeeld aangaf. Omwille van de kleine waardes van de compactheid, weegt de normalisatie niet zo zwaar door, waardoor die dalende trend zoals in vorige gevallen, niet wordt verkregen. Dat wil niet zeggen dat de bevoordeling van grote woningen zich niet voordoet.

Om uiteindelijk tot een geschikte normalisatiefactor te komen, moet een parameter soortgelijk aan de compactheid worden gevonden, die zich immers niet weet te laten beïnvloeden door de grootte van de woning. Vanuit dit oogpunt lijkt de vormefficiëntie de geschikte geometrische karakteristiek. Het onderzoek van de vormefficiëntie levert de resultaten in figuur 37 op. Die grafiek neemt de logische vorm aan waarbij voor beide typologieën de milieu-impact stijgt met een toenemende brutovloeroppervlakte. Bovendien volgen de varianten een vrij analoge trend zoals in de grafiek van de totale milieuscore (zie figuur 27). Dit is het best op te merken bij de vrijstaande woningen waarbij de vormefficiëntie, afgekort als VE, voor elke variant een vrij constante waarde, met slechts een geringe daling, aanneemt. In de grafiek vertoont de vormefficiëntie van de rijwoningen echter een grotere spreiding, waarbij kleinere woningen een hogere waarde aannemen. Daarentegen is de spreiding tussen de milieuscores van de varianten met een eenzelfde brutovloeroppervlakte gering. Verder is de vormefficiëntie van de rijwoning steeds hoger dan die van de vrijstaande woning, omwille van de kleinere verliesoppervlakte van de rijwoning. Dit geeft een correct beeld weer waarbij vormefficiënte typologieën worden gestimuleerd. Al mogen de grote verschillen per typologie het opleggen van een uniforme grenswaarde niet bemoeilijken. Naar die uniforme benchmarkwaarde wordt later in dit hoofdstuk gezocht.



Figuur 37: Normalisatie van de milieuscore (in mPt) van de rijwoningen en vrijstaande woningen naar de vormefficiëntie, in verhouding tot de brutovloeroppervlakte van de woning

8.1.2. Besluit

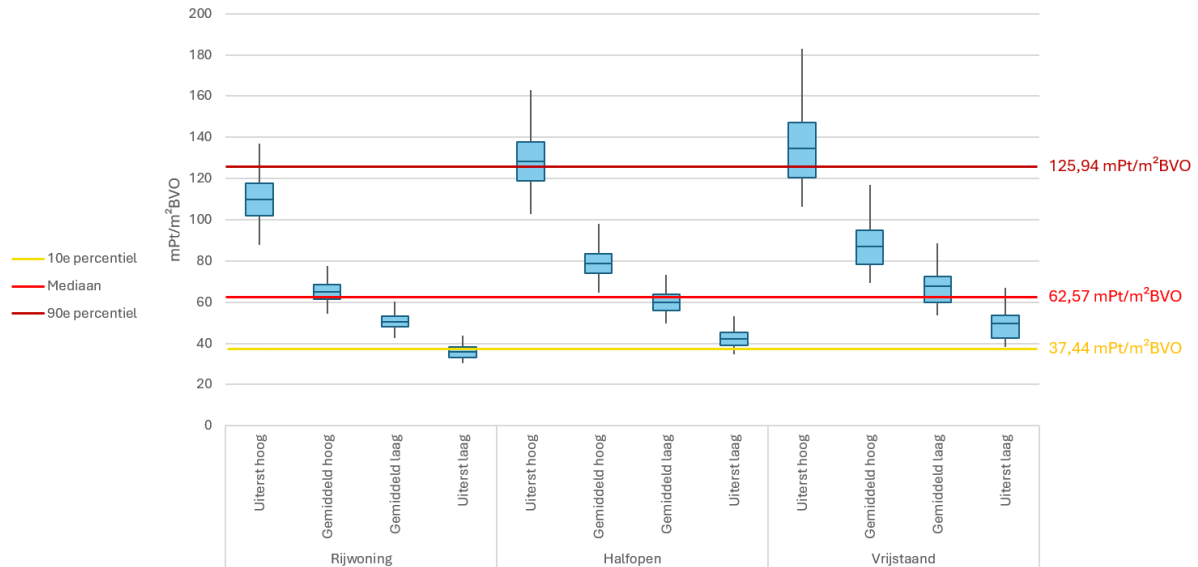
Hoewel de literatuur aanstuurt om een benchmark op te stellen genormaliseerd aan de brutovloeroppervlakte, blijkt dit echter niet de geschikte keuze te zijn. Het grootste probleem is de benadeling van kleine woningen, wat niet aansluit bij de duurzaamheidsproblematiek. Diezelfde conclusies rijzen op indien het volume, de verliesoppervlakte of de compactheid als normalisatiefactor wordt ingezet. Hoewel de compactheid reeds een beter resultaat vertoont, wordt het resultaat verder geoptimaliseerd door het in beeld brengen van de vormefficiëntie. Bijgevolg volgt uit de analyse van de vijf geometrische karakteristieken dat de vormefficiëntie het meest representatieve beeld schetst, maar vergt immers verder onderzoek naar het opstellen van een uniforme grenswaarde.

8.2. Normalisatie naar de brutovloeroppervlakte

Het opstellen van een genormaliseerde benchmark is de volgende stap in het onderzoek. Er wordt gestart met de genormaliseerde referentiewaarde op te stellen op basis van alle woningtypologieën. Vervolgens wordt onderzocht wat dit betekent voor zowel de één- als de meergezinswoningen. Daarna wordt de referentiewaarde tweemaal opnieuw bepaald. Eenmaal waarbij het enkel afhankelijk is van de ééngezinswoningen en eenmaal afhankelijk van de meergezinswoningen. Ondanks dat de normalisatie naar de brutovloeroppervlakte niet ideaal is, wordt toch een grenswaarde gezocht. Deze waarde kan vervolgens vergeleken worden met de gevonden referentiewaarden uit de literatuur die worden weergegeven in tabel 3. Analoog aan het vorige hoofdstuk worden de grafieken telkens uitgedrukt aan de hand van de geaggregeerde score. De relevante grafieken, uitgedrukt in kgCO_2 , zijn telkens terug te vinden in bijlage F.

8.2.1. Ééngezinswoningen

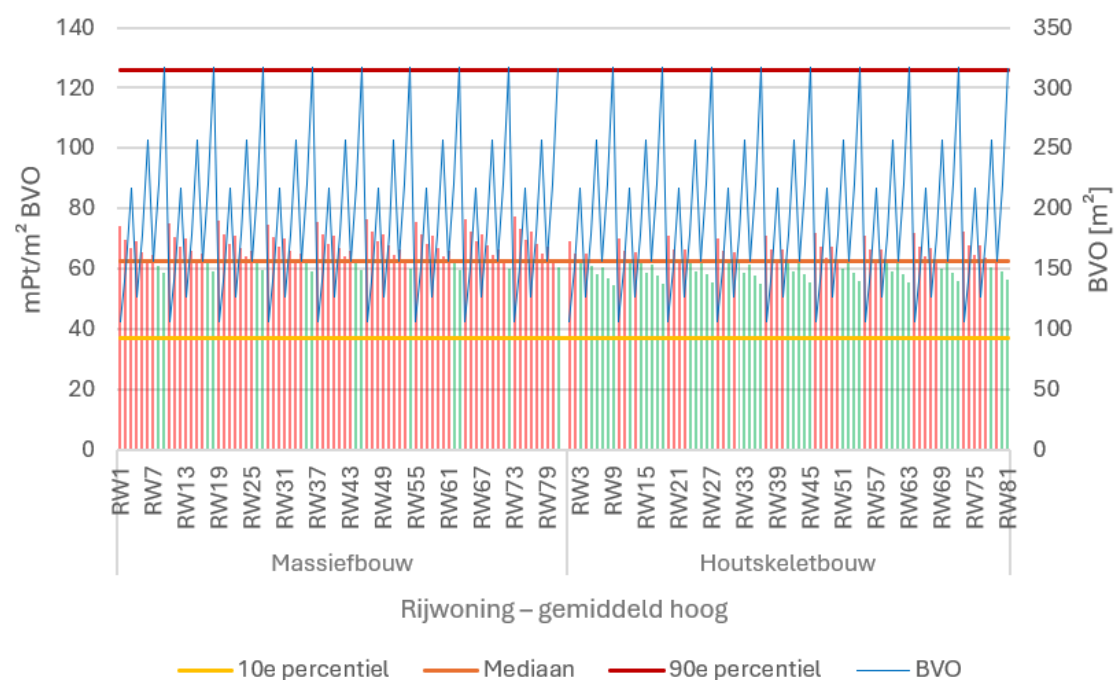
In figuur 38 wordt de milieu-impact per woontypologie op een vereenvoudigde manier weergegeven. Vervolgens wordt er per typologie een bijkomend onderscheid tussen de verschillende materiaalimpacts gemaakt. Door het eenvoudig weergegeven van alle data en dit te linken aan de benchmarkwaarde, die op basis van alle woonvarianten (d.w.z. ééngezinswoningen en meergezinswoningen) wordt bepaald, wordt snel duidelijk welke varianten wel of niet aan de referentiewaarde voldoen. De mediane waarde wordt vastgezet op 62,57 $\text{mPt/m}^2\text{BVO}$.



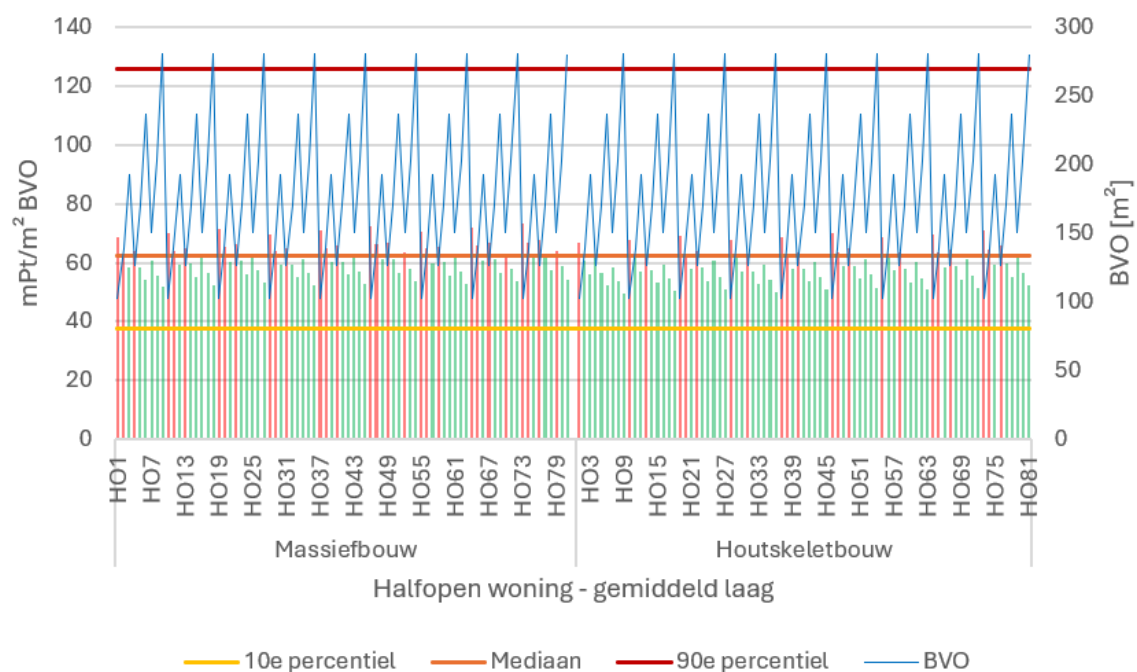
Figuur 38: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/m²BVO en weergegeven per ééngezinswoningtypologie en per materialenimpact

Indien de gebouwelementen, bij eender welke variant, behoren tot de uiterst hoge impactcategorie, dan voldoet de woning niet aan de opgelegde referentiewaarde. In het geval van de halfopen en vrijstaande woning zijn zelfs varianten met een gemiddeld hoge impact niet aanvaardbaar. Bij de rijwoningtypologieën wordt er echter een beperkt aantal toegelaten. Figuur 39 verdiept zich in dat specifieke scenario. De grafiek geeft de toelaatbare woningvarianten in het groen weer, terwijl de niet-acceptabele woningen met een rode staaf worden aangeduid. Die varianten worden afgekort met RW (afkomstig van rijwoning) gevolgd door het nummer van de variant. Hieruit volgt dat de kleine woningen, in massiefbouw of houtskeletbouw, en gemiddeld grote woningen, in massiefbouw, niet voldoen. Slechts 34% van de varianten in dit scenario hebben een lagere milieuscore dan de mediaan. Verder worden de overige rijwoningvarianten, met een gemiddelde en uiterst lage materialenimpact steeds geaccepteerd.

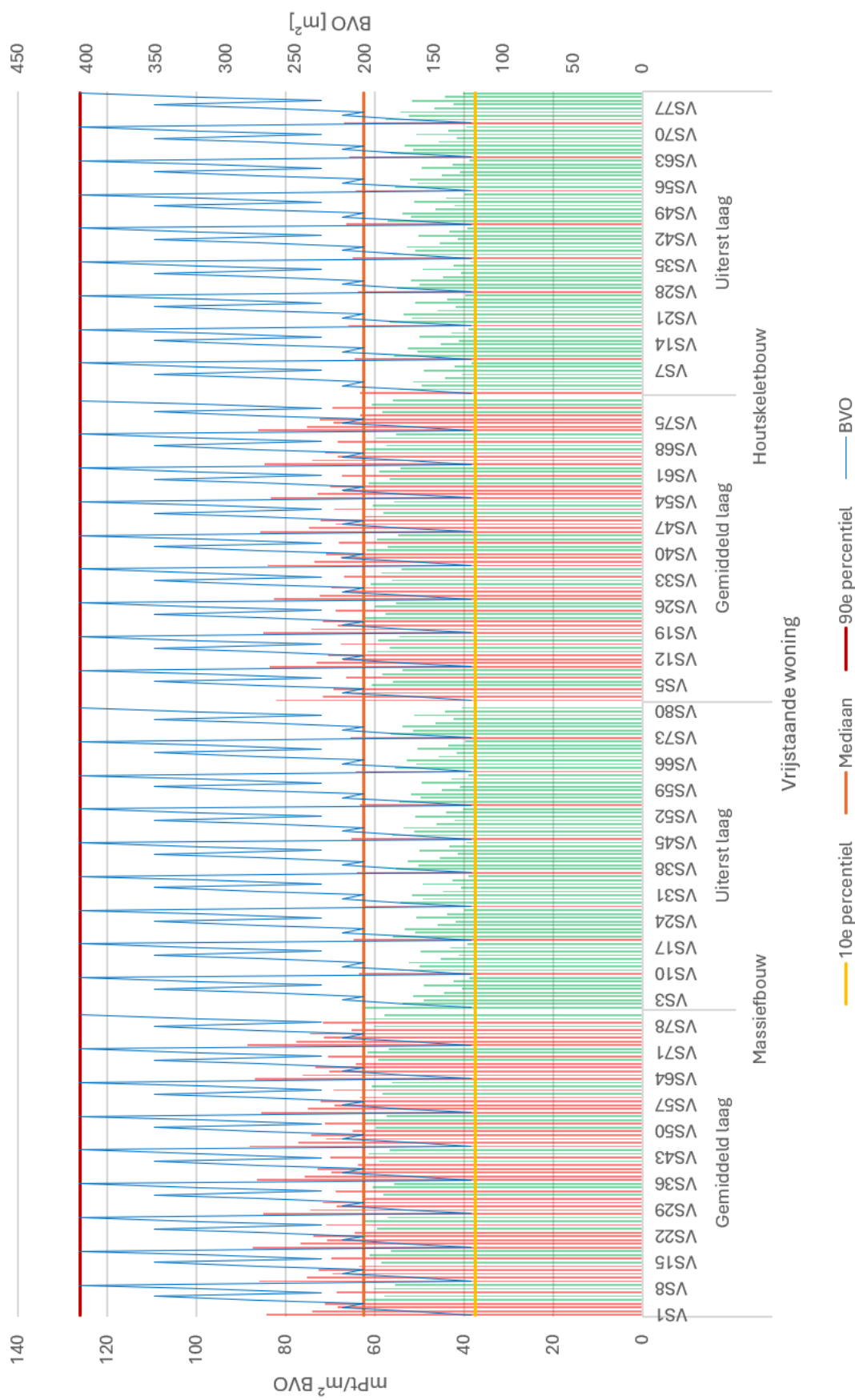
Analoog aan de rijwoningen worden eveneens voor de halfopen en vrijstaande woningen de scenario's meer in diepte onderzocht indien de mediane waarde de overeenkomstige boxplot doorsnijdt. Hiervoor wordt verwezen naar de analoge figuren 40 en 41, waarbij HO staat voor de halfopen woningvarianten en VS voor de varianten van de vrijstaande woningen. Uit de grafieken kunnen gelijkaardige conclusies op basis van de grootte van de woning worden genomen. Zo voldoet uiteindelijk 67% van de halfopen woningvarianten. Bij de vrijstaande woning daarentegen, wordt slechts 37% van de varianten met een gemiddeld lage materialenimpact toegelaten. In het andere geval, zijn het immers enkel de kleinste woningen die niet voldoen aan de benchmarkwaarde. Dit resulteert uiteindelijk in een tiende van de varianten die boven de opgelegde benchmarkwaarde zijn gelegen.



Figuur 39: De milieuscore ($mPt/m^2 BVO$) van de rijwoningen met een gemiddeld hoge materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene de welke voldoen. De bijhorende brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.



Figuur 40: De milieuscore ($mPt/m^2 BVO$) van de halfopen woningen met een gemiddeld lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene de welke voldoen. De bijhorende brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.



Figuur 41: De milieuscore ($mPt/m^2 BVO$) van de vrijstaande woningen met een gemiddeld en uiterst lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. De bijhorende brutovoeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.

Indien de geaggregeerde score wordt ingewisseld voor de klimaatveranderingsindicator, weergegeven in figuur 73, worden andere resultaten bekomen. Er zijn buiten de varianten met een uiterst hoge materiaalimpact en de rijwoning met een uiterst lage materiaalimpact, geen andere scenario's waarover diezelfde en duidelijke conclusies kunnen worden getrokken. De mediaan snijdt bijgevolg doorheen alle overige scenario's. Soms wordt de boxplot tussen het eerste en het derde kwartiel doorsneden, terwijl in andere scenario's het eerder uitzonderingen zijn die wel of niet aan de grenswaarde voldoen. Welke die uitzonderingen zijn, wordt niet opnieuw weergegeven door analoge grafieken als in de figuren 39 tot 41. Dit zou immers leiden tot identieke conclusies waarbij de grootte van de woning bepaalt indien de woning al dan niet wordt aanvaard. De percentages van de aanvaardbare varianten wordt per scenario, voor de geaggregeerde score en klimaatveranderingsindicator, vermeld in onderstaande tabel.

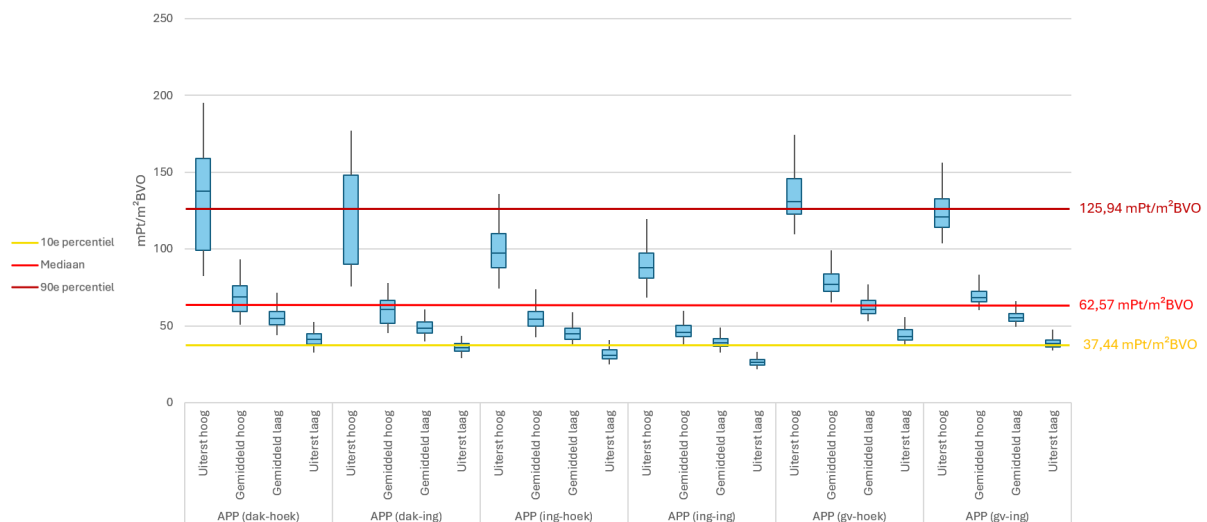
Typologie	Materialenimpact	Aanvaardbare woningen in mPt	Aanvaardbare woningen in kgCO ₂
Rijwoning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	34%	71%
	Gemiddeld laag	100%	93%
	Uiterst laag	100%	100%
Halfopen woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	20%
	Gemiddeld laag	67%	47%
	Uiterst laag	100%	98%
Vrijstaande woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	2%
	Gemiddeld laag	37%	16%
	Uiterst laag	90%	51%

Tabel 10: Aandeel varianten ééngezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 62,57 mPt/m²BVO en 721,47 kgCO₂/m²BVO

In totaal leidt dit tot 379 rijwoningvarianten of 58% van de rijwoningen die volgens de benchmark, bepaald op de geaggregeerde score, toelaatbaar zijn. Het merendeel van die varianten is opgebouwd uit houtskeletbouw. Zo heeft immers 47% van de toelaatbare woningen een opbouw uit massiefbouw. Daarentegen worden de halfopen woningen slechts voor 42% aanvaard, waarvan 48% uit massiefbouw is opgebouwd. Daarnaast voldoet slechts 32% van de vrijstaande woningen, die voor 49% van de varianten uit massiefbouw bestaan. In tegenstelling tot de geaggregeerde score, levert de klimaatveranderingsindicator een volledig nieuw resultaat op, wat ook uit tabel 10 opte merken is. Het aantal aanvaardbare rijwoningen stijgt aanzienlijk en resulteert uiteindelijk in 66%, maar het aandeel massiefbouw daalt naar 45%. Vervolgens ondergaan de halfopen woningen een geringe reductie van 1%, waarvan slechts 40% uit massiefbouw is opgebouwd. Bovendien wordt het aantal toelaatbare vrijstaande woningen aanzienlijk beperkt tot slechts 17%. Hierbij is nog slechts 35% aan massiefbouwvarianten te onderscheiden. Hieruit wordt bijgevolg geconcludeerd dat de klimaatveranderingsindicator compacte woningen nog meer bevoordeelt.

8.2.2. Meergezinswoningen

In de volgende stap wordt een analoge analyse voor de meergezinswoningen uitgevoerd, met figuur 42 als resultaat. Hieruit volgt dat de gebouwvarianten met uiterst hoge materiaalimpacts steeds boven de grenswaarde gelegen zijn. Het andere uiterste scenario bevindt zich immers in elke situatie onder die opgelegde waarde. Enkel de gemiddeld hoge en lage materiaalvarianten vertonen geen eenduidig inzicht. Voor de ene typologie snijdt de mediaan door beide boxplots, terwijl in andere gevallen de mediaan slechts door één van de twee of zelfs door geen van beide snijdt. Om een beter inzicht te krijgen in het aandeel van aanvaardbare woningen per scenario, wordt een analoge tabel aan hierboven opgesteld die dat inzicht verschaft (zie tabel 11). Bovendien blijkt ook hier het verdiepingsappartement, in tegenstelling tot het dak- en het gelijkvloerse appartement, het meest aantrekkelijk.



Figuur 42: Benchmarktypes (10° percentiel, mediaan en 90° percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/m²BVO en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact

Hoewel figuur 74, met oog op de klimaatverandering, diverse resultaten biedt, blijft het verdiepingsappartement ook hier het meest interessant. Vanuit dit oogpunt voldoen meer varianten aan de opgelegde benchmarkwaarde. Zelfs verdiepingsappartementen en enkele ingesloten dakappartementen, volledig opgebouwd uit materialen met een uiterst hoge milieuscore, dragen de mogelijkheid in zich om onder de grenswaarde te blijven. Bovendien is de spreiding tussen de individuele resultaten per scenario veel groter in vergelijking met de resultaten van de geaggregeerde score. Hierdoor ontstaat een grotere kans dat de mediaan de boxplot snijdt, wat in de meeste scenario's eveneens zo is. De percentages van de aanvaardbare woningvarianten gelinkt aan de scenario's, worden toegevoegd aan tabel 11. Het verschil met de geaggregeerde score wordt hierdoor meteen duidelijk. Een verband tussen de twee eenheden betreft een zekere complexiteit en is op het eerste zicht niet vast te stellen.

Typologie	Materialenimpact	Aanvaardbare woningen in mPt	Aanvaardbare woningen in kgCO ₂
Appartement (dak-hoek)	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	39%	30%
	Gemiddeld laag	93%	57%
	Uiterst laag	100%	96%
Appartement (dak-ing)	Uiterst hoog	0%	15%
	Gemiddeld hoog	70%	50%
	Gemiddeld laag	100%	91%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-hoek)	Uiterst hoog	0%	45%
	Gemiddeld hoog	91%	93%
	Gemiddeld laag	100%	98%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-ing)	Uiterst hoog	0%	93%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (gv-hoek)	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	6%
	Gemiddeld laag	72%	22%
	Uiterst laag	100%	96%
Appartement (gv-ing)	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	30%	48%
	Gemiddeld laag	98%	69%
	Uiterst laag	100%	100%

Tabel 11: Aandeel varianten meergezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 62,57 mPt/m²BVO en 721,47 kgCO₂/m²BVO

Uit het vorige hoofdstuk wordt reeds duidelijk dat, in tegenstelling tot de ééngezinswoningen, een groter aantal aan meergezinswoningen de benchmark niet overschrijden. Dit resulteert voor de geaggregeerde score in volgende percentages: 54% van de dak-hoekappartementen, 64% van de dak-ingesloten appartementen, 71% van de verdiepings-hoekappartementen, 75% van de verdiepings-ingesloten appartementen, 39% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 50% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen. Hierbij verschilt het aandeel in massiefbouwvarianten tussen de 39% en 50%. Analoog worden op basis van de klimaatveranderingsindicator repectievelijk volgende percentages bekomen: 46%, 64%, 83%, 98%, 31% en 54%. Daarnaast neemt het minimale aandeel van massiefbouwvarianten af tot 31%. Het maximale percentage blijft echter op 50% liggen.

8.2.3. Vergelijking met Europese landen

Na het bepalen van de mediane waarden op basis van alle gebouwtypologieën, worden vervolgens de referentiewaarden op basis van de ééngezinswoningen enerzijds en de meergezinswoningen anderzijds berekend. De gevonden waarden worden hieronder vermeld in tabel 12. Bovendien worden in tabel 3, uit het hoofdstuk van de literatuurstudie, de benchmarkwaardes van diverse Europese landen uitgeschreven. Om vervolgens de vergelijking te maken tussen de twee tabellen, moet er naar de verschillende factoren die de benchmark beïnvloeden en de gekozen eenheid worden gekeken. Omwille van de grote verschillen in de wijze waarop de waarde wordt bepaald en welke aspecten van LCA worden meegenomen, is het uitbrengen van juiste uitspraken zeer complex. Toch wordt in deze paragraaf een poging gewaagd.

Benchmarktype	Op basis van alle woningen		Op basis van ééngezinswoningen		Op basis van meergezinswoningen	
	[mPt/ m ² BVO]	[kgCO ₂ / m ² BVO]	[mPt/ m ² BVO]	[kgCO ₂ / m ² BVO]	[mPt/ m ² BVO]	[kgCO ₂ / m ² BVO]
10e percentiel	37,44	467,08	39,52	534,63	34,75	391,23
Mediaan	62,57	721,47	66,71	768,53	55,25	647,83
90e percentiel	125,94	1097,36	128	1171,36	121,3	978,85

Tabel 12: De gevonden benchmarktypes op basis van verschillende typologieën, uitgedrukt in mPt/m² en kgCO₂/m²

Aangezien in de studies van Mouton et al. (2022, 2023, 2024) de grenswaarde op een identieke wijze wordt bepaald, met uitzondering van de operationele impact, zijn dit de meest eenvoudige studies om een correcte vergelijking mee te maken. In tegenstelling tot die onderzoeken, worden in deze masterproef geen technische installaties beschouwd die de operationele impact bepalen. Er wordt echter enkel naar de materialiteit van de gebouwelementen gekeken waarbij de operationele impact slechts afhankelijk is van de transmissieverliezen van die opbouwen. In dit opzicht is de beste manier van vergelijken het naast elkaar leggen van de ingebedde emissies van de Belgische studies, en in hoeverre het mogelijk is eveneens met de ingebedde emissies van de overige studies.

De Belgische studie daterend uit 2023 analyseert enkel de drie gebouwtypologieën van de ééngezinswoningen en drukt hierbij het resultaat uit in mPt/m²BVO. Op die manier vinden de onderzoekers een grenswaarde, op basis van slechts vijf cases, gelijk aan 49 mPt/m²BVO (Mouton et al., 2023). Dit resulteert in een aanzienlijk verschil met de gevonden benchmark 66,71 mPt/m²BVO in deze masterproef. Dit grote verschil is te wijten aan het aantal onderzochte woningen. Indien de studie van deze masterproef immers slechts 5 cases, met een lage milieu-impact, zou analyseren, zou dit mogelijks het omgekeerde resultaat opleveren. Hierbij zou de bekomen waarde beduidend lager liggen. Daarnaast voegen de overige twee studies meergezinswoningen toe aan de analyse, waarbij het resultaat zowel in mPt/m²BVO als in kgCO₂/m²BVO wordt uitgedrukt (Mouton et al., 2022, 2024). Uit de vergelijking wordt snel duidelijk dat de resultaten uit deze masterproef nauwer aansluiten bij de studie van Mouton et al. (2024), waarbij de analyse echter op meer cases wordt uitgevoerd. Bijgevolg kan hieruit geconcludeerd worden: hoe meer cases worden onderzocht, hoe representatiever de resultaten. Om die uitspraak sterk te maken, moet echter verder vergelijkend onderzoek worden gevoerd.

In tegenstelling tot de Vlaamse onderzoeken, analyseert Izaola et al. (2023) enkel een appartementsgebouw. Hierbij wordt een onderscheid tussen een appartementsblok daterend uit 2013 en een appartementsgebouw dat voldoet aan de BEN-eisen, gemaakt. In vergelijking met deze masterproef, sluiten de referentiewaardes voor de ingebedde emissie, enkel kijkend naar het appartement van 2013, nauw bij elkaar aan. De BEN-wooneenheden van Spanje zetten in op zowel een reductie van de operationele als de ingebedde impact. Hierdoor neemt het verschil met de waarde uit tabel 3 immers toe. Daarentegen is Frankrijk op zoek naar een limietwaarde voor zowel de ingebedde impact als de operationele impact en de totale milieuscore, uiterst tegen 2030. Die limietwaarde wordt enkel opgesteld voor residentiële gebouwen, andere typologieën vallen bijgevolg buiten de kwestie (Décret n° 2021-1004, 2021, als in Izaola et al., 2023). Aangezien een limietwaarde strengere eisen oplegt dan een mediane waarde, ligt die limietwaarde logischerwijs lager. De limiet- en referentiewaarde vertonen zelfs een aanzienlijk contrast.

De overige studies nemen buiten residentiële woningen bijkomend utiliteitsfuncties mee in de analyse (Zimmermann et al., 2021; Braune et al., 2021; Wiik et al., 2020; W/E adviseurs, 2017 en Zimmermann et al., 2023). Er wordt reeds aangetoond dat de typologie een zekere invloed heeft op het bepalen van de benchmarkwaarde. Hierdoor wordt het maken van een correcte vergelijking onmogelijk. W/E adviseurs (2017) definiëren de milieuscore echter op basis van een andere eenheid, waardoor de mogelijkheid tot vergelijken volledig wordt afgenomen.

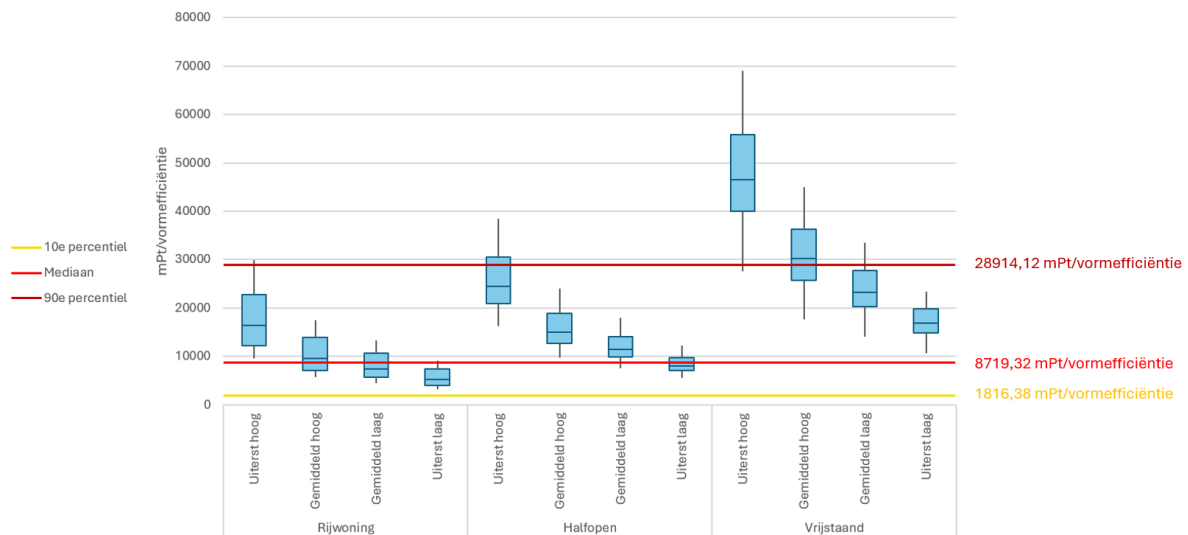
8.3. Normalisatie naar de vormefficiëntie

Hoewel in de literatuur de nadruk ligt op benchmarking naar (bruto)vloeroppervlakte, lijkt een normalisatie naar de vormefficiëntie voor consistentere resultaten te zorgen. Vanuit dit oogpunt worden de benchmarkwaardes op analoge wijze aan vorige paragraaf bepaald. De waarde van de brutovloeroppervlakte is, in vergelijking met de vormefficiëntie van een woning, steeds aanzienlijk hoger. Omwille van de verhouding van de equivalent boloppervlakte en de verliesoppervlakte, neemt de vormefficiëntie in dit onderzoek maximaal een waarde van 4,97 aan, terwijl de brutovloeroppervlakte een maximale waarde van 405,5 m² aanneemt. Dit impliceert hogere milieuscores voor de normalisatie naar de vormefficiëntie.

Dit deelonderzoek wordt op een gelijkaardige manier gestructureerd, startend vanaf de ééngezinswoningen, wordt overgegaan naar de meergezinswoningen om uiteindelijk te eindigen met een algemeen besluit. Opnieuw worden de grafieken uitgedrukt in millipunten, maar de klimaatveranderingsindicator wordt eveneens grafisch weergegeven en aan bijlage G toegevoegd.

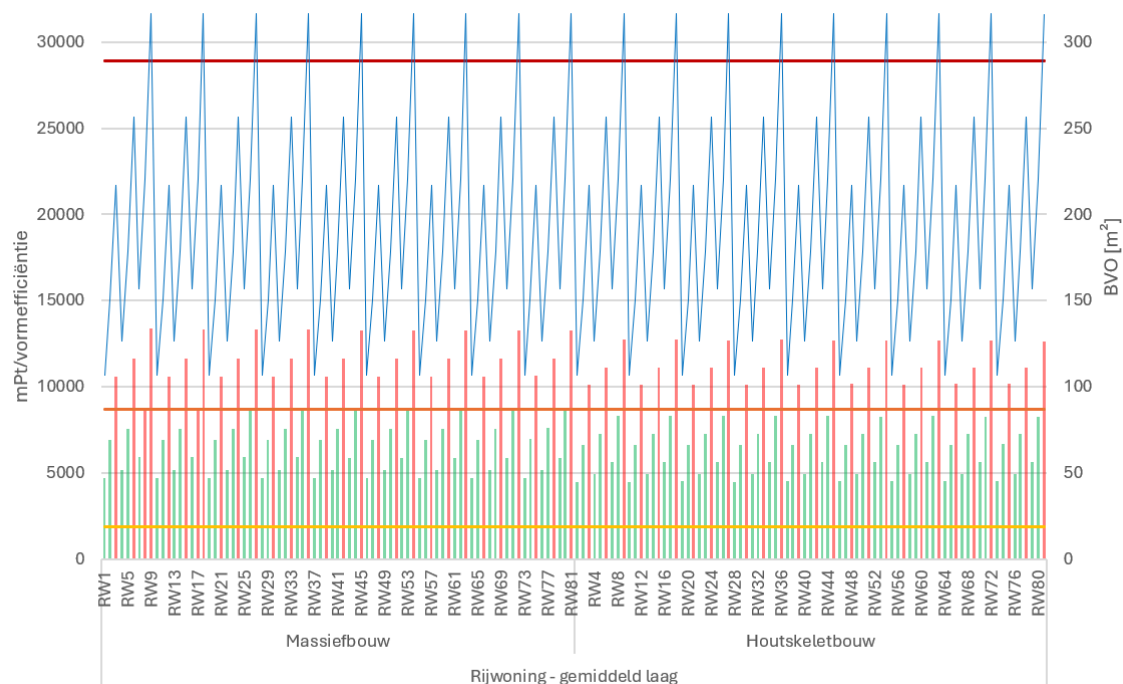
8.3.1. Eéngesinswoningen

De grafiek in figuur 43 vermeldt de resultaten van de benchmarktypes afhankelijk van alle gebouwtypologieën. Vergeleken met figuur 38, zijn de horizontale lijnen lager gelegen ten opzichte van de boxplots. Dit resulteert dus in een kleiner aantal cases die mogelijks voldoen aan de mediane waarde van 8719,32 mPt/vormefficiëntie. Zo wordt de vrijstaande woning als typologie, onafhankelijk van de materialiteit en geometrie, onmogelijk te realiseren.



Figuur 43: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en weergegeven per eéngesinswoningstypologie en per materialenimpact

Indien op de materiaalimpact wordt gefocust, dan bevinden de varianten met een uiterst hoge impact zich altijd boven de benchmark. Eveneens voor halfopen woningen met een gemiddeld hoge impact is dit geval. De overige scenario's zijn onderverdeeld in varianten die wel of niet voldoen. Welke aspecten die de aanvaarding van het scenario bepalen, wordt verder onderzocht door één specifiek scenario dieper te onderzoeken. Hiervoor wordt de rijwoning met een gemiddeld lage materialenimpact gekozen. Figuur 44 geeft het gevonden resultaat weer. In de grafiek komt een afwisseling tussen de aanvaardbare en niet-aanvaardbare woningen naar voor. Die afwisseling wordt gekenmerkt door de grootte van de woning. De brutovloeroppervlakte varieert steeds van laag naar hoog, waarbij grote woningen de benchmarkwaarde overschrijden. Het verschil in bouwmethode is immers gering, waardoor de keuze van houtskeletbouw of massiefbouw in dit scenario geen doorslaggevende factor is. Bovendien worden analoge grafieken gevonden indien de andere scenario's op een gelijkaardige wijze grafisch worden weergegeven.



Figuur 44: De milieuscore (mPt/vormefficiëntie) van de rijwoningen met een gemiddeld lage materialenimpact. De rode staven geven weer welke varianten niet voldoen aan de referentiewaarde en de groene dewelke voldoen. Het bijhorend brutovloeroppervlakte wordt weergegeven in het blauw.

In de volgende stap wordt de benchmark gedefinieerd aan de hand van de klimaatveranderingsindicator die terug te vinden is in figuur 75. Hieruit volgt een benchmarkwaarde van 95526,94 kgCO₂/vormefficiëntie. Dit wordt teruggekoppeld aan de geaggregeerde milieuscore. Om een goede vergelijking mogelijk te maken en aan te tonen hoeveel procent van de varianten in beide gevallen worden aanvaard, wordt verwezen naar tabel 13. Hoewel bij de geaggregeerde score de vrijstaande woningen met een uiterst lage materialenimpact en in combinatie met een kleine vloeroppervlakte woden uitgesloten, zijn de vrijstaande woningen echter in geen enkel opzicht nog mogelijk. De vier scenario's zijn immers verder verwijderd van de horizontale rode lijn. Bovendien worden nog slechts enkele uitzonderlijke varianten van de halfopen woningen geaccepteerd. Die uitzondering bestaan uit zeer kleine woningen gecombineerd met een gemiddeld lage, maar bij voorkeur met een uiterst lage materialenimpact. Rijwoningen daarentegen, worden vaker aanvaard. Enkel de rijwoningen met een zeer grote oppervlakte zijn in alle scenario's uit te sluiten.

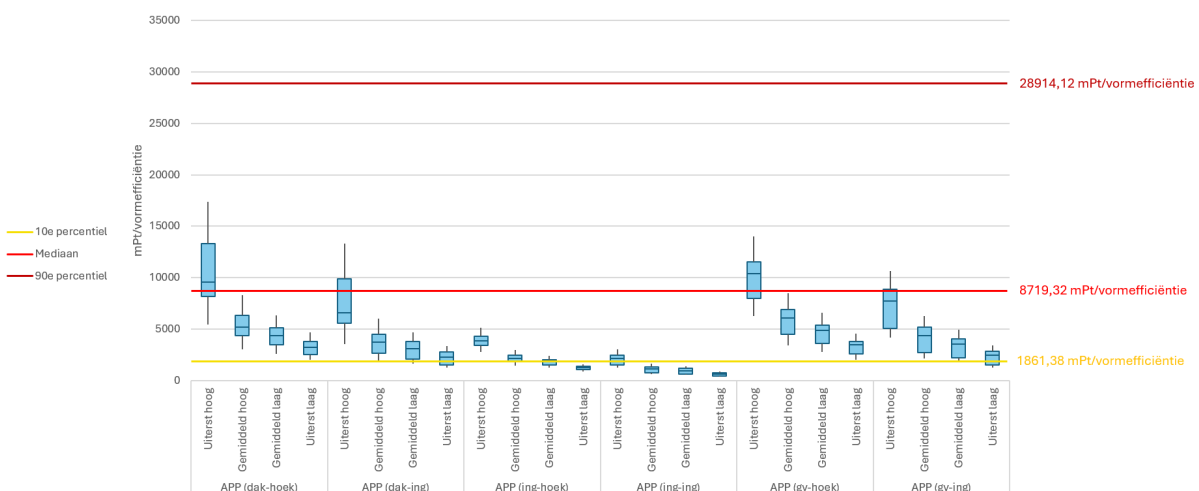
Uiteindelijk leidt dit tot het toelaten van 48% van de rijwoningvarianten en 17% van de halfopen woningvarianten ten opzichte van de geaggregeerde benchmark. Hoewel uit tabel 13 voor de rijwoningvarianten niet onmiddellijk opvalt dat een benchmark op basis van de klimaatverandering strenger is, daalt het aantal acceptabele rijwoningen nauwelijks tot 47%. Voor de halfopen woningen is het verschil echter duidelijker, waardoor nog slechts 8% van de varianten aan de referentiewaarde voldoen.

Typologie	Materialenimpact	Aanvaardbare woningen in mPt	Aanvaardbare woningen in kgCO ₂
Rijwoning	Uiterst hoog	0%	22%
	Gemiddeld hoog	38%	44%
	Gemiddeld laag	66%	56%
	Uiterst laag	89%	67%
Halfopen woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	0%
	Gemiddeld laag	12%	6%
	Uiterst laag	56%	25%
Vrijstaande woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	0%
	Gemiddeld laag	0%	0%
	Uiterst laag	0%	0%

Tabel 13: Aandeel varianten ééngezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 8719,32 mPt/vormefficiëntie en 95526,94 kgCO₂/vormefficiëntie

8.3.2. Meergezinswoningen

Na het bespreken van de ééngezinswoningen worden opnieuw de meergezinswoningen in beeld gebracht. Dezelfde benchmarks aan de vorige paragraaf blijven geldig. Zoals op te merken uit figuur 45 is het verschil met de ééngezinswoningen aanzienlijk. Globaal gezien kan worden opgemerkt dat appartementsgebouwen ten alle tijden aanvaard worden en dus als woningtypologie sterk worden aanbevolen. Enkel de dakappartementen en gelijkvloerse appartementen, beide met een uiterst hoge materialenimpact, vormen de uitzondering op de regel. Bij de hoekappartementen in die specifieke scenario's zijn slechts enkel wooneenheden met een kleine oppervlakte aanvaardbaar. De horizontaal ingesloten appartementen vertonen immers het inverse resultaat, enkel grote wooneenheden worden niet getolereerd.



Figuur 45: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en weergegeven per meergezinswoningstypologie en materialenimpact

Wordt vervolgens figuur 76 in bijlage G vergeleken met figuur 45, dan doet er zich een extremer resultaat voor. Alle wooneenheden zijn onder de benchmarkwaarde gelegen, waarbij nog slechts drie uitzonderingen zich voordoen. Die uitzonderingen zijn enkele dak-hoekappartementen en gelijkvloerse-hoekappartementen, beide in combinatie met zeer grote vloeroppervlaktes en uiterst hoge materiaalimpacts. Daarnaast voldoet 11% van de dak-hoekappartementen met een gemiddelde hoge materialenimpact niet aan de opgelegde benchmark. Dit wordt eveneens weerspiegeld in tabel 14. De geaggregeerde milieuscores resulteren steeds in hoge percentages, terwijl die verder stijgen wanneer de klimaatverandering wordt bekeken.

Uiteindelijk resulteert uit tabel 14 dat slechts 15% van de dak-hoekappartementen, 8% van de dak-ingesloten appartementen, 16% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 7% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen niet aan de geaggregeerde benchmark voldoen. Ten opzichte van de benchmark op basis van de klimaatveranderingsindicator resulteert dit nog slechts in 9% van de dak-hoekappartementen en in 6% van de gelijkvloerse-hoekappartementen. Voor de overige appartementstypologieën worden echter alle varianten steeds geaccepteerd.

Typologie	Materialenimpact	Aanvaardbare woningen in mPt	Aanvaardbare woningen in kgCO ₂
Appartement (dak-hoek)	Uiterst hoog	41%	76%
	Gemiddeld hoog	100%	89%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (dak-ing)	Uiterst hoog	69%	100%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-hoek)	Uiterst hoog	100%	100%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-ing)	Uiterst hoog	100%	100%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (gv-hoek)	Uiterst hoog	35%	78%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (gv-ing)	Uiterst hoog	72%	100%
	Gemiddeld hoog	100%	100%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%

Tabel 14: Aandeel varianten meergezinswoningen per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 8719,32 mPt/vormefficiëntie en 95526,94 kgCO₂/vormefficiëntie

8.3.3. Gecorrigeerde normalisatie

Uit de vorige paragraaf blijkt dat de normalisatie naar de vormefficiëntie grote woningen niet bevoordeelt. Bovendien wordt duidelijk dat voor de opgestelde benchmark ééngezinswoningen echter in beperkte mate toelaatbaar zijn. Voor appartementen, daarentegen, doet het omgekeerde zich voor. Hierdoor wordt het opstellen van een uniforme benchmark bemoeilijkt. Enerzijds moet het vormefficiënte woningen bevoordelen en anderzijds moet het haalbaar blijven voor de minder vormefficiënte typologieën zodat deze typologieën niet volledig uit de markt verdwijnen.

Aangezien de conclusies uit de figuren 43 en 45 een aanzienlijk verschil vertonen, wordt de benchmarkwaarde tweemaal opnieuw bepaald, eenmaal op basis van de ééngezinswoningen en een tweede keer op basis van de meergezinswoningen. De gevonden resultaten worden in tabel 15 naast de reeds verworven benchmarkwaardes vermeld. Bovendien wordt ter verduidelijking in de eenheden “vormefficiëntie” afgekort als “VE”. Uit de tabel wordt duidelijk dat grote verschillen tussen de benchmarktypes zich voordoen. Zo is de benchmark op basis van de ééngezinswoning vijf keer groter dan die voor meergezinswoningen. De mediane waarden liggen bijgevolg te ver uit elkaar om één uniforme grenswaarde voor de combinatie van alle gebouwtypologie op te stellen.

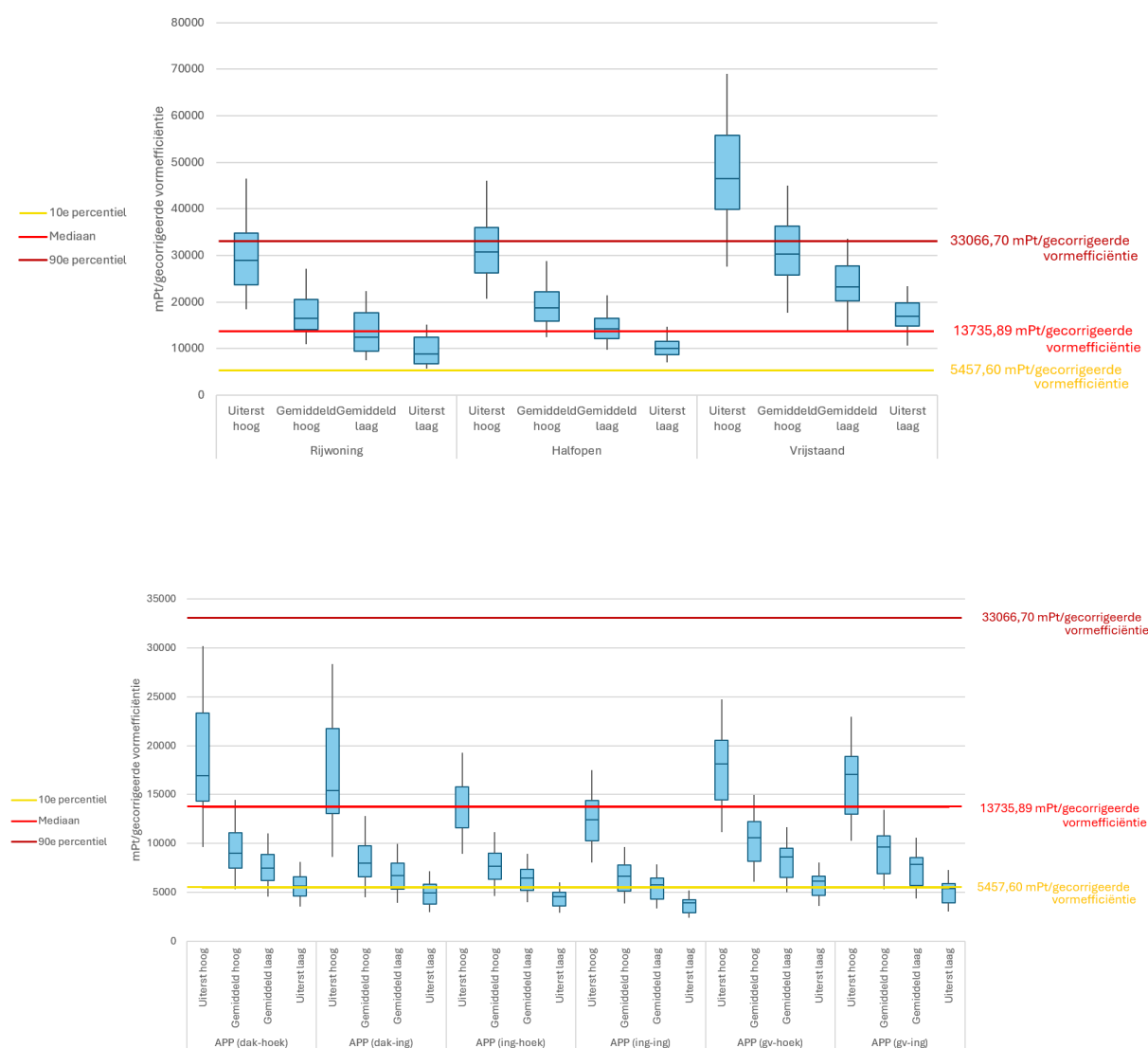
Benchmarktype	Op basis van alle woningen		Op basis van ééngezinswoningen		Op basis van meergezinswoningen	
	[mPt/VE]	[kgCO ₂ /VE]	[mPt/VE]	[kgCO ₂ /VE]	[mPt/VE]	[kgCO ₂ /VE]
10 ^e percentiel	1861,38	19349,58	6058,85	76088,98	1104,68	10929,99
Mediaan	8719,32	95526,94	15238,26	166799,49	3241,43	35998,38
90 ^e percentiel	28914,12	314699,73	35383,74	371417,55	7974,71	75381,16

Tabel 15: De gevonden benchmarktypes op basis van verschillende typologieën, uitgedrukt in mPt/vormefficiëntie en kgCO₂/vormefficiëntie

Dit impliceert een correctie die ingrijpt op de normalisatie. Een mogelijke oplossing die verder onderzocht wordt, is het toevoegen van een correctiefactor aan de verliesoppervlakte van de equivalente boloppervlakte. Bovendien wordt dit eveneens toegepast in de studie naar het S-peil. Bracke et al. (2015) stellen voor om de equivalente boloppervlakte te vermenigvuldigen met de verhouding $A_t/(A_t + A_{\text{gemeen}})$, waarbij A_t de verliesoppervlakte van de woning en A_{gemeen} de oppervlakte van de gemene muren voorstellen. Op die manier wordt de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte als volgt gedefinieerd:

$$A_{\text{bol,corr}} = A_{\text{bol}} * \frac{A_t}{A_t + A_{\text{gemeen}}}$$

Hoewel het S-peil wordt genormaliseerd naar de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte, lijkt dit voor de milieu-impact niet de beste optie. Uit een snelle berekening blijkt immers dat de meergezinswoningen overeenkomen met een laag boloppervlakte, waardoor de normalisatie resulteert in een hogere milieuscore dan de ééngezinswoningen. Dit levert dus een zeer ongewenst resultaat op. Een tweede optie bestaat erin de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte te delen door de verliesoppervlakte. Op die manier wordt de gecorrigeerde vormefficiëntie bekomen. Vervolgens wordt de milieuscore naar de gecorrigeerde vormefficiëntie genormaliseerd. De gevonden resultaten worden verduidelijkt aan de hand van figuur 46. Opnieuw worden de grafieken in kgCO₂ aan de bijlage toegevoegd. Hierbij wordt verwezen naar figuur 77 in bijlage G. Bovendien worden uit die figuren de volgende nieuwe benchmarks gevonden: 13735,89 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 152397,84 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie. Dit leidt tot een stijging van respectievelijk 58% en 60% ten opzichte van de niet-gecorrigeerde normalisatie uit tabel 15.



Figuur 46: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) en per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte.

In het algemeen neemt de milieuscore van de woningvarianten, met uitzondering van de vrijstaande woning, toe. Dit is het logische gevolg van het ontbreken van gemene gebouwelementen bij de typologie. Omwille van de stijging van de milieu-impact, reduceert de spreiding tussen de gebouwtypologieën. Hierdoor wordt het eenvoudiger om een uniforme grenswaarde op te stellen. Bovendien wordt de benchmark milder voor de ééngezinswoningen en strenger voor de meergezinswoningen.

Ondanks de reeds gereduceerde spreiding tussen de typologieën, blijft deze toch aanzienlijk groot. In dit opzicht wordt daarom ook een tweede correctie toegevoegd. Net zoals bij de studie van het S-peil worden, in dit onderzoek, de transmissieverliezen doorheen de gemene gebouwelementen beschouwd (Bracke et al., 2015). Aangezien de operationele impact wordt bepaald op basis van de transmissieverliezen en de gemene elementen de transmissieverliezen verwaarlozen, is de operationele impact van die gebouwelementen eveneens verwaarloosbaar. Het in rekening brengen van de transmissieverliezen door de gemene gebouwelementen impliceert bijgevolg in een stijging van de milieuscore. Hierdoor zou de spreiding tussen de typologieën opnieuw moeten dalen.

Om de transmissie in rekening te kunnen brengen, moeten die gebouwelementen behandeld worden als elementen die grenzen aan een onverwarmde ruimte of als een vloer op volle grond. Dit zorgt ervoor dat het temperatuurverschil sterk wordt getemperd aangezien in die situaties rekening wordt gehouden met een temperatuurreductiefactor (Bracke et al., 2015). In dit onderzoek wordt dit verwezenlijkt door de gemene muren en interne vloeren (enkel bij appartementsgebouwen) in TOTEM van categorie te veranderen. Zo worden de gemene muren niet meer gespecificeerd als de categorie 'gemene muur' maar als 'kelderwand'. Analooq voor de interne vloeren wijzigt de categorie 'verdiepingsvloer' naar 'vloer op volle grond'. Hierdoor neemt de operationele impact toe. De hiermee gepaard gaande stijging van de milieuscore per gebouwelement wordt in onderstaande tabellen weergegeven, waarbij tabel 16 enkel de gebouwelementen in massiefbouw beschouwt en tabel 17 hetzelfde doet voor houtskeletbouw.

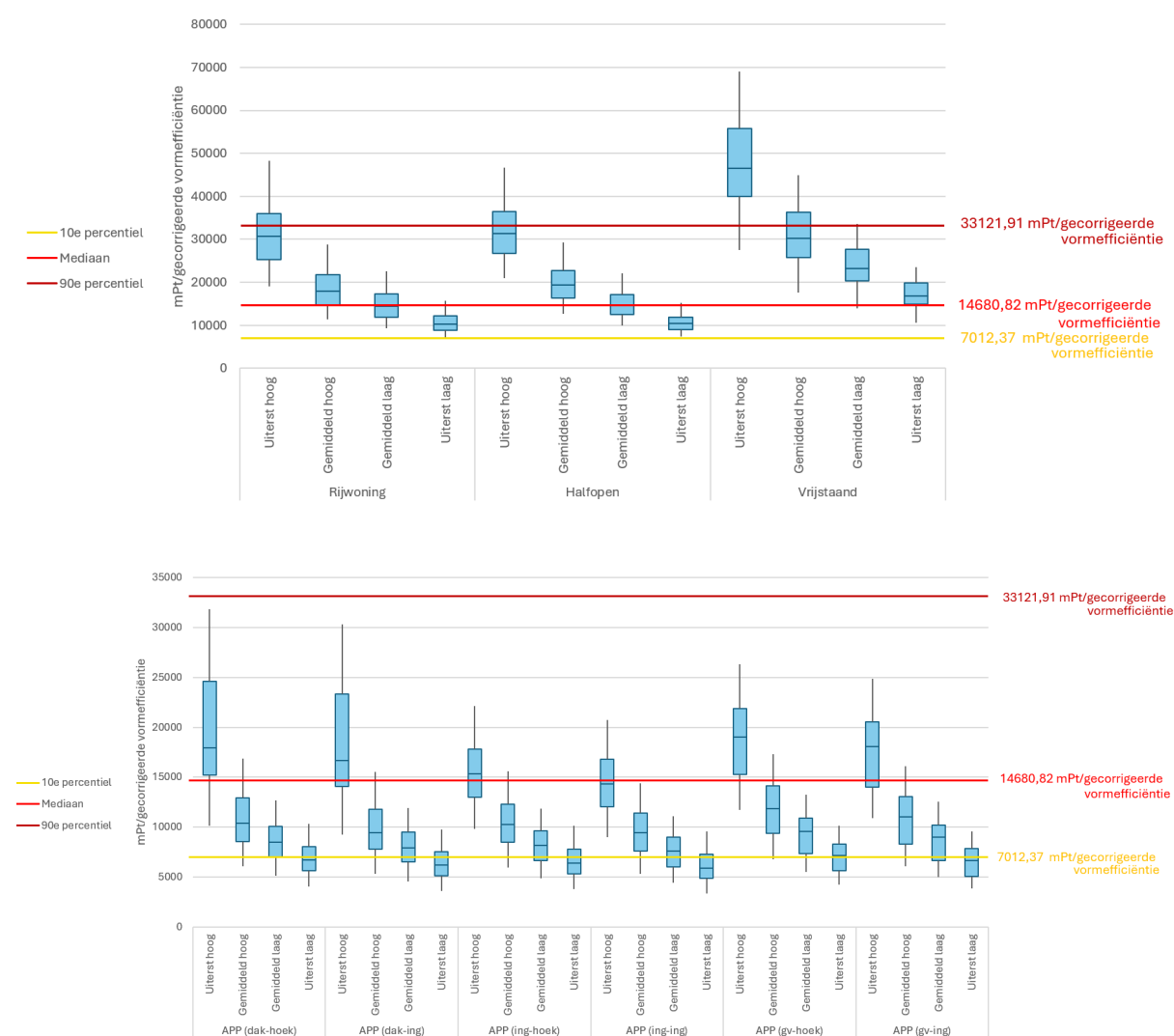
Gebouwelement		Uiterst - hoog		Gemiddeld - hoog		Gemiddeld - laag		Uiterst - laag	
		II	OI	II	OI	II	OI	II	OI
Gemene muur	mPt/m ²	28,96	9,64	9,58	8,25	9,11	9,41	4,7	8,92
	kgCO ₂ /m ²	169	197	135	169	128	193	56	183
Interne vloer	mPt/m ²	36,04	11,71	21,31	19,69	19,01	11,86	11,51	17,66
	kgCO ₂ /m ²	214	240	155	403	135	243	134	361

Tabel 16: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) van de gemene muur en interne vloer in de bouwwijze massiefbouw

Gebouwelement		Uiterst - hoog		Gemiddeld - hoog		Gemiddeld - laag		Uiterst - laag	
		II	OI	II	OI	II	OI	II	OI
Gemene muur	mPt/m ²	30,11	4,62	9,97	4,32	8,37	4,92	7,83	5
	kgCO ₂ /m ²	124	95	99	89	72	101	67	102
Interne vloer	mPt/m ²	27,14	9,37	18,32	15,02	16,77	9,82	7,65	9,02
	kgCO ₂ /m ²	202	192	93	308	79	201	64	185

Tabel 17: ingebedde (II) en operationele impact (OI) van de gemene muur en interne vloer in de bouwwijze houtskeletbouw

Onmiddellijk wordt uit beide tabellen duidelijk dat de operationele impact een aanzienlijke bijdrage levert. Bovendien is die bijdrage bij de lage materiaalimpacts vaak zelfs hoger dan de ingebedde impact van het materiaal. Wat het effect op de milieuscore en een benchmark is, wordt aan de hand van de grafieken in figuur 47 en figuur 78 in bijlage G verduidelijkt. In deze grafieken wordt bovendien nog steeds gewerkt met de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte. De milieuscore wordt dus berekend op basis van beide correcties. Dit levert bijgevolg de volgende benchmarks op: 14680,82 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 172849,36 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie. Ten opzichte van de voorgaande correctie, stijgen de milieuscores en daardoor eveneens de scores van de benchmarktypes. De grootste stijgingen gaan voornamelijk gepaard met, de in de voorgaande stap lagere milieuscores. Dit is op te merken door te kijken naar het verschil tussen de mediane waarden, boven- en ondergrenzen uit beide scenario's. Zo verschillen de milieuscores van de 10^e percentielen in 1500 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie, terwijl dit bij het 90^e percentiel slechts in een verschil van 55 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie resulteert. De mediane waarde stijgt echter met 7% en 13%, respectievelijk voor de geaggregeerde benchmark en de benchmark op basis van de klimaatveranderingsindicator.



Figuur 47: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) en per materiaalimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte en inclusief transmissieverliezen.

Globaal resulteren de correcties in mildere benchmarkwaardes voor ééngezinswoningen. Vooral op het (blijven) bestaan van de vrijstaande woning levert dit het grootste effect. Zo heeft de vrijstaande woning in de toekomst enkel nog kans te bestaan wanneer de woning gebouwd wordt met een beperkte brutovloeroppervlakte in combinatie met een uiterst lage materialenbelasting. De percentage voor de vrijstaande woningen en de overige ééngezinswoningen die voldoen aan de gecorrigeerde referentiewaarde worden in tabel 18 vermeld. Bovendien geldt voor de drie typologieën dat voornamelijk opbouwen met een uiterst lage milieubelasting worden getolereerd. De meerderheid van de toelaatbare gevallen bestaat uit een houtskelet waardoor de voorkeur uitgaat naar houtskeletbouwoningen. Toch is een lage materialenimpact niet altijd voldoende. Vaak moet dit immers worden gecombineerd met een klein brutovloeroppervlakte om aan de benchmark te kunnen voldoen. Dit leidt uiteindelijk tot 42% van de rijwoningen, 38% van de halfopen woningen en 7% van de vrijstaande woningen die voldoen aan de geaggregeerde benchmark. Gemiddeld 47% van die varianten is opgebouwd uit massiefbouw. De klimaatveranderingsindicator, daarentegen, is strenger en aanvaard slechts 37% van de rijwoningen, 34% van de halfopen woningen en 3% van de vrijstaande woningen. Hoewel opnieuw voor de vrijstaande woningen 47% opgebouwd is uit massiefbouw, stijgt het aantal varianten in houtskeletbouw bij de overige twee typologieën. Zo is uiteindelijk 66% van de rijwoningvarianten en 61% van de halfopen woningvarianten uit houtskeletbouw opgebouwd.

In tegenstelling tot de ééngezinswoningen, resulteren de correcties voor meergezinswoningen in strengere benchmarkwaardes. De aandelen van de appartementsgebouwen worden eveneens aan tabel 18 toegevoegd. Bovendien is algemeen te stellen dat meergezinswoningen opgebouwd uit gebouwelementen met een uiterst hoge materiaalimpact niet te tolereren zijn, met uitzondering van enkele scenario's. Eventueel in combinatie met een kleine vloeroppervlakte is het bouwen van de wooneenheid wel mogelijk. Overigens toont het vorige hoofdstuk aan dat bij een uiterst hoge materialenimpact massiefbouw, in tegenstelling tot houtskeletbouw, steeds een grotere milieubelasting met zich meebrengt. Dit wil dus zeggen dat een hoge milieubelasting in combinatie met een kleine vloeroppervlakte slechts enkel mogelijk zal zijn in houtskeletbouw, met enkele uitzonderingen op de regel. Daarnaast zijn appartementen met een hoge materialenimpact, op een aantal uitzonderingen na, steeds aanvaardbaar. Terwijl voor uiterst lage materiaalimpacts altijd aan de benchmark wordt voldaan, is dit niet het geval voor gemiddeld lage materialenimpacts. Minder dan tien woningvarianten zijn echter niet acceptabel, waarbij dit enkel van toepassing is indien naar de klimaatveranderingsindicator wordt gekeken. Bovendien volgen uit de tabel volgende percentages aan aanvaardbare varianten voor de geaggregeerde score: 79% van de dak-hoekappartementen, 83% van de dak-ingesloten appartementen, 83% van de verdiepings-hoekappartementen, 89% van de verdiepings-ingesloten appartementen, 75% van de gelijkvloerse-hoekappartementen en 80% van de gelijkvloerse-ingesloten appartementen. Hierbij is 44% tot 48% opgebouwd uit massiefbouw. Met oog op de klimaatverandering worden respectievelijk volgende percentages gevonden: 82%, 87%, 93%, 95%, 82% en 89%. Bij deze varianten is bovendien 42% tot 48% opgebouwd uit massiefbouw.

Typologie	Materialenimpact	Aanvaardbare woningen in mPt	Aanvaardbare woningen in kgCO ₂
Rijwoning	Uiterst hoog	0%	4%
	Gemiddeld hoog	23%	33%
	Gemiddeld laag	55%	41%
	Uiterst laag	89%	72%
Halfopen woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	12%	23%
	Gemiddeld laag	50%	43%
	Uiterst laag	91%	70%
Vrijstaande woning	Uiterst hoog	0%	0%
	Gemiddeld hoog	0%	0%
	Gemiddeld laag	7%	0%
	Uiterst laag	23%	10%
Appartement (dak-hoek)	Uiterst hoog	22%	61%
	Gemiddeld hoog	89%	72%
	Gemiddeld laag	100%	94%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (dak-ing)	Uiterst hoog	37%	70%
	Gemiddeld hoog	94%	78%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-hoek)	Uiterst hoog	39%	81%
	Gemiddeld hoog	94%	89%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (ing-ing)	Uiterst hoog	56%	91%
	Gemiddeld hoog	100%	89%
	Gemiddeld laag	100%	100%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (gv-hoek)	Uiterst hoog	17%	56%
	Gemiddeld hoog	83%	81%
	Gemiddeld laag	100%	93%
	Uiterst laag	100%	100%
Appartement (gv-ing)	Uiterst hoog	30%	72%
	Gemiddeld hoog	89%	89%
	Gemiddeld laag	100%	94%
	Uiterst laag	100%	100%

Tabel 18: Aandeel varianten per scenario die aanvaard worden ten opzichte van de benchmarkwaardes 14680,82 mPt/ gecorrigeerde vormefficiëntie en 172849,36 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie

8.4. Besluit

Het onderzoek concludeert dat het uitdrukken van een benchmark volgens de brutovloeroppervlakte geen ideale resultaten oplevert. Dit omwille van het benadelen van kleine gebouwen. Aangezien in de literatuur de milieuscore steeds naar de vloeroppervlakte wordt genormaliseerd, worden echter twee benchmarks vooropgesteld: 62,57 mPt/m²BVO en 736,40 kgCO₂/m²BVO. Eveneens het normaliseren naar het volume of de verliesoppervlakte vertonen hetzelfde probleem. Hoewel de compactheid op het eerste zicht een goede optie lijkt, worden grote woningen nog steeds bevoordeeld. Bijgevolg komt de vormefficiëntie in beeld. Uiteindelijk impliceert de normalisatie naar de vormefficiëntie grote verschillen tussen de milieuscores van de verschillende gebouwtypologieën. Hierdoor wordt het bewerkstellingen van een uniforme grenswaarde een complex gegeven. Dit probleem wordt aangepakt door het toevoegen van een correctiefactor op de equivalente boloppervlakte en het inbrengen van de transmissieverliezen van de gemene delen. Bijgevolg wordt voor alle gebouwtypologieën een benchmark van 14680,82 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie of ook 172849,36 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie bekomen.

De benchmarks accepteren respectievelijk 81% en 88% van alle meergezinswoningtypologieën, waarvan gemiddeld 46% bestaat uit massiefbouw. Voornamelijk (uiterst) hoge materiaalimpacts, in combinatie met een grote brutovloeroppervlakte vormen de uitzondering. Daarentegen, gezien het aanzienlijk verschil in compactheid bij de ééngezinswoningtypologieën voldoet respectievelijk 42% en 37% van de rijwoningen, 38% en 34% van de halfopen woningen en 7% en 3% van de vrijstaande woningen. Hierbij is gemiddeld 47% uit massiefbouw opgebouwd. In tegenstelling tot de appartementen, voldoen voornamelijk de varianten opgebouwd uit materialen met een lage milieubelasting en een kleine brutovloeroppervlakte. Uiteraard blijft de benchmark een waarde die afhankelijk is van de geometrie, materialiteit en gebouwtypologie van de geanalyseerde woningen. Verder onderzoek naar een limietwaarde voor het ontwikkelen van een definitief milieupeil is vereist.

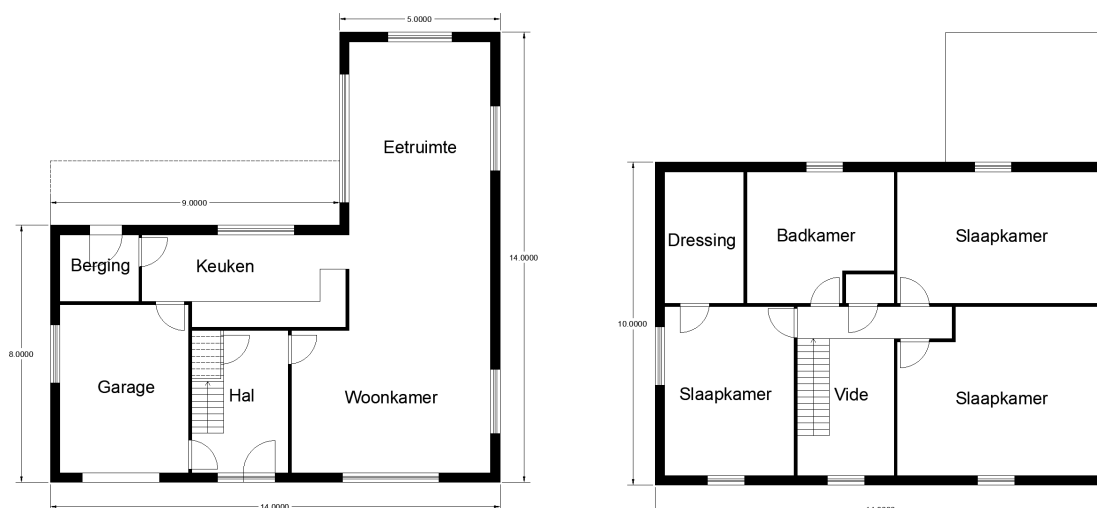
Hoofdstuk 9. Gevoeligheidsanalyse

Materialiteit. Geometrie. Typologie. Drie termen die een woning kenmerken. Drie termen die de milieuscore van een woning bepalen. Drie termen die verschillen voor elke woningvariant binnen het onderzoek. In de gevoeligheidsanalyse wordt verder dieper onderzoek naar één van de drie termen gevoerd. De gekozen parameter is de geometrie.

9.1. Variatie op de compactheid

Het onderzoek start met het kiezen van één typologie en één materiaalvariant die als constanten in dit deelonderzoek worden vastgesteld. Er wordt vertrokken vanaf de vrijstaande woning met een gemiddeld lage materialenimpact uit massiefbouw. Ondanks dat de geometrie reeds verschaalt in breedte, lengte en verdiepingshoogte, blijft het vloerplan van de referentiewoning steeds rechthoekig. Dit is niet enkel het geval voor de vrijstaande woning, maar ook voor acht overige gebouwtypologieën. Het onderzoek focust bijgevolg op de invloed van bijbouwen waardoor het plan zijn zuivere vorm verliest.

Voor dit deelonderzoek wordt het oorspronkelijke plan naast de geometrische variant gelegd. Om te beginnen wordt op het originele grondplan enkel aanpassingen gemaakt door de breedte en lengte opnieuw te laten variëren. De verdiepingshoogte wordt bijgevolg constant genomen op 2,60m. Hierdoor wordt het aantal variaties beperkt. Diezelfde wijzigingen worden toegepast op onderstaande plannen, in figuur 48, met een gelijke brutovloeroppervlakte, maar met een verschillende vorm. Dit plan is gebaseerd op de referentiewoning en neemt de identieke raamopeningen en planindeling over. Er treden echter enkele kleine verschillen in de binnenmuren op, wegens de verandering van de vorm en bijkomend wordt één extra raam voorzien in het noorden van de uitbouw. Bovenop de uitbouw is een deel van een plat dak voorzien, maar de bovenverdieping bestaat nog steeds uit hetzelfde hellende dak met dakramen. Bovendien wordt een overkraging aan de keuken van twee meter voorzien, wat zorgt voor extra variatie in de geometrie van de woning.



Figuur 48: Geometrische variatie op de referentiewoning van de vrijstaande woningtypologie

Nu het rechthoekig plan verloren gaat, wordt het beschrijven van de lengte en breedte voor alle buitenmuren met één waarde bemoeilijkt. Daarom wordt gekozen om de afmetingen van de buitenwanden op de bovenverdieping als standaardafmetingen te nemen. De gelijkvloerse wanden worden bijgevolg in functie van de lengte en breedte van de bovenverdieping uitgeschreven. De standaardafmetingen zijn gelijk aan een breedte van 14 meter en een lengte van 10 meter. Beide parameters nemen vervolgens drie verschillende waarden aan zodat de combinatie leidt tot negen varianten met unieke geometrische karakteristieken die in tabel 19 zijn vermeld. Die varianten gaan op hun beurt gepaard met een breedte van 10, 14 of 16 meter en een lengte variërend tussen 8, 10 en 12 meter.

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
VS1	154	435,3	498,19	0,87	0,56
VS2	215	609,5	636,15	0,96	0,55
VS3	246	696,5	705,14	0,99	0,54
VS4	192	544,2	574,82	0,95	0,56
VS5	269	761,8	728,11	1,05	0,55
VS6	308	870,7	804,75	1,08	0,55
VS7	231	653,0	652,94	1,00	0,56
VS8	323	914,2	822,14	1,11	0,55
VS9	369	1044,8	906,75	1,15	0,55

Tabel 19: Geometrische karakteristieken van de geometrische variant van de vrijstaande woning

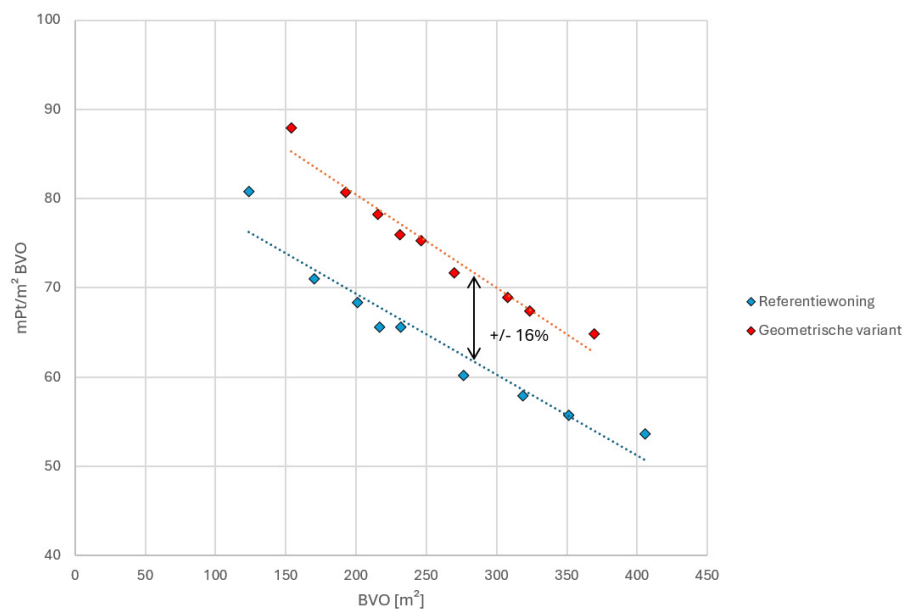
Het grootste onderscheid tussen de referentiewoningen en de geometrische varianten is te vinden in de parameters: verliesoppervlakte, compactheid en vormefficiëntie. Omwille van het afstappen van het rechthoekige plan, neemt de verliesoppervlakte van de woning toe. Dit leidt tot een minder compacte en minder woonefficiënte woning. Bovendien impliceert het toenemen van de verliesoppervlakte meer schilelementen en bijgevolg meer materiaal. Logischerwijs zou dit betekenen dat de milieu-impact van de geometrische variant hoger is dan die van de referentiewoning. In dit kader wordt tabel 20 (die verder loopt op de volgende pagina) opgesteld. Hierin worden de totale milieuscores en de genormaliseerde milieuscores vermeld.

	Milieuscore	VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6
Ref.-woning	[mPt]	9986,5	12070,5	14196,4	13728,6	16627,0	19593,4
	[mPt/m ² BVO]	80,8	71	65,6	68,3	60,2	55,7
	[mPt/VE]	13044,2	15811,9	18997,3	18638,3	22315,3	26622,0
	[kgCO ₂]	134285,9	160547,4	187233,6	178489	213602,2	249405,8
	[kgCO ₂ /m ² BVO]	1086,5	944,7	865,7	888,7	773,5	709,6
	[kgCO ₂ /VE]	175402,7	210309,5	250550,9	242321	286678,8	338873,3
Geom. variant	[mPt]	13533,7	16870,7	18539,3	15515,2	19313,7	21213,0
	[mPt/m ² BVO]	87,9	78,3	75,2	80,6	71,7	68,9
	[mPt/VE]	24272,5	30873,3	34402,5	27668,6	34861,1	38715,3
	[kgCO ₂]	184193,1	224904,2	245259,8	209990	255868,7	278807,8
	[kgCO ₂ /m ² BVO]	1196,9	1043,9	996	1091,6	950,1	905,8
	[kgCO ₂ /VE]	330348,7	411571,6	455117,4	374480	461840,6	508844,2

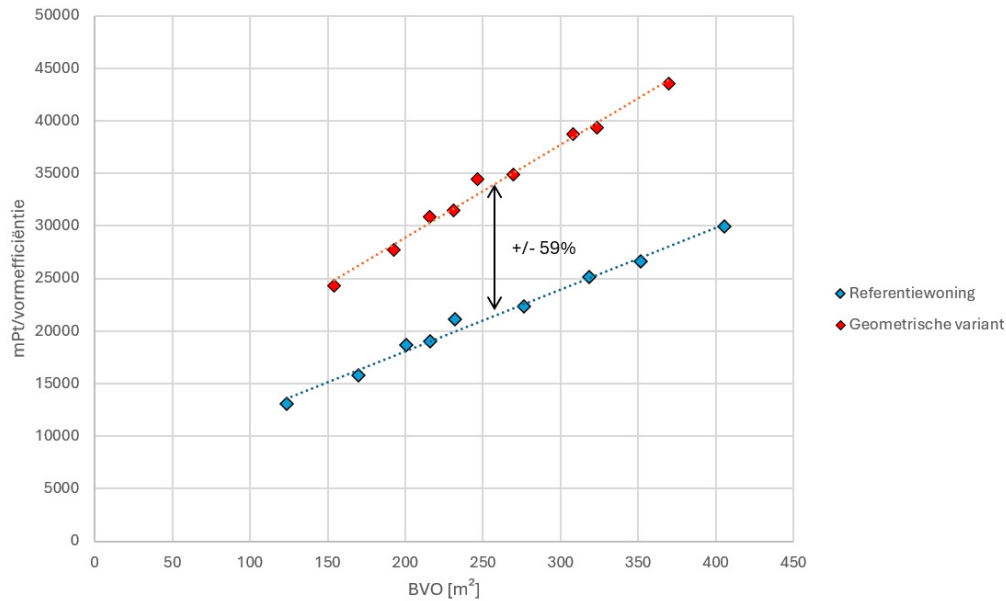
	Milieuscore	VS7	VS8	VS9
Ref.- woning	[mPt]	15225,4	18449,6	21752,1
	[mPt/m ² BVO]	65,7	57,9	53,6
	[mPt/VE]	21073,8	25154,0	29955
	[kgCO ₂]	196170	234824,2	274274,7
	[kgCO ₂ /m ² BVO]	846,5	737,0	676,3
	[kgCO ₂ /VE]	271523,3	320157,5	377704,6
Geom. variant	[mPt]	17523,1	21793,6	23928,9
	[mPt/m ² BVO]	75,9	67,4	64,7
	[mPt/VE]	31433,5	39334,2	43575,4
	[kgCO ₂]	236055,6	287208,1	312784,4
	[kgCO ₂ /m ² BVO]	1022,6	888,7	846,8
	[kgCO ₂ /VE]	423444,5	518366,3	569589,9

Tabel 20: Milieuscores van de referentiewoningen en geometrische varianten van de vrijstaande woning

Om een grafisch beeld te scheppen bij de vergelijking van de achttien vrijstaande woningen, worden de figuren 49 en 50 ontwikkeld. In die grafieken worden de geometrische varianten ten opzichte van de overeenkomstige referentiewoningen uitgezet. In de eerste grafiek wordt de milieuscore genormaliseerd naar de brutovloeroppervlakte, terwijl de tweede grafiek de vormefficiëntie als normalisatiefactor inzet.



Figuur 49: Milieuscore/m²BVO voor de referentiewoningen en de geometrische varianten



Figuur 50: Milieuscore/vormefficiëntie voor de referentiewoningen en de geometrische varianten

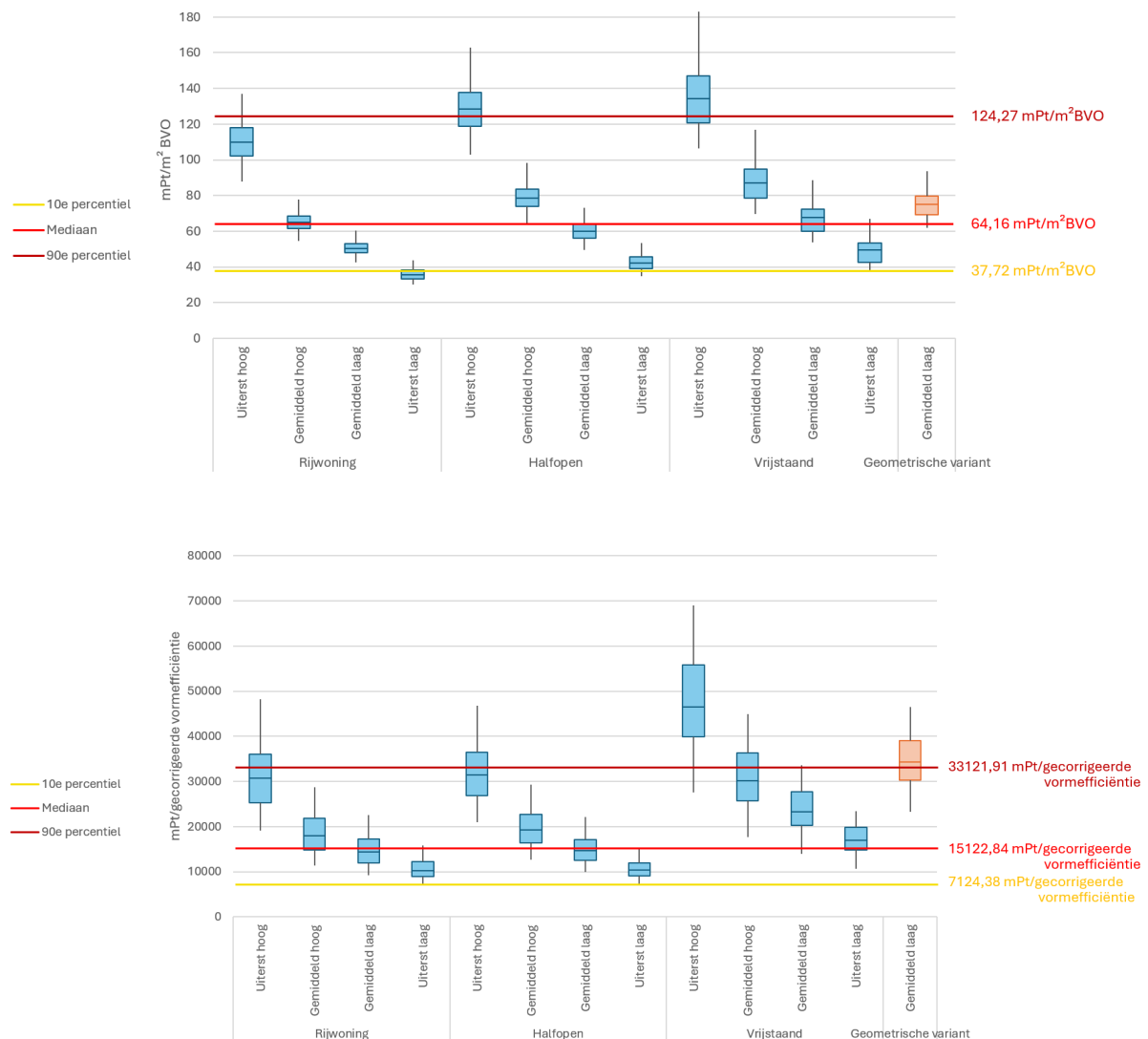
Beide grafieken geven duidelijk weer dat de milieuscore van een woning met een minder compacte vorm steeds hoger is. Hieruit kan bijgevolg gesteld worden: hoe compacter de woning in zijn geometrie, hoe beter de milieuprestatie van de woning. Bovendien duiden beide grafieken de trendlijnen per woningsoort aan. Het verschil tussen de twee trendlijnen wordt telkens met een percentage aangegeven. Zo is in figuur 49 de milieuprestatie van de geometrische variant gemiddeld 16% hoger dan die van de referentiecasse. Daarentegen is het verschil aanzienlijk groter in figuur 50. Dit is te verklaren door de kleine waarde die de vormefficiëntie aanneemt en bijgevolg resulteert in een hogere genormaliseerde milieuscore.

9.2. Invloed op benchmarking

De afname van de compactheid zorgt voor een stijging van de milieuscore. Dit wil dus zeggen dat wanneer een benchmark wordt ontwikkeld op basis van compacte en minder compacte woningen, de referentiewaarde zal stijgen. Uit het vorige hoofdstuk zijn reeds twee referentiewaarde voor de geaggregeerde milieuscore gevonden: 62,57 mPt/m²BVO en 14680,82 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie. Om de invloed op de reeds bekomen benchmarks vast te stellen, worden die geometrische varianten toegevoegd aan de reeds 3240 geanalyseerde cases.

In de vorige paragraaf worden immers slechts negen geometrische varianten ontworpen, wat in verhouding tot de totale set aan referentiegebouwen zeer beperkt is. Dit zou echter tot een onleesbaar resultaat leiden. Om die reden wordt opnieuw gekozen om de verdiepingshoogte te laten variëren tussen de waardes 2.60, 2.80 en 3 meter. Zo worden uiteindelijk toch 81 niet-compacte varianten ontwikkeld. In de volgende stap worden die varianten, naast massiefbouw, eveneens in houtskeletbouw uitgevoerd, met een beperkte materialenimpact. Er wordt slechts met een opbouw met een gemiddelde lage milieubelasting rekening gehouden. Zo eindigt de gevoeligheidsanalyse met 162 niet-compacte varianten.

De milieuscores van de 3240 geanalyseerde cases en de 162 geometrische varianten van de vrijstaande woning worden samen vermeld in figuur 51. Hierbij drukt de bovenste grafiek de milieuscore met een normalisatie naar de brutovloeroppervlakte uit, terwijl de onderste grafiek hetzelfde weergeeft maar genormaliseerd naar de tweemaal gecorrigeerde vormefficiëntie. Bovendien valt in de grafieken onmiddellijk op dat de scores van de geometrische variant hoger gelegen zijn dan de scores van de vrijstaande variant met een gelijkaardige materialenimpact. Het verschil bij de normalisatie naar de vormefficiëntie is echter aanzienlijk groter. Dit is te verklaren omwille van de identieke vloeroppervlakte waarvan de geometrische variant is gestart. De verschaling van de breedte en de lengte resulteert immers in een verschillende brutovloeroppervlakte, toch blijven de oppervlaktes nauw aan elkaar gelijk. De vormefficiëntie daarentegen vertoont duidelijkere verschillen in waarde, waardoor het onderscheid bijgevolg duidelijker te merken is. Uit de grafieken in figuur 79 in bijlage H, met oog op de klimaatveranderingsindicator, volgen bovendien analoge conclusies.



Figuur 51: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen, inclusief de niet-compacte vrijstaande woningen, uitgedrukt in mPt/m² BVO (bovenaan) en mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie (onderaan)

Amper 5% van alle woningvarianten in dit deelonderzoek heeft een niet-compacte vorm. Hierdoor is de invloed van die specifieke woning zeer beperkt, maar daarom niet afwezig. Uiteindelijk leidt dit deelonderzoek tot volgende benchmarkwaardes: 64,16 mPt/m² BVO, 736,40 kgCO₂/m² BVO, 15122,84 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 17336,10 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie. Beide mediane waardes vertonen echter een lichte stijging in waarde en worden gekenmerkt door een toename van 3%, wat reeds een aanzienlijke toename is voor het beperkte aantal cases. Dit impliceert bijgevolg dat wanneer voor elke variant een niet-compacte woningvariant zou worden gekozen, dat de milieuscores van de woningen en bijhorend eveneens de benchmarkwaarde aanzienlijk zou stijgen. Op basis van de klimaatveranderingsindicator is de toename van de referentiewaarde immers beperkter. Zo ondergaat de milieuscore genormaliseerd naar de brutovloeroppervlakte slechts een stijging van 2% in plaats van 3%. De normalisatie naar de vormefficiëntie resulteert echter in een even grote stijging aan de geaggregeerde score.

9.3. Besluit

Hoewel de geometrie in het onderzoek reeds als variërende parameter wordt beschouwd, wordt de geometrie met oog op de compactheid gewijzigd. In de gevoeligheidsanalyse wordt al snel duidelijk dat de compactheid een aanzienlijke invloed heeft op de milieuscore van een gebouw. Hoe minder compact de woning is opgebouwd, hoe hoger de milieubelasting ervan. Indien voor elke typologie een nieuwe, niet-compacte variant wordt toegevoegd, zou de milieuscore en bovendien de benchmark aanzienlijk stijgen. Ondanks dat in dit deelonderzoek slecht 5% van de woningen een niet-compacte variant bedraagt, stijgen de reeds bepaalde benchmarkwaardes met gemiddeld 3%. Zo strandt dit onderzoek op de volgende referentiewaardes: 64,16 mPt/m² BVO, 736,40 kgCO₂/m² BVO, 15122,84 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 17336,10 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie.

Hoofdstuk 10. Discussie

Het opstellen van een milieubenchmark voor residentiële gebouwen past binnen het methodologische kader van de levenscyclusanalyse of LCA. Hierbij is de levenscyclusanalyse sterk afhankelijk van de levensduur, levenscyclusfasen, functionele eenheid, etc. en wordt uitgebreid besproken in hoofdstuk 4. Bovendien focust de literatuur zeer sterk op die kenmerken van LCA, waarbij grote verschillen tussen de individuele Europese landen ontstaan. Omwille van dit onderscheid wordt het maken van een vergelijkende studie bemoeilijkt. Er zijn echter beperkte overeenkomstige punten waaraan de diverse studies kunnen worden getoetst. In hoofdstuk 8 wordt immers een poging gewaagd om de individuele benchmarks, enkel voor $\text{mPt/m}^2\text{BVO}$ en $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$, met de benchmark uit deze studie te vergelijken.

Bovendien vertrekt de studie vanuit de Belgische duurzaamheidstool TOTEM, dewelke eveneens zijn beperkingen heeft. Zo worden bijvoorbeeld niet alle levenscyclusfasen in rekening gebracht. De volgende vier levenscyclusfasen worden in TOTEM verwaarloosd: het gebruik, het herstel, de renovaties en het operationeel waterverbruik. Indien die laatstgenoemde fasen immers worden toegevoegd, impliceert dit een toename van de totale milieuscore. Daarnaast biedt de duurzaamheidstool slechts een beperkt aantal aan voorgedefinieerde opbouwen van gebouwelementen. Dit verkleint immers de variatiemogelijkheden voor de vier impactcategorieën (uiterst hoge en lage en gemiddeld hoge en lage impact). Voor bepaalde gebouwelementen, zoals bijvoorbeeld buitendeuren, biedt TOTEM echter minder dan vier opties. Hierdoor wordt genoodzaakt om dezelfde componenten in meerdere impactscenario's in te zetten. Vervolgens bepalen die milieubelastingen, met name de uiterste materiaalimpacts, de uiterste grenzen van de benchmarktypes. Zo zijn de onder- en bovengrens voornamelijk afhankelijk van de impact van die uiterste opbouwen. Indien echter vier gemiddelde opbouwen worden uitgekozen, zou dit resulteren in differentiërende benchmarktypes. Daarnaast wordt in dit onderzoek enkel rekening gehouden met massief- en houtskeletbouw, wat bovendien de twee voornaamste bouwmethoden in Vlaanderen zijn. Toch bestaan ook de bouwmethoden zoals modulair, staal- en betonbouw, die volledig buiten beschouwing worden gelaten.

Naast de limieten op vlak van materialiteit, ondervinden de overige twee hoofdtermen – typologie en geometrie – eveneens beperkingen. Zo worden reeds negen typologieën, waarvan drie ééngezinswoningen en zes meergezinswoningen, geanalyseerd. Deze negen typologieën dekken niet alle woningtypologieën in België, maar beperken zich tot de meest voorkomende typologieën. Op die manier zou, bij de analyse van de ééngezinswoningen, verder onderscheid kunnen worden gemaakt door extra typologieën zoals bijvoorbeeld herenhuizen of bungalows, in rekening te brengen. Vervolgens wordt in het onderzoek slechts gekeken naar ééngezinswoningen die twee verdiepingen beslaan, maar variaties hierop zijn echter mogelijk. Analoog wordt bij de meergezinswoningen immers enkel rekening gehouden met appartementen die zich slechts over één verdiep uitstrekken. Daarnaast bestaan bijkomende typologieën als duplexappartementen of een loft die aan de vier zijden met glas is omringd.

Daarnaast wordt in de gevoeligheidsanalyse de geometrie verder onderzocht. Het algemene onderzoek vertrekt op basis van een aantal referentiecasses die telkens in geometrie worden verschaald om uiteindelijk een brede set aan woningvarianten te bekomen. Die cases zijn telkens afkomstig uit de studie over het energieprestatiepeil van Van Der Veken et al. (2015). Zoals in de gevoeligheidsanalyse reeds besproken, vertonen de plannen steeds een rechthoekige vorm. Voor de vrijstaande woning wordt echter aangetoond dat het aanpassen van die compactheid leidt tot een toename van de milieuscore. Om een concreter en uniformer beeld te verkrijgen, zou diezelfde studie immers moeten worden uitgevoerd voor de overige gebouwtypologieën.

Vervolgens is in deze masterproef bewust gekozen om de installaties buiten beschouwing te laten. Toch leveren de technische installaties eveneens een bijdrage aan het milieu. Die milieuprestatie bestaat, analoog aan de gebouwelementen, uit een ingebed en een operationeel deel. De operationele impact bij de gebouwelementen worden enkel op basis van de transmissieverliezen doorheen het gebouwelement bepaald. Indien de technische installaties deelnemen aan de milieubeoordeling, zal het aandeel van de operationele en ingebedde impact echter toenemen. Bovendien differentieert de milieuprestatie afhankelijk van de gekozen technische installaties. Bijgevolg leidt het meenemen van de technieken tot een volledig nieuw onderzoek, waardoor dit buiten de grenzen van deze thesis komt te liggen.

De gehele masterproef, als gevolg van benchmarking, ligt op de grens tussen onderzoek en beleid. Dit wordt in literatuurstudie eveneens duidelijk door het onderscheid tussen de top-down en bottom-up benadering. Zo start het onderzoek vanaf representatieve cases, waarbij op basis van die cases de referentiewaarde wordt opgesteld. Hierbij rijst de vraag in hoeverre de woningvarianten representatief zijn voor het Belgische gebouwenpark. Echter, het koppelen van de woningtypologieën aan data over het Belgische gebouwenbestand (d.w.z. percentages die beschrijven hoeveel van die bepaalde typologie effectief aanwezig is in België), zou een realistischer beeld schetsen. Bovendien ontbreekt in dit onderzoek eveneens het beleidsaspect om een definitieve limietwaarde, en dus top-down benchmark, te kunnen definiëren.

Hoofdstuk 11. Conclusie

In dit onderzoek wordt, met oog op het ontwikkelen van een benchmark, kennis verworven over de invloed van de typologie, geometrie en materialiteit op de milieuprestatie van residentiële gebouwen. Dit onderzoek komt tot stand door de klimaatproblematiek en door de vraag hoe wij, in de bouwsector, duurzaam kunnen omgaan met onze planeet. Omwille van de steeds belangrijker wordende problematiek, duikt voortdurend meer onderzoek naar het ontwikkelen van een milieubenchmark of milieupeil op. Zo blijkt uit de literatuurstudie dat reeds diverse Europese landen zich inzetten voor dit onderzoek. Hoewel alle analyses vanaf dezelfde beoordelingsmethode, LCA, starten, gaat elk land gepaard met hun eigen beperkingen en limieten. Bovendien zet de literatuur in op het ontwikkelen van een referentiewaarde zonder kritisch na te denken over de beoordelingsmethode en de invloed van bepaalde geometrische parameters van de woning. Om die reden wordt in deze masterproef de focus op de normalisatie, op de eenheid waarin de milieuscore en benchmark worden uitgedrukt, en op de invloed van de typologie, geometrie en materialiteit gelegd.

De masterproef start met negen typologieën. Die typologieën ondergaan wijzigingen met oog op de geometrie en de materialiteit. De geometrie wijzigt door waardes voor de breedte, de lengte en de verdiepingshoogte van de woning te differentiëren, terwijl de materialiteit de twee frequente bouwwijzen, massiefbouw en houtskeletbouw, in rekening brengt. Bovendien wordt per bouwwijze een bijkomend onderscheid gemaakt op basis van de milieuscore. Zo ontstaan per bouwmethode vier subgroepen die afhankelijk zijn van de grootte van de materialenimpact. Door de uiteindelijke combinatie van de typologieën met de geometrieën en de diverse materialen, worden 3240 unieke woningvarianten, die basis van het onderzoek vormen, ontwikkeld.

In de eerste stap worden de totale milieubelastingen van alle varianten tegenover elkaar uitgezet. Hieruit blijkt dat massiefbouw steeds resulteert in een hogere belasting op het milieu dan houtskeletbouw, onafhankelijk van de materialenimpact. Daarnaast neemt de milieu-impact in stijgende lijn toe naarmate de brutovloeroppervlakte van de woning vergroot. Dit impliceert dat hoe meer materialen nodig zijn voor het realiseren van de woning, hoe groter de milieubelasting wordt. Dit verklaart eveneens de reden waarom meergezinswoningen, die over het geheel genomen een kleinere brutovloeroppervlakte beslaan, in de meeste gevallen resulteren in een lagere score. Wordt echter gekeken naar uitsluitend de typologie, dan geldt voor de ééngezinswoningen dat de vrijstaande woningen de meeste nefaste invloed op het milieu veroorzaken. Daarna volgt de halfopen woning en vervolgens sluit de rijwoning dit rijtje af. Analooch kan een soortgelijke rangschikking voor de meergezinswoningen worden opgesteld. Hierbij scoren de dakappartementen het hoogst, op de voet gevolgd door de gelijkvloerse appartementen en eindigend met de verdiepingsappartementen. Die drie typologieën worden verder in hoek- of ingesloten appartementen onderscheiden, waarbij de ingesloten varianten steeds in een lagere milieuscore resulteren.

Uit dit deelonderzoek worden reeds drie benchmarkwaardes ontwikkeld. De gekozen benchmark wordt, zoals in de literatuur, gelijk genomen aan de referentie- of mediane waarde. Op die manier worden volgende benchmarks bekomen: 13664,85 mPt en 151717,55 kgCO₂ voor ééngezinswoningen en 5027,96 mPt en 56554,55 kgCO₂ voor meergezinswoningen. Dit betekent dat op basis van alle woonvarianten de bijhorende benchmarkwaardes tussen die voorgenoemde referentiewaardes gelegen is en levert dus 9374,09 mPt en 104780,80 kgCO₂ als benchmarkwaardes op.

In de literatuur wordt het merendeel van de milieuscores genormaliseerd naar de brutovloeroppervlakte. Dit levert in kader van dit onderzoek volgende benchmarks op: 62,57 mPt/m²BVO en 736,40 kgCO₂/m²BVO. In de volgende fase van het onderzoek wordt die normalisatie in vraag gesteld en kritisch benaderd. Zo wordt ondervonden dat een normalisatie naar de brutovloeroppervlakte leidt tot het bevoordelen van grote woningen. In vergelijking met de totale milieuscores uit het voorgaande deelonderzoek, blijkt dit een ongunstig resultaat. Daarom wordt naar een nieuwe normalisatiefactor gezocht. Er wordt bijgevolg een analyse op het volume, de verliesoppervlakte en de compactheid uitgevoerd, waaruit analoge conclusies aan de brutovloeroppervlakte worden getrokken. Hoewel de compactheid een nauwer aansluitend resultaat met de totale milieuscore uit het voorgaande onderzoek biedt, bevoordeelt het immers grote woningen. Omwille van die vaststelling wordt overgeschakeld naar vormefficiëntie, die kleine gebouwen echter niet benadeelt. Ondanks dat dit probleem is opgelost, rijst een nieuw probleem op: door grote verschillen in de milieuscores per typologie, wordt het vormen van een uniform geldende benchmark echter bemoeilijkt. Dit wordt aangepakt door het uitvoeren van twee correcties op de normalisatie: het invoegen van de gecorrigeerde equivalent boloppervlakte en het inbrengen van de transmissieverliezen door de gemene delen.

De uiteindelijke verkregen benchmarks na de correcties zijn: 14680,82 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 172849,36 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie. Hierbij voldoet respectievelijk 81% en 88% van de meergezinswoningen aan de opgelegde benchmarks, waarvan gemiddeld 46% uit massiefbouw is opgebouwd. De 19% en 12% niet-geaccepteerde varianten bestaan voornamelijk uit (uiterst) hoge materialenimpacts gecombineerd met een grote brutovloeroppervlakte. Daarentegen voldoet respectievelijk 42% en 37% van de rijwoningen, 38% en 34% van de halfopen woningen en 7% en 3% van de vrijstaande woningen. Hierbij is gemiddeld 47% uit massiefbouw opgebouwd. In tegenstelling tot de appartementen, voldoen enkel de varianten met een lage materialenimpact gecombineerd met een kleine brutovloeroppervlakte.

Tot slot blijkt uit de gevoeligheidsanalyse de invloed van de geometrie door het toevoegen van niet-compacte woningen. Hieruit volgt dat de benchmarkwaarde stijgt indien de compactheid van de woning afneemt. Dit leidt uiteindelijk tot de nieuwe benchmarkwaardes: 15122,84 mPt/gecorrigeerde vormefficiëntie en 17336,10 kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie. Deze toename impliceert dat een groter aandeel van de oorspronkelijke woonvarianten aan de nieuwe referentiewaarde zal voldoen.

Uit de verschillende deelonderzoeken en de gevoeligheidsanalyse volgt dus dat de drie hoofdtermen van dit onderzoek – typologie, geometrie en materialiteit – elk een aanzienlijke invloed hebben op de milieubelasting en bijgevolg op de ontwikkeling van een referentiewaarde. Zo dragen compacte typologieën bij tot het verlagen van de benchmark. Niet-compacte of grote geometrieën, daarentegen, zorgen voor een stijging van de referentiewaarde, terwijl hoge of lage materiaalimpacten eveneens de benchmark respectievelijk doet toenemen of dalen. Uiteindelijk kan echter, wegens gebrek aan beleid en door de afhankelijkheid van de typologie, geometrie en materialiteit, geen definitieve grenswaarde of milieupeil worden gedefinieerd.

Bibliografie

- Andersen, C. M. E., Garnow, A., Sørensen, C. G., Wittchen, A., Stranddorf, L. K., Hoxha, E., Rasmussen, F. N., & Birgisdottir, H. (2023). *Whole Life Carbon Impact of: 45 Timber Buildings*. (1 ed.) Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Vol. 2023 No. 10
- Aumann, A. (2019). *SIA 2040: Energy Efficiency Path, The Swiss benchmarking system according to the 2000- Watt-society: its goals and its effects* [Presentatieslides]. http://www.lcaforum.ch/portals/0/df71/DF71-05_Aumann.pdf
- Bracke, W., Delghust, M., Laverge, J., Alderweireldt, J., Leveneau, C., Pierard, F., Peeters, L., & Baeten, J. (2015). *Studie EPB-eisenpakket residentiële nieuwbouw: Een nieuw indicator voor de energie-efficiëntie van de gebouwschil en de algemene energieprestatie indicator op weg naar 2021*. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1662982456/EPB-eisen_-_EPB-eisenpakket_residenti%C3%ABle_nieuwbouw_Studie_kiluab.pdf
- Braune, A., Ekhvaia, L., & Quante, K. (2021). *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*. DGNB.
- CEN. (2012). NBN EN 15978 Duurzaamheid van constructies - Beroordeling van milieuprestaties van gebouwen - Rekenmethode. In *MyNBN*. Geraadpleegd op 28 februari 2024, van <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/429889?l=E>
- CEN. (2020a). NBN EN ISO 14040:2006/A1:2020 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework - Amendment 1. In *MyNBN*. Geraadpleegd op 5 maart 2024, van <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/583434?l=E>
- CEN. (2020b). NBN EN ISO 14044:2006/A2:2020 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines - Amendment 2. In *MyNBN*. Geraadpleegd op 5 maart 2024, van <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/583435?l=E>
- CEN. (2021). NBN ISO 21678:2021 Sustainability in buildings and civil engineering works - Indicators and benchmarks - Principles, requirements and guidelines. In *MyNBN*. Geraadpleegd op 28 februari 2024, van <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/429889?l=E>
- CEN. (2021a). NBN EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. In *MyNBN*. Geraadpleegd op 28 februari 2024, van <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/587831?l=E>

- Dascalaki, E., Argiropoulou, P., Balaras, C., Droutsas, P., & Kontogiannidis, S. (2020). Benchmarks for Embodied and Operational Energy Assessment of Hellenic Single-Family Houses. *Energies*, 13, 4384. <https://doi.org/10.3390/en13174384>
- Dimova, S., & Gervasio, H. (2018). *Environmental benchmarks for buildings: EFIRESources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design*. European Commission. <https://doi.org/10.2760/073513>
- Ecoinvent. (2024, 1 januari). *Introduction to the Database*. Geraadpleegd op 8 maart 2024, van <https://support.ecoinvent.org/introduction-to-the-database>
- Eurostat. (2023). *Housing in Europe - 2023 interactive edition*. Eurostat. Geraadpleegd op 14 februari 2024, van <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/housing-2023>
- Guldager Jensen, K. (Ed.), Birgisdottir, H. (Ed.), Guldager Jensen, K., Stokholm Poulsen, K., Lind, L., Østergaard Christensen, C., Skjeltom, O., Jayne Carruth, S., Knorr Jensen, K., Overgaard Canera, I., Manboudh, J., Birgisdottir, H., & Zimmermann, R. K. (2018). *Guide to Sustainable Building Certifications*. (1 ed.) Statens Byggeforskningsinstitut, SBI. <https://sbi.dk/Pages/Guide-to-sustainable-building-certifications.aspx>
- Häkkinen, T. (Ed.) (2012). Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings: Final report. VTT Technical Research Centre of Finland. *VTT Technology No. 72* <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2012/T72.pdf>
- Hill-Hansen, D., Vindæs, E., Nordvik, F., Bjørkskov, K. B. R., Buhl, K., Petrusson, K. D., Toftdahl Olsen, L. S. Hallundbæk Schlesinger, M., Søgaard, R., Lynge, S. & Maagaard, S. E. (2022). *Reduction Roadmap: Preconditions and Methodologies*. Version 2 - 27 September, 2022. www.reductionroadmap.dk.
- Hollberg, A., Lützkendorf, T., & Habert, G. (2019). Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process. *Building and Environment*, 153, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>
- Izaola, B., Akizu-Gardoki, O., & Oregi, X. (2023). Setting baselines of the embodied, operational and whole life carbon emissions of the average Spanish residential building. *Sustainable Production and Consumption*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.001>
- Janssen, A., Wastiels, L., & Delem, L. (2013). Levenscyclusanalyse of LCA. *Buildwise-artikel 2013/04.15*. https://www.buildwise.be/umbraco/Surface/PublicationItem/DownloadFile?file=31850%2Fnl%2Fprotected%2Fbuildwise_artonline_2013_4_nr15_levenscyclusanalyse_of_lca.pdf

Kernerman Dictionaries. (z.d.). Benchmark. In *Woorden.org*. Geraadpleegd op 11 februari 2024, van <https://www.woorden.org/woord/benchmark>

MilieuPrestatie Gebouwen - MPG. (2017, 1 juni). Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland. Geraadpleegd op 11 februari 2024, van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-en-regels-gebouwen/milieuprestatie-gebouwen-mpg>

Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2022). Development of environmental benchmarks for the Belgian residential building stock. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012077>

Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2023). Preliminary study on the use of Big Data for environmental benchmarks of residential buildings in Flanders. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1196(1), 012114. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012114>

Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2024). Life cycle environmental benchmarks for Flemish dwellings. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(1), 015005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad1bb7>

Özdemir, Ö., Hartmann, C., Hafner, A., König, H., & Lützkendorf, T. (2022). Next generation of life cycle related benchmarks for low carbon residential buildings in Germany. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012053>

Röck, M., Balouktsi, M., Saade, M., Nygaard Rasmussen, F., Hoxha, E., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Passer, A., & Lützkendorf, T. (2020). *Embodied GHG emissions of buildings - Critical reflection of benchmark comparison and in-depth analysis of drivers* (Vol. 588). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/3/032048>

Röck, M., Sørensen, A., Steinmann, J., Hvid Horup, L., Tozan, B., Le Den, X., & Birgisdottir, H. (2022). *Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings: #1 Facing the data challenge*. Rambøll. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6120522>

Servaes, R., Allacker, K., Debacker, W., Delem, L., De Nocker, L., De Troyer, F., Janssen, A., Peeters, K., Spirinckx, C., Van Dessel, J., Chung Lam, W., & Trigaux, D. (2021). *Environmental profile of buildings [update 2023]*. OVAM. <https://www.totem-building.be/>

Souza, H., Evangelista, P., Medeiros, D., Albertí, J., Fullana-i-Palmer, P., Boncz, M., Kiperstok, A., & Gonçalves, J. (2021). Functional unit influence on building life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01854-1>

- Stichting Nationale Milieudatabase. (2022). *Bepalingsmethode Milieuprestatie Bouwwerken: Berekeningswijze voor het bepalen van de milieuprestatie van bouwwerken gedurende hun gehele levensduur, gebaseerd op de EN 15804*.
- Tozan, B., Birgisdottir, H., Steinmann, J., Le Den, X., Röck, M., Hvid Horup, L., & Sørensen, A. (2022). *Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings: #4 Bridging the performance gap: A performance framework*. Rambøll. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6120874>
- Trigaux, D., Allacker, K., & Debacker, W. (2021). Environmental benchmarks for buildings: a critical literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01840-7>
- United Nations Environment Programme (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi.
- United Nations Environment Programme, & Yale Center for Ecosystems + Architecture (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>
- Van Der Veken, J., Creylman, J., Lenaerts, T., Kenniscentrum Energie, & Thomas More Kempen / KU Leuven. (2015). *Studie naar kostenoptimale niveaus van de minimumeisen inzake energieprestaties van gerenoveerde bestaande residentiële gebouwen*. https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1662987375/EPB-beleid_-_Kostenoptimale_EPB-eisen_voor_residenti%C3%A4le_gebouwen_Studie_renovatie_rgfnki.pdf
- Vieira, M. (2016, 4 juli). *Impact assessment in the PEF initiative*. PRé Sustainability. Geraadpleegd op 17 april 2024, van <https://pre-sustainability.com/articles/pef-series-impact-assessment-in-the-pef-approach/>
- Vlaams Energie- & Klimaatagentschap. (z.d.-a). *Compactheid*. EPB-pedia. Geraadpleegd op 12 januari 2024, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/geometrie/compactheid>
- Vlaams Energie- & Klimaatagentschap. (z.d.-b). *Bruikbare vloeroppervlakte*. EPB-pedia. Geraadpleegd op 4 mei 2024, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/geometrie/volume-en-oppervlaktes/bruikbare-vloeroppervlakte>
- Vlaams Energie- & Klimaatagentschap. (z.d.-c). *Verliesoppervlakten*. EPB-pedia. Geraadpleegd op 5 mei 2024, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/geometrie/volume-en-oppervlaktes/verliesoppervlakten>

- Vlaams Energie- & Klimaatagentschap. (z.d.-d). *Beschermd volume*. EPB-pedia. Geraadpleegd op 5 mei 2024, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/geometrie/volume-en-oppeervlaktes/beschermd-volume>
- Vlaams Energie- & Klimaatagentschap. (z.d.-e). *Vormefficiëntie*. EPB-pedia. Geraadpleegd op 5 mei 2024, van <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/geometrie/vormefficiëntie#principe>
- Vlaamse overheid. (z.d.). *Duurzaamheidsmeter Wijken*. Departement Omgeving. Geraadpleegd op 11 februari 2024, van <https://omgeving.vlaanderen.be/nl/ruimtelijk-beleid-en-planning/duurzaamheidsmeter-wijken>
- Vlaamse Regering. (2019). *Vlaamse klimaatstrategie 2050*. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/32555>
- W/E adviseurs. (2017). *Onderzoek ‘Principes en parameters Milieuprestatie Gebouwen (MPG)’*: *Op basis van ervaringen in 2012-2016* (W/E 9249). Stichting Nationale Milieudatabase.
- Wastiels, L., Delem, L., & Van Steenkiste, J. (2021). *TOTEM voorschrijven in overheidsopdrachten. Een praktische gids voor aanbestedende overheden*. OVAM - Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/44218>
- Wiik, M. K., Selvig, E., Fuglseth, M., Lausset, C., Resch, E., Andresen, I., Brattebø, H., & Hahn, U. (2020). *GHG emission requirements and benchmark values for Norwegian buildings*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(2), 022005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/2/022005>
- World Green Building Council. (2024). *Home – World Green Building Council*. World Green Building Council. Geraadpleegd op 25 februari 2024, van <https://worldgbc.org/>
- Zimmermann, R. K., Andersen, C. M. E., Kanafani, K., & Birgisdóttir, H. (2021). *Whole Life Carbon Assessment of 60 buildings: Possibilities to develop benchmark values for LCA of buildings*. Polyteknisk Boghandel og Forlag. BUILD Report No. 2021:12 <https://sbi.dk/Pages/Whole-Life-Carbon-Assessment-of-60-buildings.aspx>
- Zimmermann, R. K., Rasmussen, F. N., & Birgisdóttir, H. (2023). Challenges in benchmarking whole-life GHG emissions from renovation cases: Evidence from 23 real-life cases. *Energy and Buildings*, 301, 113639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113639>

Bijlagen

- A. Variaties geometrische parameters
- B. Opbouw gebouwelementen
- C. Milieu-impact gebouwelementen [kgCO₂]
- D. Aandeel gebouwelementen [kgCO₂/m²]
- E. Totale milieu-impact [kgCO₂]
- F. Normalisatie naar brutovloeroppervlakte [kgCO₂/m²BVO]
- G. Normalisatie naar vormefficiëntie [kgCO₂/vormefficiëntie]
- H. Gevoeligheidsanalyse [kgCO₂]

A. Variaties geometrische parameters

A.1 Rijwoning

A.1.1 Variaties op lengte, breedte en verdiepingshoogte

Zie tabel 5 op pagina 38

A.1.2 Variaties geometrische karakteristieken per gebouwvariant

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
RW1	106,67	343,75	181,11	1,90	1,31
RW2	150,67	481,25	253,55	1,90	1,17
RW3	216,67	687,5	362,21	1,90	1,04
RW4	126,67	406,25	199,97	2,03	1,33
RW5	178,67	568,75	279,96	2,03	1,19
RW6	256,67	812,5	399,94	2,03	1,05
RW7	156,67	500	228,71	2,19	1,33
RW8	220,67	700	320,20	2,19	1,19
RW9	316,67	1000	457,42	2,19	1,06
RW10	106,67	354,75	183,11	1,94	1,32
RW11	150,67	496,65	256,35	1,94	1,18
RW12	216,67	709,5	366,21	1,94	1,05
RW13	126,67	419,25	201,97	2,08	1,34
RW14	178,67	586,95	282,76	2,08	1,20
RW15	256,67	838,5	403,94	2,08	1,06
RW16	156,67	516	230,71	2,24	1,35
RW17	220,67	722,4	323,00	2,24	1,21
RW18	316,67	1032	461,42	2,24	1,07
RW19	106,67	365,75	185,11	1,98	1,34
RW20	150,67	512,05	259,15	1,98	1,19
RW21	216,67	731,5	370,21	1,98	1,06
RW22	126,67	432,25	203,97	2,12	1,36
RW23	178,67	605,15	285,56	2,12	1,21
RW24	256,67	864,5	407,94	2,12	1,08
RW25	156,67	532	232,71	2,29	1,36
RW26	220,67	744,8	325,80	2,29	1,22
RW27	316,67	1064	465,42	2,29	1,08
RW28	106,67	354,75	183,11	1,94	1,32
RW29	150,67	496,65	256,35	1,94	1,18
RW30	216,67	709,5	366,21	1,94	1,05
RW31	126,67	419,25	201,97	2,08	1,34
RW32	178,67	586,95	282,76	2,08	1,20
RW33	256,67	838,5	403,94	2,08	1,06
RW34	156,67	516	230,71	2,24	1,35
RW35	220,67	722,4	323,00	2,24	1,21
RW36	316,67	1032	461,42	2,24	1,07
RW37	106,67	365,75	185,11	1,98	1,34
RW38	150,67	512,05	259,15	1,98	1,19

RW39	216,67	731,5	370,21	1,98	1,06
RW40	126,67	432,25	203,97	2,12	1,36
RW41	178,67	605,15	285,56	2,12	1,21
RW42	256,67	864,5	407,94	2,12	1,08
RW43	156,67	532	232,71	2,29	1,36
RW44	220,67	744,8	325,80	2,29	1,22
RW45	316,67	1064	465,42	2,29	1,08
RW46	106,67	376,75	187,11	2,01	1,35
RW47	150,67	527,45	261,95	2,01	1,21
RW48	216,67	753,5	374,21	2,01	1,07
RW49	126,67	445,25	205,97	2,16	1,37
RW50	178,67	623,35	288,36	2,16	1,22
RW51	256,67	890,5	411,94	2,16	1,09
RW52	156,67	548	234,71	2,33	1,38
RW53	220,67	767,2	328,60	2,33	1,23
RW54	316,67	1096	469,42	2,33	1,10
RW55	106,67	365,75	185,11	1,98	1,34
RW56	150,67	512,05	259,15	1,98	1,19
RW57	216,67	731,5	370,21	1,98	1,06
RW58	126,67	432,25	203,97	2,12	1,36
RW59	178,67	605,15	285,56	2,12	1,21
RW60	256,67	864,5	407,94	2,12	1,08
RW61	156,67	532	232,71	2,29	1,36
RW62	220,67	744,8	325,80	2,29	1,22
RW63	316,67	1064	465,42	2,29	1,08
RW64	106,67	376,75	187,11	2,01	1,35
RW65	150,67	527,45	261,95	2,01	1,21
RW66	216,67	753,5	374,21	2,01	1,07
RW67	126,67	445,25	205,97	2,16	1,37
RW68	178,67	623,35	288,36	2,16	1,22
RW69	256,67	890,5	411,94	2,16	1,09
RW70	156,67	548	234,71	2,33	1,38
RW71	220,67	767,2	328,60	2,33	1,23
RW72	316,67	1096	469,42	2,33	1,10
RW73	106,67	387,75	189,11	2,05	1,36
RW74	150,67	542,85	264,75	2,05	1,22
RW75	216,67	775,5	378,21	2,05	1,08
RW76	126,67	458,25	207,97	2,20	1,38
RW77	178,67	641,55	291,16	2,20	1,24
RW78	256,67	916,5	415,94	2,20	1,10
RW79	156,67	564	236,71	2,38	1,39
RW80	220,67	789,6	331,40	2,38	1,25
RW81	316,67	1128	473,42	2,38	1,11

Tabel 21: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de rijwoningtypologie

A.2 Halfopen woning

A.2.1 Variaties op lengte, breedte en verdiepingshoogte

Breedte [m]	Lengte [m]	Verdiepingshoogte gelijkvloers [m]	Verdiepingshoogte eerste verdiep [m]
6	9	2,60	2,60
8	11	2,80	2,80
11	13	3	3

Tabel 22: Variaties op de geometrische parameters van de halfopen woningtypologie

A.2.2 Variaties geometrische karakteristieken per gebouwvariant

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
HO1	102,88	291,6	236,55	1,23	0,90
HO2	138,88	388,8	299,20	1,30	0,86
HO3	192,88	534,6	393,18	1,36	0,81
HO4	126,88	356,4	269,08	1,32	0,90
HO5	170,88	475,2	338,97	1,40	0,87
HO6	236,88	653,4	443,82	1,47	0,82
HO7	150,88	421,2	302,16	1,39	0,90
HO8	202,88	561,6	379,49	1,48	0,87
HO9	280,88	772,2	495,47	1,56	0,82
HO10	102,88	302,4	240,75	1,26	0,90
HO11	138,88	403,2	304,20	1,33	0,87
HO12	192,88	554,4	399,38	1,39	0,82
HO13	126,88	369,6	273,68	1,35	0,91
HO14	170,88	492,8	344,37	1,43	0,88
HO15	236,88	677,6	450,42	1,50	0,83
HO16	150,88	436,8	307,16	1,42	0,91
HO17	202,88	582,4	385,29	1,51	0,88
HO18	280,88	800,8	502,47	1,59	0,83
HO19	102,88	313,2	244,95	1,28	0,91
HO20	138,88	417,6	309,20	1,35	0,87
HO21	192,88	574,2	405,58	1,42	0,82
HO22	126,88	382,8	278,28	1,38	0,92
HO23	170,88	510,4	349,77	1,46	0,88
HO24	236,88	701,8	457,02	1,54	0,84
HO25	150,88	452,4	312,16	1,45	0,91
HO26	202,88	603,2	391,09	1,54	0,88
HO27	280,88	829,4	509,47	1,63	0,84
HO28	102,88	302,4	240,75	1,26	0,90
HO29	138,88	403,2	304,20	1,33	0,87
HO30	192,88	554,4	399,38	1,39	0,82
HO31	126,88	369,6	273,68	1,35	0,91
HO32	170,88	492,8	344,37	1,43	0,88
HO33	236,88	677,6	450,42	1,50	0,83
HO34	150,88	436,8	307,16	1,42	0,91

HO35	202,88	582,4	385,29	1,51	0,88
HO36	280,88	800,8	502,47	1,59	0,83
HO37	102,88	313,2	244,95	1,28	0,91
HO38	138,88	417,6	309,20	1,35	0,87
HO39	192,88	574,2	405,58	1,42	0,82
HO40	126,88	382,8	278,28	1,38	0,92
HO41	170,88	510,4	349,77	1,46	0,88
HO42	236,88	701,8	457,02	1,54	0,84
HO43	150,88	452,4	312,16	1,45	0,91
HO44	202,88	603,2	391,09	1,54	0,88
HO45	280,88	829,4	509,47	1,63	0,84
HO46	102,88	324	249,15	1,30	0,92
HO47	138,88	432	314,20	1,37	0,88
HO48	192,88	594	411,78	1,44	0,83
HO49	126,88	396	282,88	1,40	0,92
HO50	170,88	528	355,17	1,49	0,89
HO51	236,88	726	463,62	1,57	0,84
HO52	150,88	468	317,16	1,48	0,92
HO53	202,88	624	396,89	1,57	0,89
HO54	280,88	858	516,47	1,66	0,85
HO55	102,88	313,2	244,95	1,28	0,91
HO56	138,88	417,6	309,20	1,35	0,87
HO57	192,88	574,2	405,58	1,42	0,82
HO58	126,88	382,8	278,28	1,38	0,92
HO59	170,88	510,4	349,77	1,46	0,88
HO60	236,88	701,8	457,02	1,54	0,84
HO61	150,88	452,4	312,16	1,45	0,91
HO62	202,88	603,2	391,09	1,54	0,88
HO63	280,88	829,4	509,47	1,63	0,84
HO64	102,88	324	249,15	1,30	0,92
HO65	138,88	432	314,20	1,37	0,88
HO66	192,88	594	411,78	1,44	0,83
HO67	126,88	396	282,88	1,40	0,92
HO68	170,88	528	355,17	1,49	0,89
HO69	236,88	726	463,62	1,57	0,84
HO70	150,88	468	317,16	1,48	0,92
HO71	202,88	624	396,89	1,57	0,89
HO72	280,88	858	516,47	1,66	0,85
HO73	102,88	334,8	253,35	1,32	0,92
HO74	138,88	446,4	319,20	1,40	0,88
HO75	192,88	613,8	417,98	1,47	0,84
HO76	126,88	409,2	287,48	1,42	0,93
HO77	170,88	545,6	360,57	1,51	0,90
HO78	236,88	750,2	470,22	1,60	0,85
HO79	150,88	483,6	322,16	1,50	0,92
HO80	202,88	644,8	402,69	1,60	0,90
HO81	280,88	886,6	523,47	1,69	0,85

Tabel 23: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de halfopen woningtypologie

A.3 Vrijstaande woning

A.3.1 Variaties op lengte, breedte en verdiepingshoogte

Breedte [m]	Lengte [m]	Verdiepingshoogte gelijkvloers [m]	Verdiepingshoogte eerste verdiep [m]
8	8	2,60	2,60
11	13	2,80	2,80
14	15	3	3

Tabel 24: Variaties op de geometrische parameters van de vrijstaande woningtypologie

A.3.2 Variaties geometrische karakteristieken per gebouwvariant

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
VS1	123,584	345,6	336,72	1,03	0,71
VS2	169,928	475,2	414,93	1,15	0,71
VS3	216,272	604,8	495,50	1,22	0,70
VS4	200,824	561,6	481,40	1,17	0,68
VS5	276,133	772,2	584,31	1,32	0,70
VS6	351,442	982,8	691,06	1,42	0,69
VS7	231,72	648	539,27	1,20	0,67
VS8	318,615	891	652,07	1,37	0,69
VS9	405,51	1134	769,29	1,47	0,68
VS10	123,584	358,4	344,52	1,04	0,71
VS11	169,928	492,8	424,12	1,16	0,71
VS12	216,272	627,2	506,08	1,24	0,70
VS13	200,824	582,4	491,65	1,18	0,69
VS14	276,133	800,8	595,95	1,34	0,70
VS15	351,442	1019,2	704,09	1,45	0,70
VS16	231,72	672	550,50	1,22	0,67
VS17	318,615	924	664,69	1,39	0,69
VS18	405,51	1176	783,30	1,50	0,69
VS19	123,584	371,2	352,31	1,05	0,71
VS20	169,928	510,4	433,31	1,18	0,71
VS21	216,272	649,6	516,66	1,26	0,70
VS22	200,824	603,2	501,90	1,20	0,69
VS23	276,133	829,4	607,60	1,37	0,70
VS24	351,442	1055,6	717,13	1,47	0,70
VS25	231,72	696	561,73	1,24	0,68
VS26	318,615	957	677,31	1,41	0,69
VS27	405,51	1218	797,31	1,53	0,69
VS28	123,584	358,4	338,54	1,06	0,72
VS29	169,928	492,8	417,43	1,18	0,72
VS30	216,272	627,2	498,67	1,26	0,71
VS31	200,824	582,4	483,21	1,21	0,70
VS32	276,133	800,8	586,81	1,36	0,71
VS33	351,442	1019,2	694,23	1,47	0,71
VS34	231,72	672	541,08	1,24	0,69

VS35	318,615	924	654,56	1,41	0,70
VS36	405,51	1176	772,46	1,52	0,70
VS37	123,584	371,2	346,33	1,07	0,72
VS38	169,928	510,4	426,61	1,20	0,72
VS39	216,272	649,6	509,25	1,28	0,71
VS40	200,824	603,2	493,46	1,22	0,70
VS41	276,133	829,4	598,45	1,39	0,71
VS42	351,442	1055,6	707,27	1,49	0,71
VS43	231,72	696	552,32	1,26	0,69
VS44	318,615	957	667,18	1,43	0,70
VS45	405,51	1218	786,47	1,55	0,70
VS46	123,584	384	354,13	1,08	0,72
VS47	169,928	528	435,80	1,21	0,72
VS48	216,272	672	519,83	1,29	0,71
VS49	200,824	624	503,71	1,24	0,70
VS50	276,133	858	610,09	1,41	0,72
VS51	351,442	1092	720,30	1,52	0,71
VS52	231,72	720	563,55	1,28	0,69
VS53	318,615	990	679,81	1,46	0,71
VS54	405,51	1260	800,49	1,57	0,70
VS55	123,584	371,2	340,35	1,09	0,73
VS56	169,928	510,4	419,92	1,22	0,74
VS57	216,272	649,6	501,85	1,29	0,72
VS58	200,824	603,2	485,03	1,24	0,71
VS59	276,133	829,4	589,30	1,41	0,72
VS60	351,442	1055,6	697,41	1,51	0,72
VS61	231,72	696	542,90	1,28	0,70
VS62	318,615	957	657,05	1,46	0,71
VS63	405,51	1218	775,63	1,57	0,71
VS64	123,584	384	348,15	1,10	0,73
VS65	169,928	528	429,11	1,23	0,74
VS66	216,272	672	512,43	1,31	0,72
VS67	200,824	624	495,28	1,26	0,71
VS68	276,133	858	600,94	1,43	0,73
VS69	351,442	1092	710,44	1,54	0,72
VS70	231,72	720	554,13	1,30	0,70
VS71	318,615	990	669,68	1,48	0,72
VS72	405,51	1260	789,65	1,60	0,71
VS73	123,584	396,8	355,94	1,11	0,73
VS74	169,928	545,6	438,29	1,24	0,74
VS75	216,272	694,4	523,00	1,33	0,73
VS76	200,824	644,8	505,53	1,28	0,71
VS77	276,133	886,6	612,58	1,45	0,73
VS78	351,442	1128,4	723,47	1,56	0,72
VS79	231,72	744	565,36	1,32	0,70
VS80	318,615	1023	682,30	1,50	0,72
VS81	405,51	1302	803,66	1,62	0,72

Tabel 25: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de vrijstaande woningtypologie

A.4 Appartementen

A.4.1 Variaties op lengte, breedte en verdiepingshoogte

Breedte [m]	Lengte [m]	Verdiepingshoogte [m]
6	10	2,60
9	12	2,80
11	15	3

Tabel 26: Variaties op de geometrische parameters van de appartementstypologie

A.4.2 Variaties geometrische karakteristieken per gebouwvariant

Dak-hoek appartement

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	53	180,2	127,80	1,41	1,21
APP2	83	282,2	178,20	1,58	1,17
APP3	103	350,2	211,80	1,65	1,13
APP4	65	221	146,60	1,51	1,21
APP5	101	343,4	203,00	1,69	1,17
APP6	125	425	240,60	1,77	1,14
APP7	71	241,4	156,00	1,55	1,20
APP8	110	374	215,40	1,74	1,17
APP9	136	462,4	255,00	1,81	1,13
APP10	53	190,8	132,20	1,44	1,21
APP11	83	298,8	183,80	1,63	1,18
APP12	103	370,8	218,20	1,70	1,14
APP13	65	234	151,40	1,55	1,21
APP14	101	363,6	209,00	1,74	1,18
APP15	125	450	247,40	1,82	1,15
APP16	71	255,6	161,00	1,59	1,21
APP17	110	396	221,60	1,79	1,18
APP18	136	489,6	262,00	1,87	1,15
APP19	53	201,4	136,60	1,47	1,22
APP20	83	315,4	189,40	1,67	1,18
APP21	103	391,4	224,60	1,74	1,15
APP22	65	247	156,20	1,58	1,22
APP23	101	383,8	215,00	1,79	1,19
APP24	125	475	254,20	1,87	1,16
APP25	71	269,8	166,00	1,63	1,22
APP26	110	418	227,80	1,83	1,19
APP27	136	516,8	269,00	1,92	1,16

Tabel 27: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de dak-hoek appartementstypologie

Dak-ingesloten appartement

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	53	180,2	93,8	1,92	1,64
APP2	83	282,2	144,2	1,96	1,44
APP3	103	350,2	177,8	1,97	1,35
APP4	65	221	105,8	2,09	1,67
APP5	101	343,4	162,2	2,12	1,46
APP6	125	425	199,8	2,13	1,37
APP7	71	241,4	111,8	2,16	1,68
APP8	110	374	171,2	2,18	1,47
APP9	136	462,4	210,8	2,19	1,37
APP10	53	190,8	96,2	1,98	1,67
APP11	83	298,8	147,8	2,02	1,46
APP12	103	370,8	182,2	2,04	1,37
APP13	65	234	108,2	2,16	1,70
APP14	101	363,6	165,8	2,19	1,49
APP15	125	450	204,2	2,20	1,39
APP16	71	255,6	114,2	2,24	1,71
APP17	110	396	174,8	2,27	1,49
APP18	136	489,6	215,2	2,28	1,40
APP19	53	201,4	98,6	2,04	1,69
APP20	83	315,4	151,4	2,08	1,48
APP21	103	391,4	186,6	2,10	1,39
APP22	65	247	110,6	2,23	1,72
APP23	101	383,8	169,4	2,27	1,51
APP24	125	475	208,6	2,28	1,41
APP25	71	269,8	116,6	2,31	1,73
APP26	110	418	178,4	2,34	1,52
APP27	136	516,8	219,6	2,35	1,42

Tabel 28: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de dak-ingesloten appartementstypologie

Verdiepings-hoek appartement

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	53	159	66	2,41	2,15
APP2	83	249	84	2,96	2,28
APP3	103	309	96	3,22	2,30
APP4	65	195	72	2,71	2,26
APP5	101	303	90	3,37	2,42
APP6	125	375	102	3,68	2,47
APP7	71	213	75	2,84	2,30
APP8	110	330	93	3,55	2,48
APP9	136	408	105	3,89	2,53
APP10	53	169,6	70,4	2,41	2,10
APP11	83	265,6	89,6	2,96	2,23
APP12	103	329,6	102,4	3,22	2,25
APP13	65	208	76,8	2,71	2,21
APP14	101	323,2	96	3,37	2,37
APP15	125	400	108,8	3,68	2,41
APP16	71	227,2	80	2,84	2,25
APP17	110	352	99,2	3,55	2,43
APP18	136	435,2	112	3,89	2,48
APP19	53	180,2	74,8	2,41	2,06
APP20	83	282,2	95,2	2,96	2,19
APP21	103	350,2	108,8	3,22	2,21
APP22	65	221	81,6	2,71	2,17
APP23	101	343,4	102	3,37	2,32
APP24	125	425	115,6	3,68	2,36
APP25	71	241,4	85	2,84	2,21
APP26	110	374	105,4	3,55	2,38
APP27	136	462,4	119	3,89	2,43

Tabel 29: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de verdiepings-hoek appartementstypologie

Verdiepings-ingesloten appartement

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	53	159	36	4,42	3,94
APP2	83	249	54	4,61	3,54
APP3	103	309	66	4,68	3,35
APP4	65	195	36	5,42	4,52
APP5	101	303	54	5,61	4,04
APP6	125	375	66	5,68	3,81
APP7	71	213	36	5,92	4,79
APP8	110	330	54	6,11	4,28
APP9	136	408	66	6,18	4,03
APP10	53	169,6	38,4	4,42	3,86
APP11	83	265,6	57,6	4,61	3,47
APP12	103	329,6	70,4	4,68	3,28
APP13	65	208	38,4	5,42	4,42
APP14	101	323,2	57,6	5,61	3,95
APP15	125	400	70,4	5,68	3,73
APP16	71	227,2	38,4	5,92	4,69
APP17	110	352	57,6	6,11	4,19
APP18	136	435,2	70,4	6,18	3,94
APP19	53	180,2	40,8	4,42	3,78
APP20	83	282,2	61,2	4,61	3,40
APP21	103	350,2	74,8	4,68	3,21
APP22	65	221	40,8	5,42	4,33
APP23	101	343,4	61,2	5,61	3,87
APP24	125	425	74,8	5,68	3,65
APP25	71	241,4	40,8	5,92	4,60
APP26	110	374	61,2	6,11	4,10
APP27	136	462,4	74,8	6,18	3,87

Tabel 30: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de verdiepings-ingesloten appartementstypologie

Gelijkvloerse-hoek appartement

Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	48	144	112,02	1,29	1,19
APP2	78	234	159,03	1,47	1,15
APP3	98	294	190,37	1,54	1,12
APP4	60	180	130,02	1,38	1,19
APP5	96	288	183,03	1,57	1,15
APP6	120	360	218,37	1,65	1,12
APP7	66	198	139,02	1,42	1,18
APP8	105	315	195,03	1,62	1,15
APP9	131	393	232,37	1,69	1,12
APP10	48	153,6	116,29	1,32	1,19
APP11	78	249,6	164,43	1,52	1,17
APP12	98	313,6	196,53	1,60	1,14
APP13	60	192	134,69	1,43	1,19
APP14	96	307,2	188,83	1,63	1,17
APP15	120	384	224,93	1,71	1,14
APP16	66	211,2	143,89	1,47	1,19
APP17	105	336	201,03	1,67	1,16
APP18	131	419,2	239,13	1,75	1,13
APP19	48	163,2	120,56	1,35	1,20
APP20	78	265,2	169,83	1,56	1,18
APP21	98	333,2	202,69	1,64	1,15
APP22	60	204	139,36	1,46	1,20
APP23	96	326,4	194,63	1,68	1,18
APP24	120	408	231,49	1,76	1,15
APP25	66	224,4	148,76	1,51	1,20
APP26	105	357	207,03	1,72	1,18
APP27	131	445,4	245,89	1,81	1,15

Tabel 31: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de gelijkvloerse-hoek appartementstypologie

Gelijkvloerse-ingesloten appartement

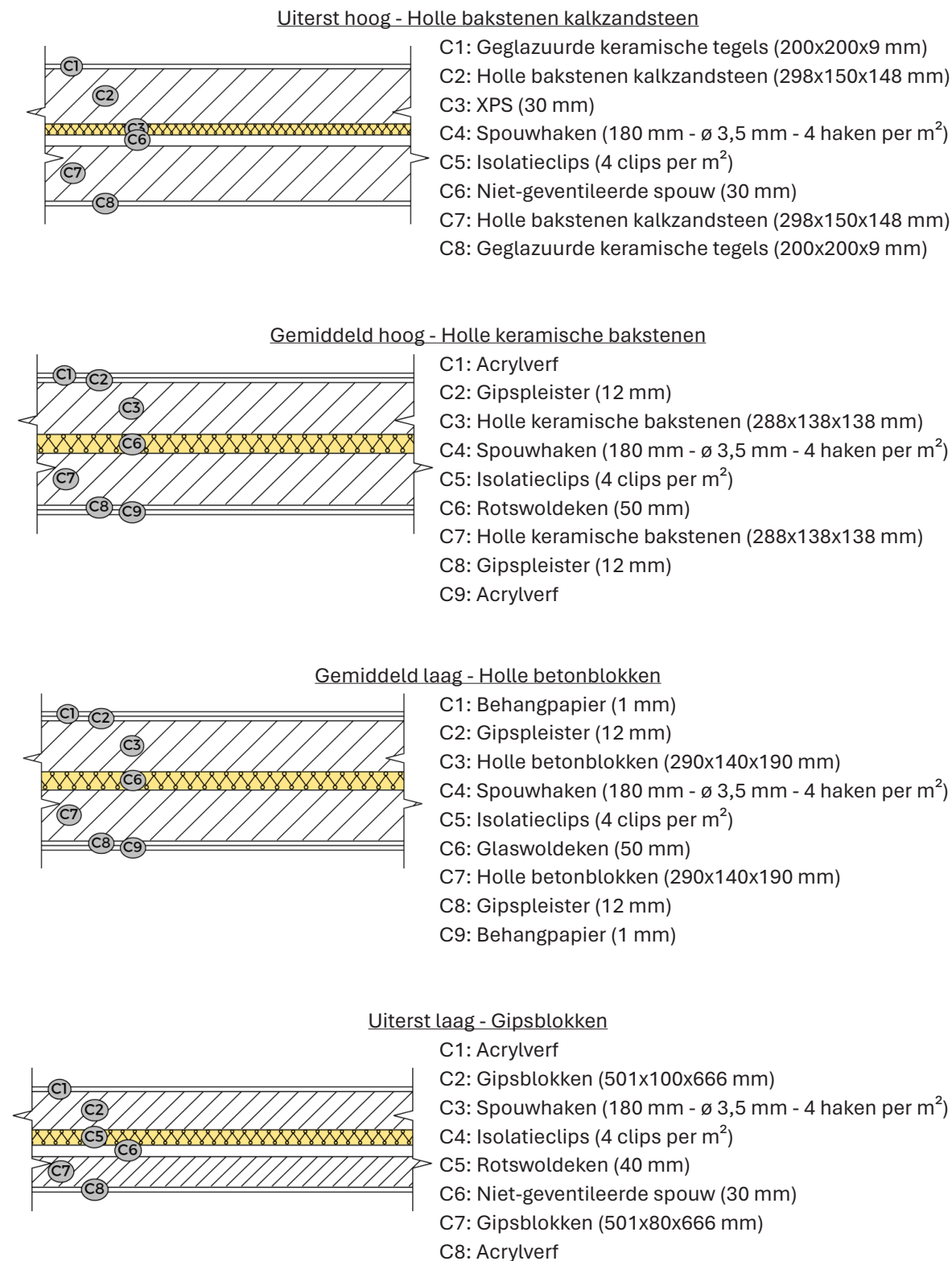
Woning	BVO [m ²]	Volume [m ³]	Verliesoppervlakte [m ²]	Compactheid [m]	Vormefficiëntie [-]
APP1	48	144	82,02	1,76	1,62
APP2	78	234	129,03	1,81	1,42
APP3	98	294	160,37	1,83	1,33
APP4	60	180	94,02	1,91	1,64
APP5	96	288	147,03	1,96	1,43
APP6	120	360	182,37	1,97	1,34
APP7	66	198	100,02	1,98	1,64
APP8	105	315	156,03	2,02	1,43
APP9	131	393	193,37	2,03	1,34
APP10	48	153,6	84,29	1,82	1,65
APP11	78	249,6	132,43	1,88	1,45
APP12	98	313,6	164,53	1,91	1,36
APP13	60	192	96,29	1,99	1,67
APP14	96	307,2	150,43	2,04	1,46
APP15	120	384	186,53	2,06	1,37
APP16	66	211,2	102,29	2,06	1,68
APP17	105	336	159,43	2,11	1,47
APP18	131	419,2	197,53	2,12	1,37
APP19	48	163,2	86,56	1,89	1,67
APP20	78	265,2	135,83	1,95	1,47
APP21	98	333,2	168,69	1,98	1,38
APP22	60	204	98,56	2,07	1,70
APP23	96	326,4	153,83	2,12	1,49
APP24	120	408	190,69	2,14	1,40
APP25	66	224,4	104,56	2,15	1,71
APP26	105	357	162,83	2,19	1,49
APP27	131	445,4	201,69	2,21	1,40

Tabel 32: Geometrische karakteristieken per gebouwvariant van de gelijkvloerse-ingesloten appartementstypologie

B. Opbouw gebouwelementen

B.1 Massiefbouw

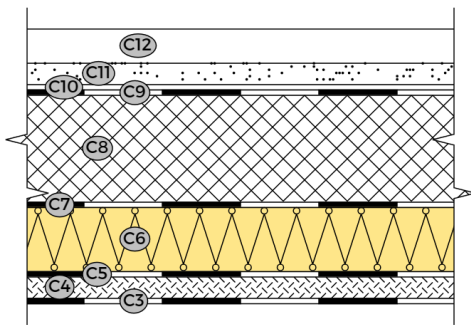
B.1.1 Gemene muur



Figuur 52: Opbouw gemene muur in massiefbouw (Bron: TOTEM)

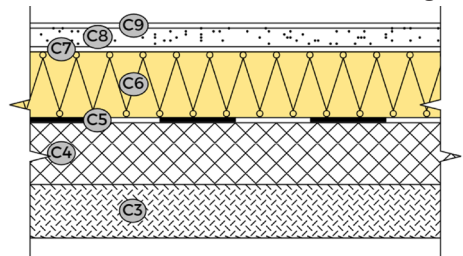
B.1.2 Vloer op volle grond

Uiterst hoog - Ter plaatse gestort gewapend beton



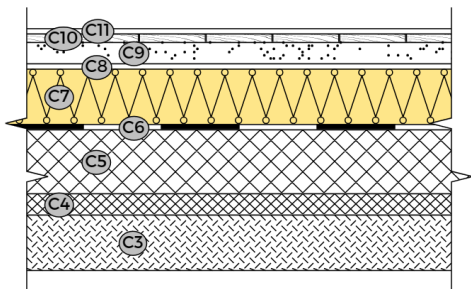
- C1: Uitgravingsproces - grond (0,58 m³)
- C2: Egalisatieproces - grond (m²)
- C3: PP-folie (0,8 mm)
- C4: Gecompacteerd zand (0,05 m³)
- C5: PP-folie (0,8 mm)
- C6: EPS (150 mm)
- C7: PE-folie (0,2 mm)
- C8: Ter plaatse gewapend beton (250 mm)
- C9: PE-folie (0,2 mm)
- C10: Versterkingsstaal (50x50 ø 2 mm)
- C11: Dekvloer - geëxpandeerde perlietkorrels (50 mm)
- C12: Granieten tegels (400x400x25 mm)

Gemiddeld hoog - Ter plaatse gestort gewapend beton



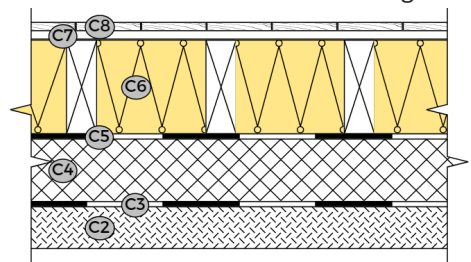
- C1: Uitgravingsproces - grond (0,3 m³)
- C2: Egalisatieproces - grond (m²)
- C3: Gecompacteerd zand (0,13 m³)
- C4: Ter plaatse gestort gewapend beton (150 mm)
- C5: PE-folie (0,2 mm)
- C6: PUR (160 mm)
- C7: Versterkingsstaal (50x50 ø 2 mm)
- C8: Anhydrietbindmiddel (45 mm)
- C9: Geglazuurde keramische tegels (300x300x10 mm)

Gemiddeld laag - Ter plaatse gestort gewapend beton



- C1: Uitgravingsproces - grond (0,3 m³)
- C2: Egalisatieproces - grond (m²)
- C3: Gecompacteerd zand (50 mm)
- C4: Zuiverheidsbeton (50 mm)
- C5: Ter plaatse gestort gewapend beton (150 mm)
- C6: PE-folie (0,2 mm)
- C7: PUR (130 mm)
- C8: Versterkingsstaal (50x50 c)
- C9: Dekvloer - cement (50 mm)
- C10: Parket (22 mm)
- C11: Impregneerwerk

Uiterst laag - Ter plaatse gestort gewapend beton

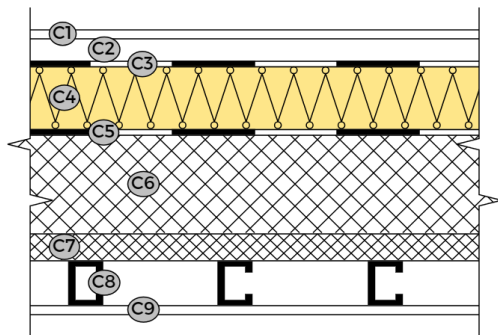


- C1: Egalisatieproces - grond (m²)
- C2: Gecompacteerd zand (0,1 m³)
- C3: PE-folie (0,2 mm)
- C4: Ter plaatse gestort gewapend beton (150 mm)
- C5: PE-folie (0,2 mm)
- C6: Naaldhout + cellulosevlokken (225 mm)
- C7: OSB (22 mm)
- C8: Parket (22 mm)

Figuur 53: Opbouw vloer op volle grond in massiefbouw (Bron: TOTEM)

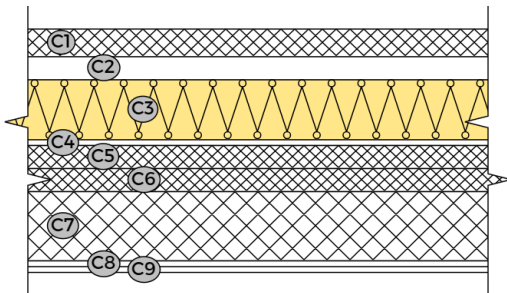
B.1.3 Plat dak

Uiterst hoog - Lichtgewicht betonnen potten



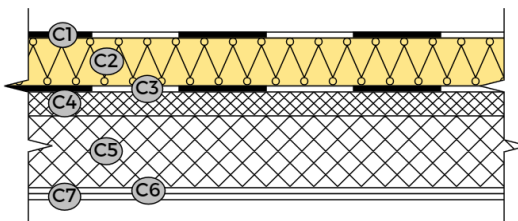
- C1: Geglazuurde keramische tegels (600x600x20 mm)
- C2: Tegelsdragers (50 mm - h.o.h. 600 mm)
- C3: Polymeerbitumen (7 mm)
- C4: Rotswol - glasvliesplaat (140 mm)
- C5: Bitumen - glasvezelversterkt (3 mm)
- C6: Ter plaatse gestort gewapend beton (220 mm)
- C7: Lichtgewicht betonnen potten (60 mm)
- C8: Gegalvaniseerd staal (tot 100 mm)
- C9: Rotswolplaat (20 mm)

Gemiddeld hoog - Voorgespannen betonnen welfsels



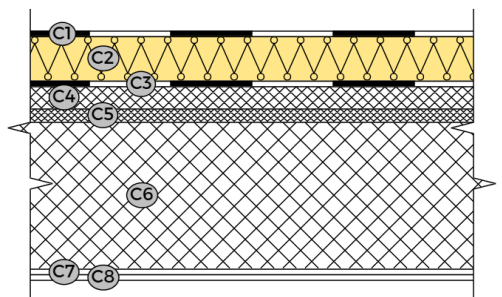
- C1: Harde betonnen tegels (500x500x60 mm)
- C2: Tegelsdragers (50 mm - h.o.h. 500 mm)
- C3: XPS (130 mm)
- C4: PUR-hars (2 mm)
- C5: Mager beton (gemiddeld 50 mm)
- C6: Voorgespannen betonnen welfsels (50 mm)
- C7: Voorgespannen betonnen welfsels (150 mm)
- C8: Gipspleister (12 mm)
- C9: Acrylverf

Gemiddeld laag - Ter plaatse gestort gewapend beton



- C1: EPDM (1,2 mm)
- C2: PUR - gebitumeerd glasvlies (100 mm)
- C3: Bitumen - glasvezelversterkt (3 mm)
- C4: Mager beton (gemiddeld 50 mm)
- C5: Ter plaatse gestort gewapend beton (150 mm)
- C6: Gipspleister (12 mm)
- C7: Acrylverf

Uiterst laag - Voorgespannen betonnen TT-plaat

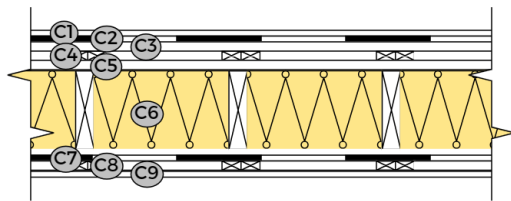


- C1: EPDM (1,2 mm)
- C2: PUR - gebitumeerd glasvlies (100 mm)
- C3: Bitumen - glasvezelversterkt (3 mm)
- C4: Mager beton (gemiddeld 50 mm)
- C5: Ter plaatse gestort beton (30 mm)
- C6: Voorgespannen betonnen TT-plaat
- C7: Gipspleister (12 mm)
- C8: Acrylverf

Figuur 54: Opbouw plat dak in massiefbouw (Bron: TOTEM)

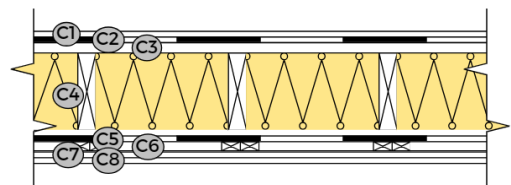
B.1.4 Hellend dak

Uiterst hoog - Hollandse spanten (naaldhout)



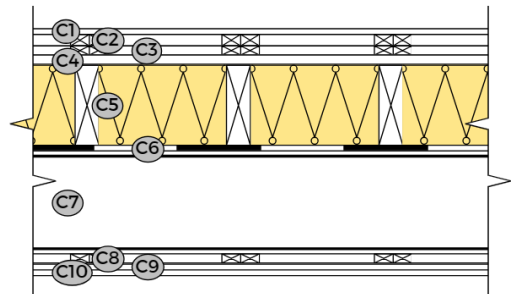
- C1: Bitumen shingles (100x336x3 mm)
- C2: Bitumen (0,5 mm)
- C3: Multiplexplaat (22 mm)
- C4: Naaldhouten latten (30x20 mm - c.t.c. 400 mm)
- C5: Gebitumineerde houtvezelplaat (22mm)
- C6: Naaldhout (172 mm) + schapenwol (170 mm) + niet-geventileerde luchtsouw (2 mm)
- C7: LDPE (0,22 mm)
- C8: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 45 mm)
- C9: PVC panelen (5 mm)

Gemiddeld hoog - Hollandse spanten (naaldhout)



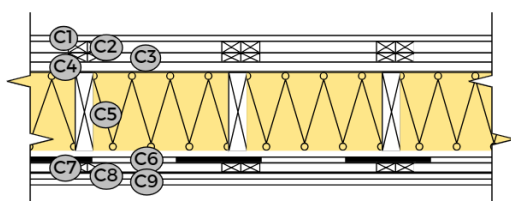
- C1: Zink (0,8 mm)
- C2: PE-noppenfolie (0,6 mm)
- C3: Naaldhouten plaat (24 mm)
- C4: Naaldhout (172 mm) + rotswoldeken (170 mm) + niet-geventileerde luchtsouw (2 mm)
- C5: LDPE (0,22 mm)
- C6: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 450 mm)
- C7: Gipspleister (12,5 mm)
- C8: Acrylverf

Gemiddeld laag - Naaldhouten gordingen



- C1: Lei (400x200x3 mm)
- C2: Naaldhouten latten (36x27 mm - h.o.h. 300 mm)
- C3: Naaldhouten latten (30x20 - c.t.c. 400 mm)
- C4: Gebitumineerde houtvezelplaat (22 mm)
- C5: Naaldhout (63x175 mm - h.o.h. 400 mm) + rotswoldeken (175 mm)
- C6: LDPE (0,22 mm)
- C7: Naaldhouten balken (75x225 mm - h.o.h. 1200 mm)
- C8: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 450 mm)
- C9: Gipspleister (12,5 mm)
- C10: Acrylverf

Uiterst laag - Hollandse spanten (naaldhout)



- C1: Beton (380x230 mm)
- C2: Naaldhouten latten (40x26 mm - h.o.h. 300 mm)
- C3: Naaldhouten latten (30x20 mm - c.t.c. 400 mm)
- C4: Houtvezelplaat (22 mm)
- C5: Naaldhout (172 mm) + rotswoldeken (170 mm) + niet-geventileerde luchtsouw (2 mm)
- C6: LDPE (0,22 mm)
- C7: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 450 mm)
- C8: Gipspleister (12,5 mm)
- C9: Acrylverf

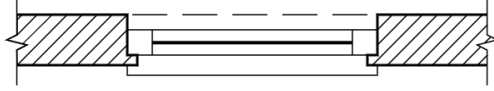
Figuur 55: Opbouw hellend dak in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.1.5 Raamopeningen

Uiterst hoog - Aluminium dubbele beglazing

C1: Aluminium profiel ($U_f = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$)

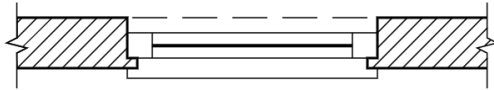
C2: Dubbele beglazing - argonvulling
(24 mm - $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Gemiddeld hoog - Hardhout dubbele beglazing

C1: Hardhouten profiel ($U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

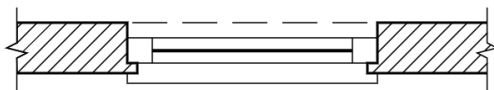
C2: Dubbele beglazing - argonvulling
(24 mm - $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Gemiddeld laag - Tropisch hardhout driedubbele beglazing

C1: Tropisch hardhouten profiel ($U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

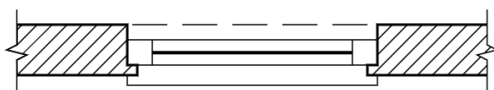
C2: Driedubbele beglazing (36 mm - $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Uiterst laag - kurk driedubbele beglazing

C1: Kurk profiel ($U_f = 0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$)

C2: Driedubbele beglazing (36 mm - $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

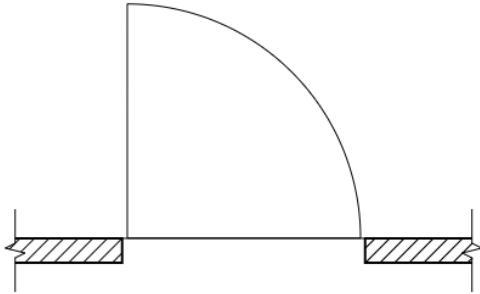


Figuur 56: Opbouw raamopeningen in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.1.6 Buitendeuren en garagepoort

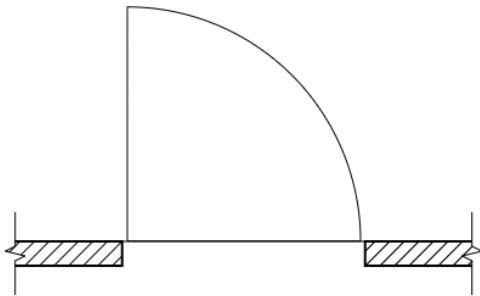
Uiterst en gemiddeld hoog - Staal-hout-aluminium

C1: Paneel staal-hout-aluminium (900x2050 mm)



Gemiddeld en uiterst laag - Staal-hout-aluminium-glas

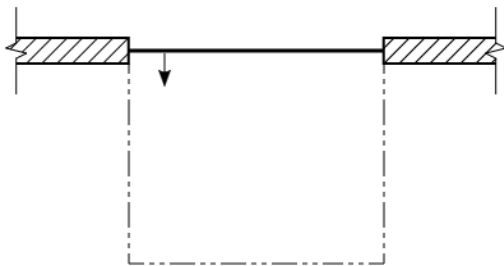
C1: Paneel staal-hout-aluminium (62%) - beglazing (38%)
(900x2050 mm)



Alle subcategorieën - Aluminium-PUR

C1: Profiel aluminium (70 mm)

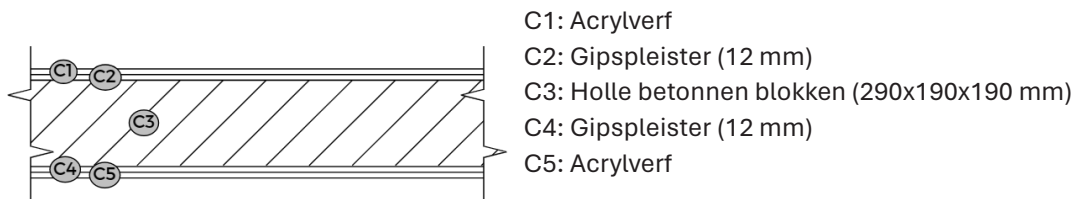
C2: Paneel aluminium-PUR (2500x2300 mm - d = 43 mm)



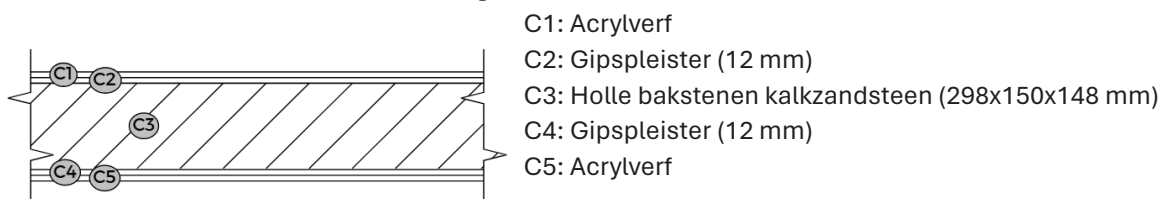
Figuur 57: Opbouw buitendeuren en garagepoort in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.1.7 Dragende wanden

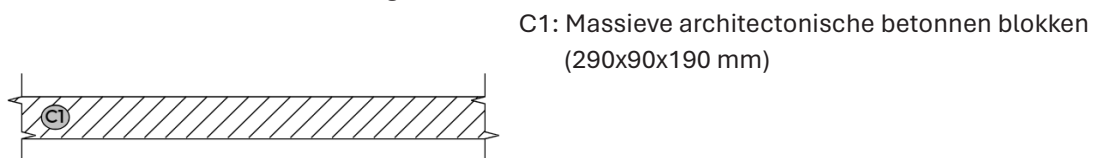
Uiterst hoog - Holle betonnen blokken



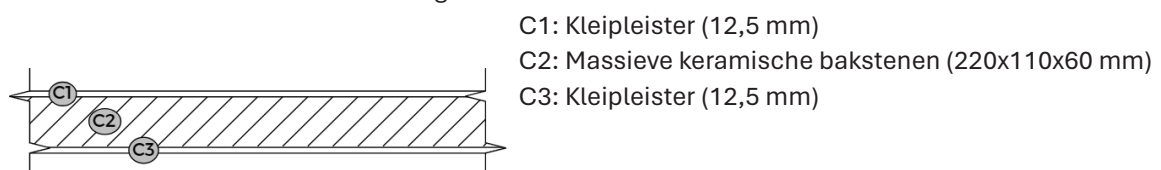
Gemiddeld hoog - Holle bakstenen kalkzandsteen



Gemiddeld laag - Massieve architectonische betonnen blokken



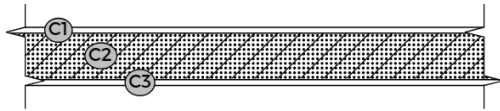
Uiterst laag - Massieve keramische bakstenen



Figuur 58: Opbouwen dragende wanden in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.1.8 Niet-dragende wanden

Uiterst hoog - Blokken cellenbeton

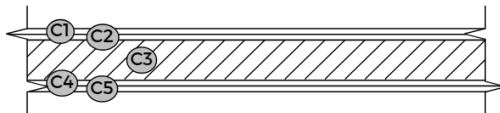


C1: Geglazuurde keramische tegels (200x200x9 mm)

C2: Cellenbeton (600x100x250 mm)

C3: Geglazuurde keramische tegels (200x200x9 mm)

Gemiddeld hoog - Holle keramische bakstenen



C1: Acrylverf

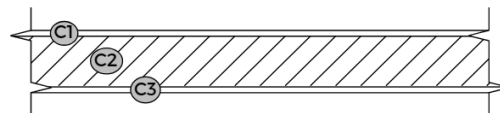
C2: Gipspleister (12 mm)

C3: Holle keramische bakstenen (288x88x188 mm)

C4: Gipspleister (12 mm)

C5: Acrylverf

Gemiddeld laag - Massieve keramische bakstenen

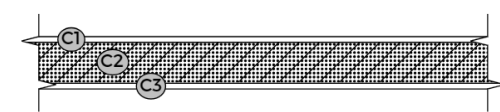


C1: Kleipleister (12,5 mm)

C2: Massieve keramische bakstenen (220x110x60 mm)

C3: Kleipleister (12,5 mm)

Uiterst laag - Kalkhennepblokken



C1: Kleipleister (12,5 mm)

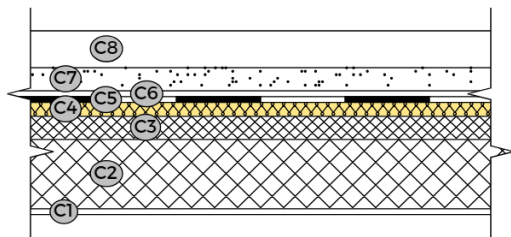
C2: Kalkhennepblokken (600x90x300 mm)

C3: Kleipleister (12,5 mm)

Figuur 59: Opbouw niet-dragende wanden in massiefbouw (Bron: TOTEM)

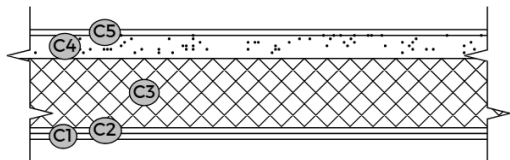
B.1.9 Interne vloeren

Uiterst hoog - Voorgespannen betonnen welfsels



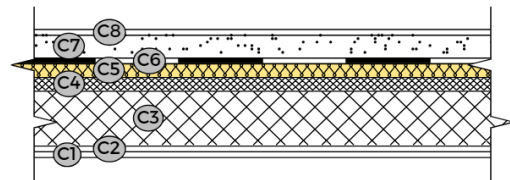
- C1: Leempleister (12 mm)
- C2: Voorgespannen betonnen welfsels (150 mm)
- C3: Ter plaatse gestort gewapend beton (50 mm)
- C4: Rotswol (30 mm)
- C5: PE-folie (0,2 mm)
- C6: Versterkingsstaal (50x50 $\varnothing$ 2 mm)
- C7: Dekvloer - cement (50 mm)
- C8: Granieten tegels (400x400x25 mm)

Gemiddeld hoog - Ter plaatse gestort gewapend beton



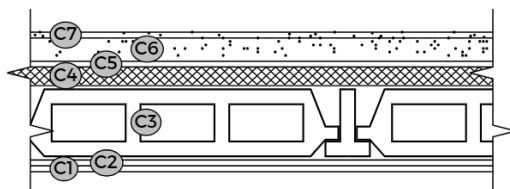
- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12 mm)
- C3: Ter plaatse gestort gewapend beton (150 mm)
- C4: Dekvloer - cement (50 mm)
- C5: Geglazuurde keramische tegels (300x300x10 mm)

Gemiddeld laag - Voorgespannen betonnen welfsels



- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12 mm)
- C3: Voorgespannen betonnen welfsels (120 mm)
- C4: Ter plaatse gestort beton (30 mm)
- C5: Rotswol (30 mm)
- C6: LDPE (0,22 mm)
- C7: Dekvloer - cement (50 mm)
- C8: Geglazuurde keramische tegels (300x300x10 mm)

Uiterst laag - Voorgespannen betonnen potten en balken



- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12 mm)
- C3: Voorgespannen betonnen potten en balken (160 mm)
- C4: Ter plaatse gestort gewapend beton (40 mm)
- C5: Versterkingsstaal (50x50 $\varnothing$ 2 mm)
- C6: LDPE (0,22 mm)
- C7: Dekvloer - cement (50 mm)
- C8: Kurken tegels (4 mm)

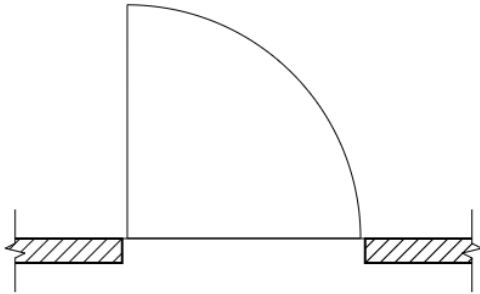
Figuur 60: Opbouwen interne vloeren in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.1.10 Binnendeuren

Uiterst hoog - Eik

C1: Profiel eik (900x2050 mm)

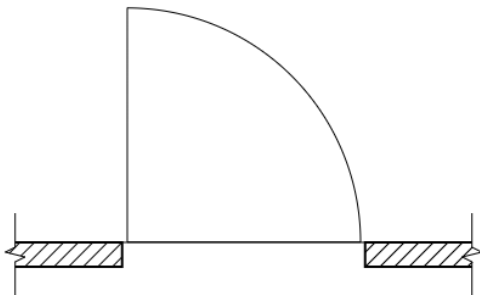
C2: Paneel eik (900x2050 mm - d = 40 mm)



Gemiddeld hoog en laag - MDF

C1: Profiel MDF (900x2050 mm)

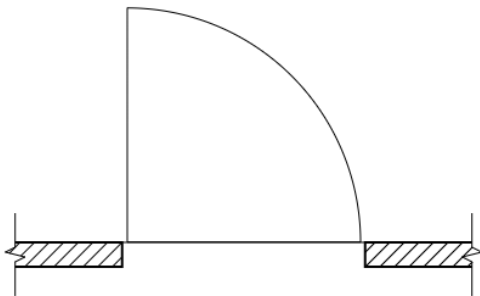
C2: Paneel MDF (900x2050 mm - d = 40 mm)



Uiterst laag - MDF-glas

C1: Profiel MDF (900x2050 mm)

C2: Gelaagd glas (900x2050 mm - d = 19 mm)

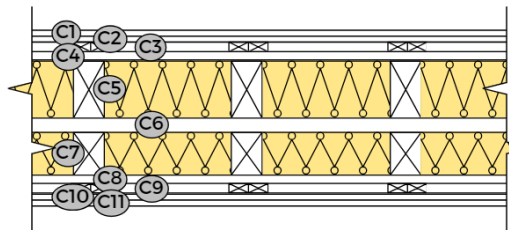


Figuur 61: Opbouwen binnendeuren in massiefbouw (Bron: TOTEM)

B.2 Houtskeletbouw

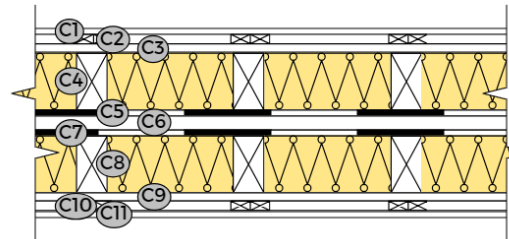
B.2.1 Gemene muur

Uiterst hoog - Naaldhouten skelet



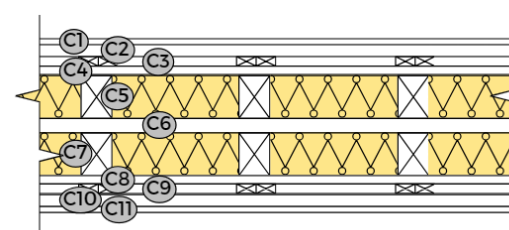
- C1: Geglazuurde keramische tegels (200x200x9 mm)
- C2: Gipsvezelplaat (10 mm)
- C3: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C4: Multiplexplaat (18 mm)
- C5: Naaldhout (120 mm) + rotswoldeken (120 mm)
- C6: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C7: Naaldhout (90 mm) + rotswoldeken (90 mm)
- C8: Multiplexplaat (18 mm)
- C9: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C10: Gipsvezelplaat (10 mm)
- C11: Geglazuurde keramische tegels (200x200x9 mm)

Gemiddeld hoog - Naaldhouten skelet

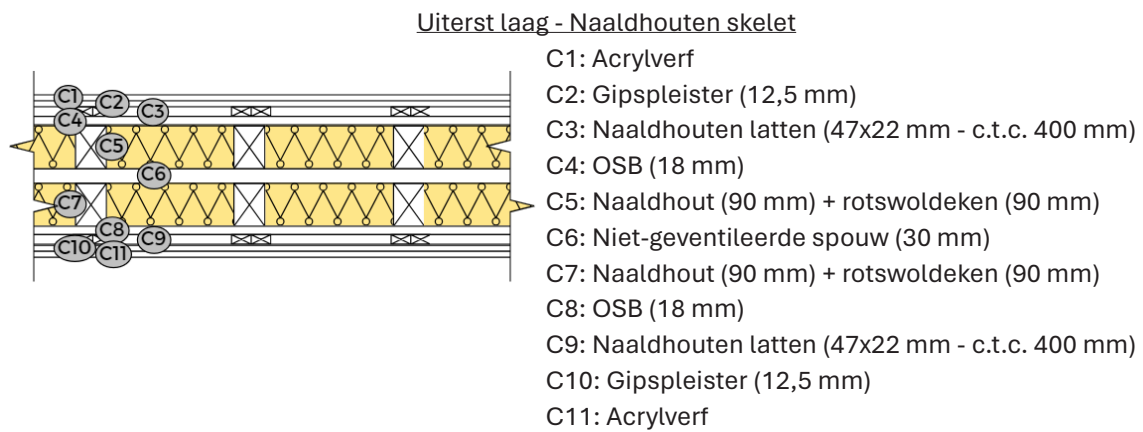


- C1: Vezelcementplaat (9 mm)
- C2: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C3: OSB (18 mm)
- C4: Naaldhout (120 mm) + cellulosevlokken (120 mm)
- C5: PE-folie (0,22 mm)
- C6: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C7: PE-folie (0,22 mm)
- C8: Naaldhout (120 mm) + cellulosevlokken (120 mm)
- C9: OSB (18 mm)
- C10: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C11: Vezelcementplaat (9 mm)

Gemiddeld laag - Naaldhouten skelet



- C1: Behangpapier (1 mm)
- C2: Gipspleister (2 x 12,5 mm)
- C3: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C4: Spaanplaat (18 mm)
- C5: Naaldhout (90 mm) + glaswoldeken (90 mm)
- C6: Niet-geventileerde spouw (30 mm)
- C7: Naaldhout (90 mm) + glaswoldeken (90 mm)
- C8: Spaanplaat (18 mm)
- C9: Naaldhouten latten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C10: Gipspleister (2 x 12,5 mm)
- C11: Behangpapier (1 mm)



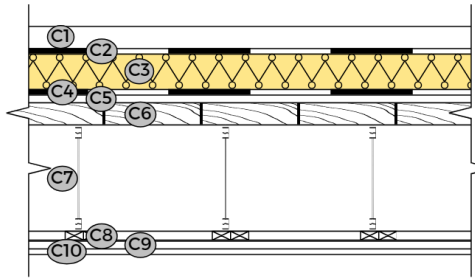
Figuur 62: Opbouwen gemene muur in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

B.2.2 Vloer op volle grond

Analoog aan massiefbouw.

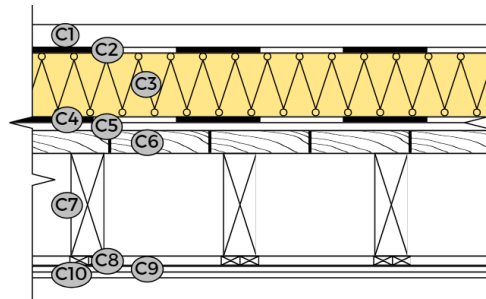
B.2.3 Plat dak

Uiterst hoog - TJI 350 gelamineerde houten profielen



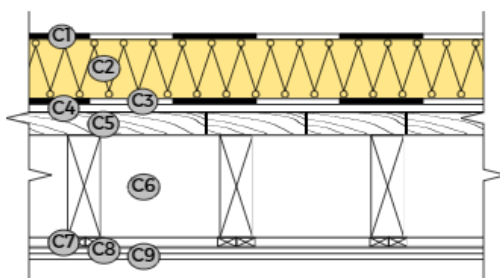
- C1: Grind (50 mm)
- C2: Polymeerbitumen (7 mm)
- C3: PUR - gebitumineerd glasvlies (80 mm)
- C4: LDPE (0,22 mm)
- C5: Multiplexplaat (18 mm)
- C6: Naaldhouten profielen (gemiddeld 50 mm - h.o.h. 400 mm)
- C7: TJI 350 profielen (240 mm - h.o.h. 400 mm) + niet-geventileerde spouw (240 mm)
- C8: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 450 mm)
- C9: Houtvezelplaat (18 mm)
- C10: Acrylverf

Gemiddeld hoog - Naaldhouten balken en dwarsbalken

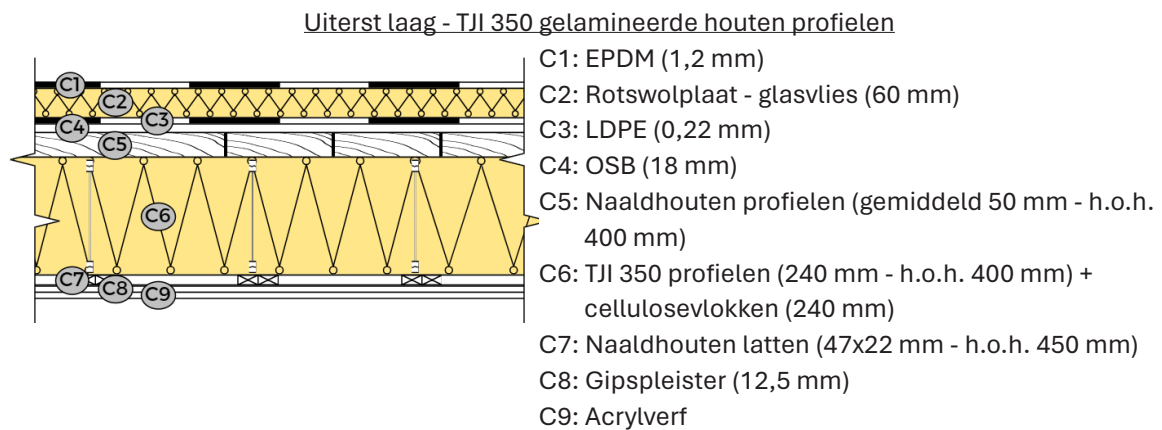


- C1: Grind (50 mm)
- C2: EPDM (1,2 mm)
- C3: Geëxpandeerde kurk (140 mm)
- C4: LDPE (0,22 mm)
- C5: Multiplexplaat (18 mm)
- C6: Naaldhouten profielen (gemiddeld 50 mm - h.o.h. 400 mm)
- C7: Naaldhouten balken en dwarsbalken (75x225 mm - h.o.h. 400 mm) + geventileerde spouw (225 mm)
- C8: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 450 mm)
- C9: Gipspleister (12,5 mm)
- C10: Acrylverf

Gemiddeld laag - Naaldhouten balken en dwarsbalken



- C1: EPDM (1,2 mm) - polymeerbitumen (3 mm)
- C2: Rotswolplaat - glasvlies (130 mm)
- C3: LDPE (0,22 mm)
- C4: Spaanplaat (18 mm)
- C5: Naaldhouten profielen (gemiddeld 50 mm - h.o.h. 400 mm)
- C6: Naaldhouten balken en dwarsbalken (75x225 mm - h.o.h. 400 mm) + geventileerde spouw (225 mm)
- C7: Naaldhouten latten (47x22 mm - h.o.h. 450 mm)
- C8: Gipsvezel (10 mm)
- C9: Behangpapier (1 mm)



Figuur 63: Opbouwen plat dak in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

B.2.4 Hellend dak

Analoog aan massiefbouw.

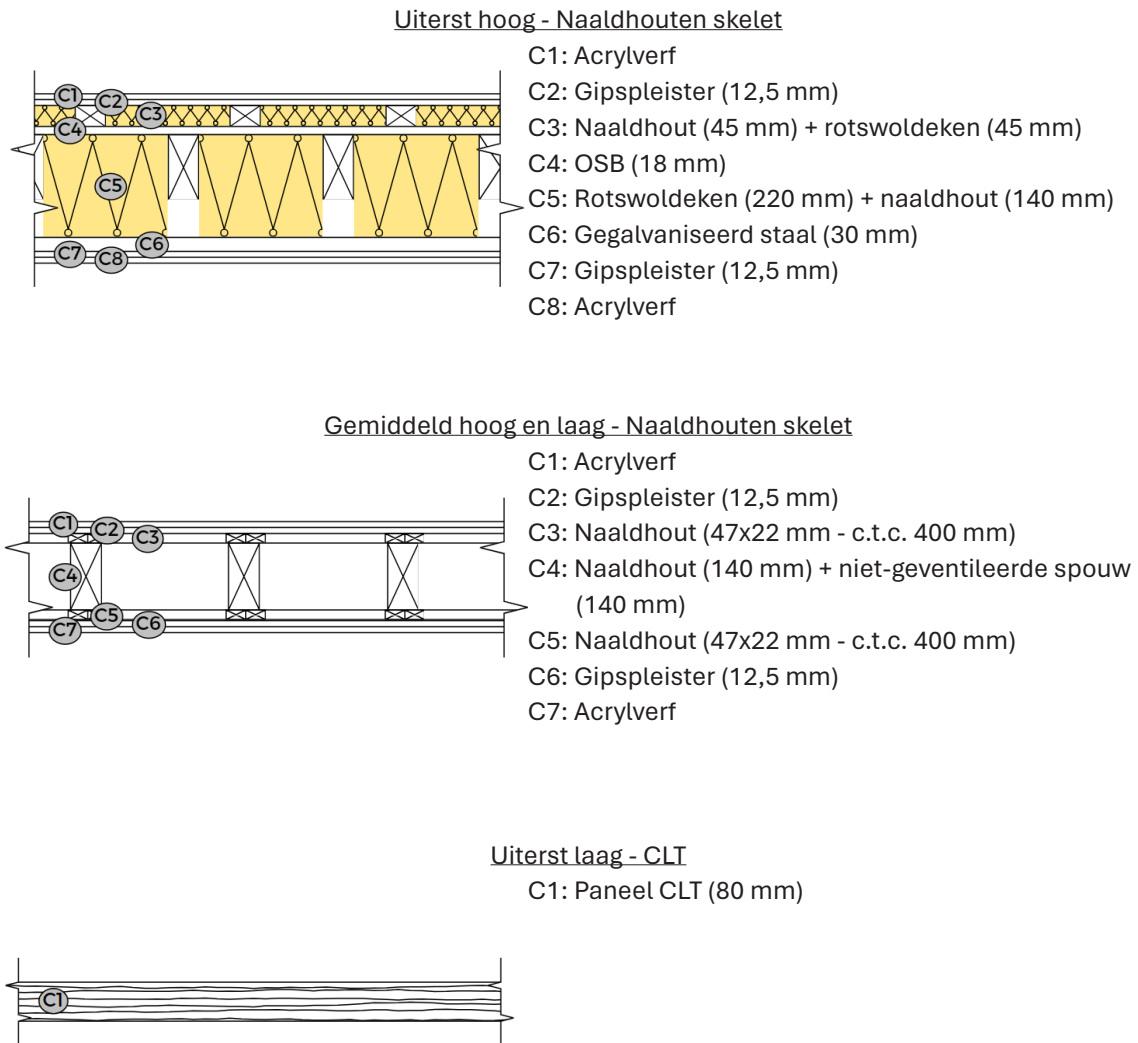
B.2.5 Raamopeningen

Analoog aan massiefbouw.

B.2.6 Buitendeuren en garagepoort

Analoog aan massiefbouw.

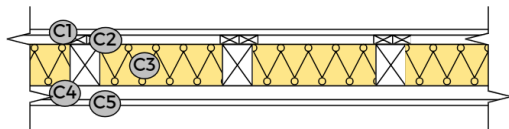
B.2.7 Dragende wanden



Figuur 64: Opbouw dragende wanden in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

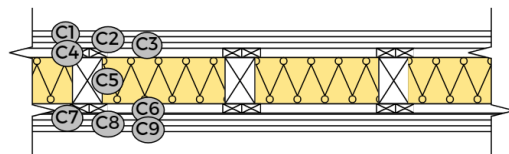
B.2.8 Niet-dragende wanden

Uiterst hoog - Naalddhouten skelet



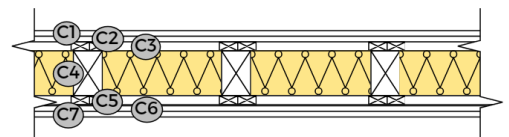
- C1: Vezelcement (12 mm)
- C2: Naalddhouten (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C3: Naalddhout (90 mm) + rotswoldeken (90 mm)
- C4: Gegalvaniseerd staal (30 mm)
- C5: Vezelcement (12 mm)

Gemiddeld hoog - Naalddhouten skelet



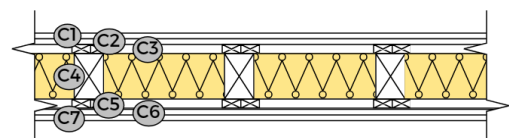
- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12,5 mm)
- C3: Gipspleister (12,5 mm)
- C4: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C5: Naalddhout (100 mm) + glaswoldeken (100 mm)
- C6: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C7: Gipspleister (12,5 mm)
- C8: Gipspleister (12,5 mm)
- C9: Acrylverf

Gemiddeld laag - Naalddhouten skelet



- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12,5 mm)
- C3: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C4: Naalddhout (100 mm) + glaswoldeken (100 mm)
- C5: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C6: Gipspleister (12,5 mm)
- C7: Acrylverf

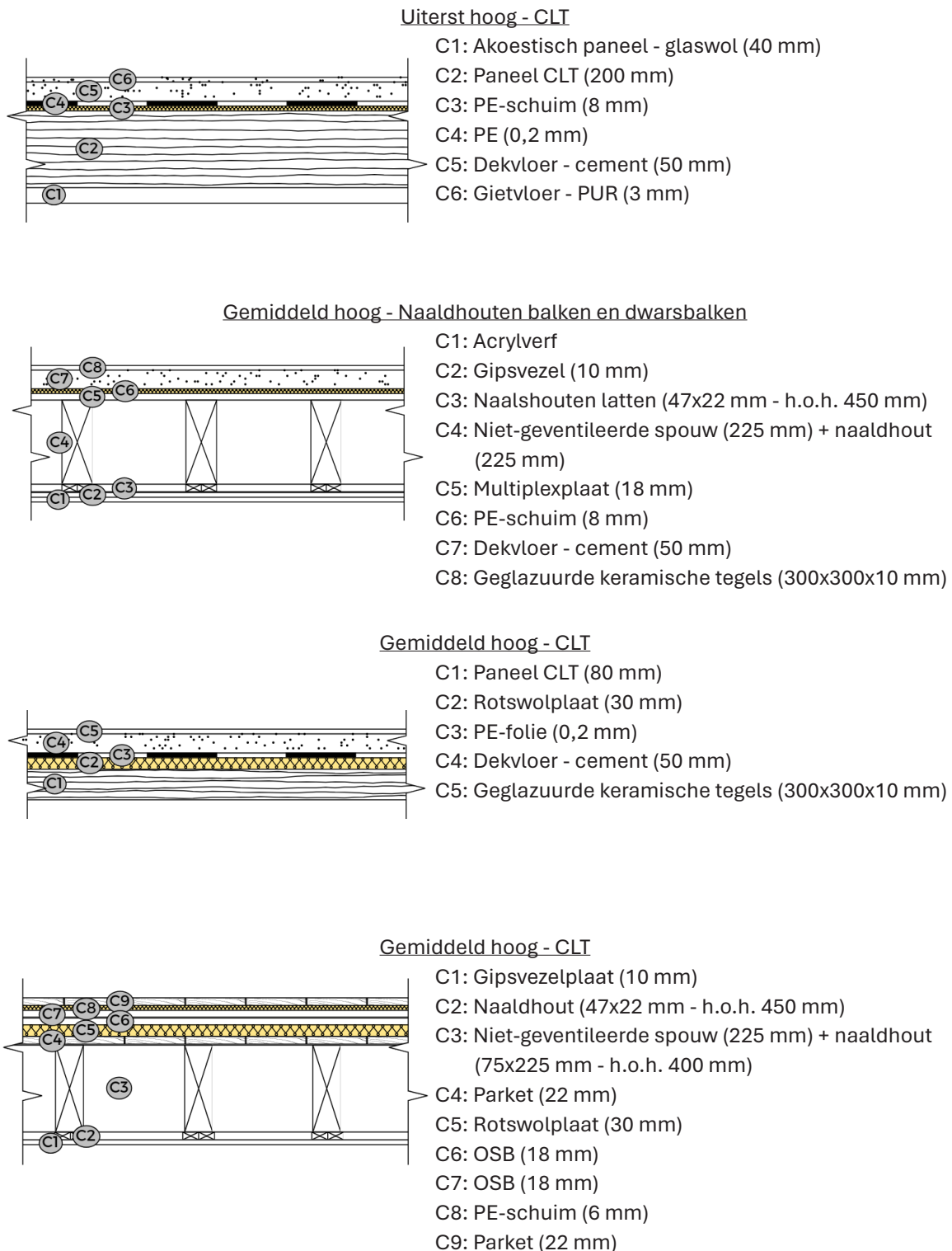
Uiterst laag - Naalddhouten skelet



- C1: Acrylverf
- C2: Gipspleister (12,5 mm)
- C3: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C4: Naalddhout (100 mm) + rotswoldeken (100 mm)
- C5: Naalddhout (47x22 mm - c.t.c. 400 mm)
- C6: Gipspleister (12,5 mm)
- C7: Acrylverf

Figuur 65: Opbouwen niet-dragende wanden in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

B.2.9 Interne vloer



Figuur 66: Opbouwen interne vloer in houtskeletbouw (Bron: TOTEM)

B.2.10 Binnendeuren

Analoog aan massiefbouw.

C. Milieu-impact gebouwelementen [kgCO₂]

C.1 Massiefbouw

Gebouwelement [kgCO ₂]	Uiterst - hoog U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Gemiddeld - hoog U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Gemiddeld - laag U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Uiterst - laag U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]	
Buitenwand	0,24	269	0,23	254	0,23	263	0,21	205
Gemene muur	0,54	84,5	0,43	67,5	0,52	64	0,48	28
Vloer op volle grond	0,23	412	0,17	336	0,2	348	0,23	222
Plat dak	0,23	440	0,24	411	0,22	265	0,23	226
Hellend dak	0,24	423	0,24	196	0,24	180	0,23	173
Raamopeningen	1,58	1316	1,55	985	1,13	794	0,9	674
Buitendeur	1,26	1680	1,26	1680	1,13	1559	1,13	1559
Dragende wanden	2,24	96	1,79	75	3,18	35	2,13	8
Niet-dragende wanden	1,5	160	1,98	96	2,13	61	0,66	52
Interne vloer	0,71	214	2	155	0,73	135	1,53	134
Binnendeur	2,34	154	2,34	135	2,34	135	3,58	126
Trap	/	6,67	/	6,67	/	6,67	/	6,67
Garagepoort	1,38	4401	1,38	4401	1,38	4401	1,38	4401

Tabel 33: U-waardes en milieuscores per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m²K en kgCO₂/m²

Gebouwelement [kgCO ₂]	Uiterst - hoog II OI		Gemiddeld - hoog II OI		Gemiddeld - laag II OI		Uiterst - laag II OI	
Buitenwand	143	126	129	124	138	125	92	114
Gemene muur	84,5	0	67,5	0	64	0	28	0
Vloer op volle grond	311	101	260	76	260	88	121	101
Plat dak	318	122	283	129	145	120	105	121
Hellend dak	292	130	67	130	49	131	47	126
Raamopeningen	468	847	153	851	188	606	190	484
Buitendeur	435	1245	435	1245	440	1119	440	1119
Dragende wanden	96	0	75	0	35	0	8	0
Niet-dragende wanden	160	0	96	0	61	0	52	0
Interne vloer	214	0	155	0	135	0	134	0
Binnendeur	154	0	135	0	135	0	126	0
Trap	6,67	0	6,67	0	6,67	0	6,67	0
Garagepoort	151	4250	151	4250	151	4250	151	4250

Tabel 34: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot massiefbouw, uitgedrukt in kgCO₂/m²

C.2 Houtskeletbouw

Gebouwelement [kgCO ₂]	Uiterst - hoog U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Gemiddeld - hoog U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Gemiddeld - laag U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]		Uiterst - laag U [W/m ² K] [kgCO ₂ /m ²]	
Buitenwand	0,24	312	0,22	245	0,2	201	0,23	189
Gemene muur	0,21	62	0,19	49,5	0,22	36	0,23	33,5
Vloer op volle grond	0,23	412	0,17	336	0,2	348	0,23	222
Plat dak	0,25	226	0,24	197	0,23	191	0,13	129
Hellend dak	0,24	423	0,24	196	0,24	180	0,23	173
Raamopeningen	1,58	1316	1,55	985	1,13	794	0,9	674
Buitendeur	1,26	1680	1,26	1680	1,13	1559	1,13	1559
Dragende wanden	0,26	63	1,09	41	1,09	41	1,14	15
Niet-dragende wanden	0,47	103	0,38	68	0,4	53	0,4	48
Interne vloer	0,51	202	1,09	93	0,54	79	0,48	64
Binnendeur	2,34	154	2,34	135	2,34	135	3,58	126
Trap	/	6,67	/	6,67	/	6,67	/	6,67
Garagepoort	1,38	4401	1,38	4401	1,38	4401	1,38	4401

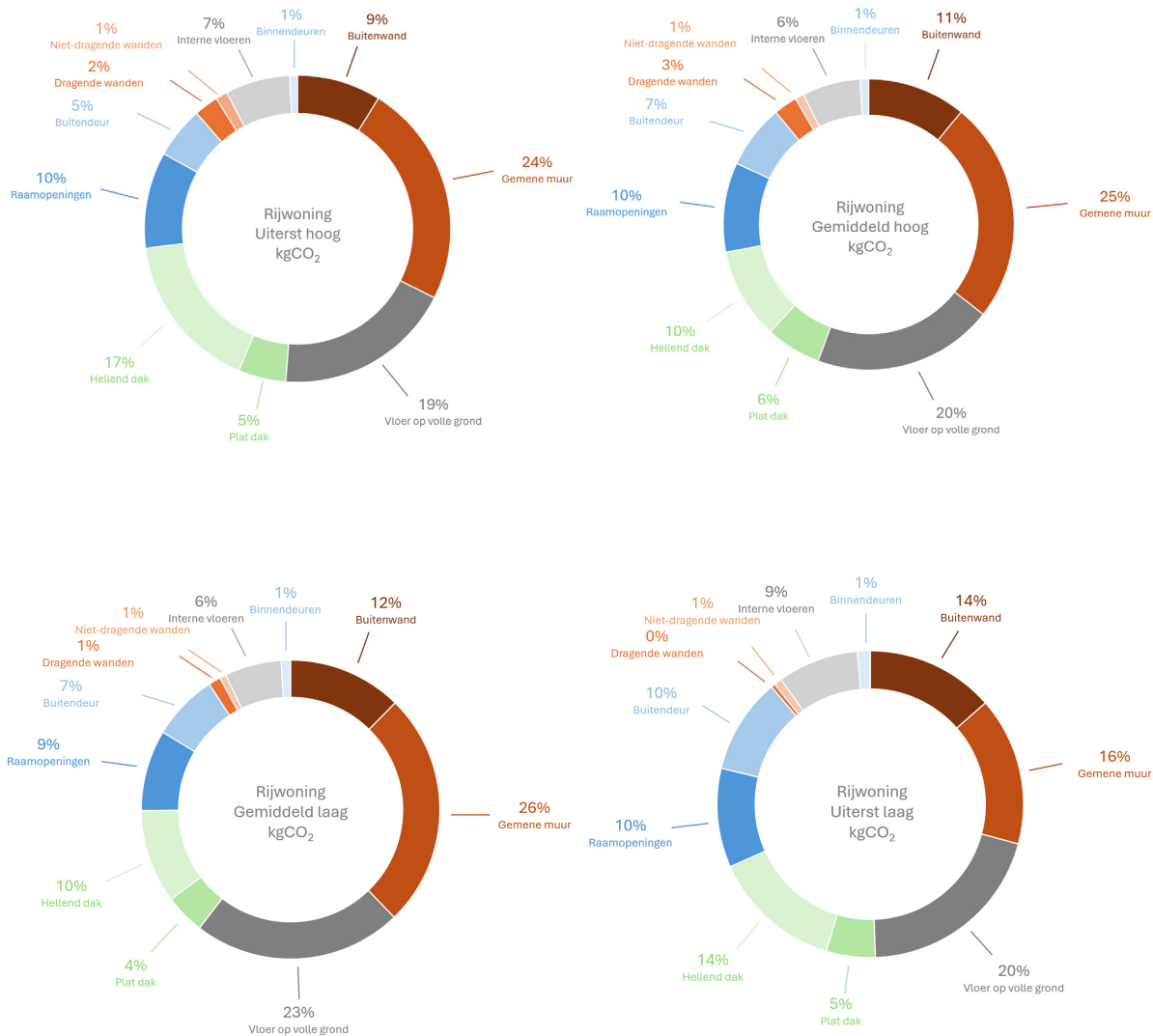
Tabel 35: U-waardes en milieuscores per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, respectievelijk uitgedrukt in W/m²K en kgCO₂/m²

Gebouwelement [kgCO ₂]	Uiterst - hoog		Gemiddeld - hoog		Gemiddeld - laag		Uiterst - laag	
	II	OI	II	OI	II	OI	II	OI
Buitenwand	183	129	127	118	93	108	65	124
Gemene muur	62	0	49,5	0	36	0	33,5	0
Vloer op volle grond	311	101	260	76	260	88	121	101
Plat dak	94	132	69	128	65	125	58	71
Hellend dak	292	130	67	130	49	131	47	126
Raamopeningen	468	847	153	831	188	606	190	484
Buitendeur	435	1245	435	1245	440	1119	440	1119
Dragende wanden	63	0	41	0	41	0	15	0
Niet-dragende wanden	103	0	68	0	53	0	48	0
Interne vloer	202	0	93	0	79	0	64	0
Binnendeur	154	0	135	0	135	0	126	0
Trap	6,67	0	6,67	0	6,67	0	6,67	0
Garagepoort	151	4250	151	4250	151	4250	151	4250

Tabel 36: Ingebedde (II) en operationele impact (OI) per gebouwelement die behoren tot houtskeletbouw, uitgedrukt in kgCO₂/m²

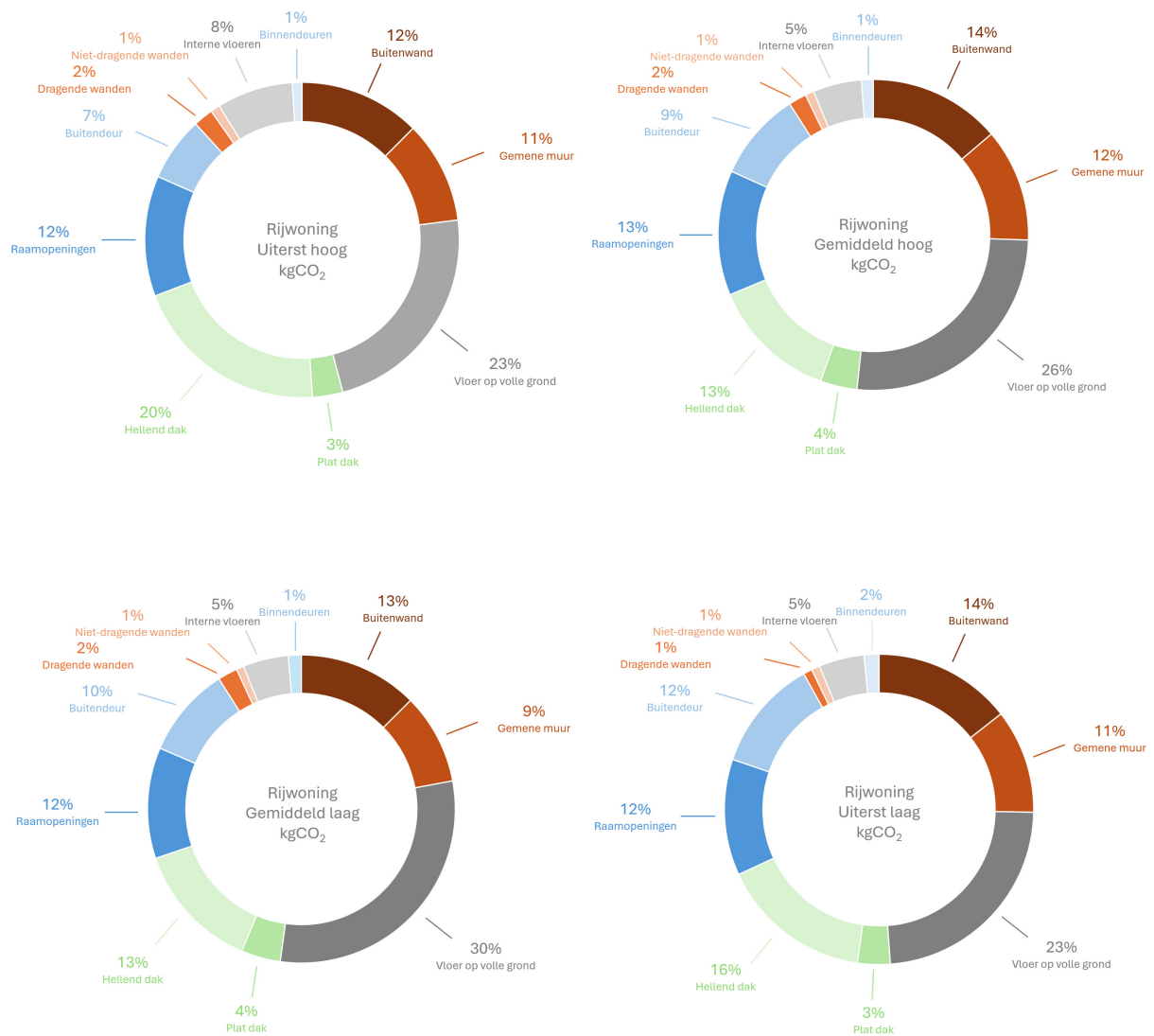
D. Aandeel gebouwelementen [kgCO_2/m^2]

D.1 Massiefbouw



Figuur 67: Aandeel van de milieuscore (kgCO_2/m^2) per gebouwelementen per subcategorie van massiefbouw, toegepast op een rijwoning

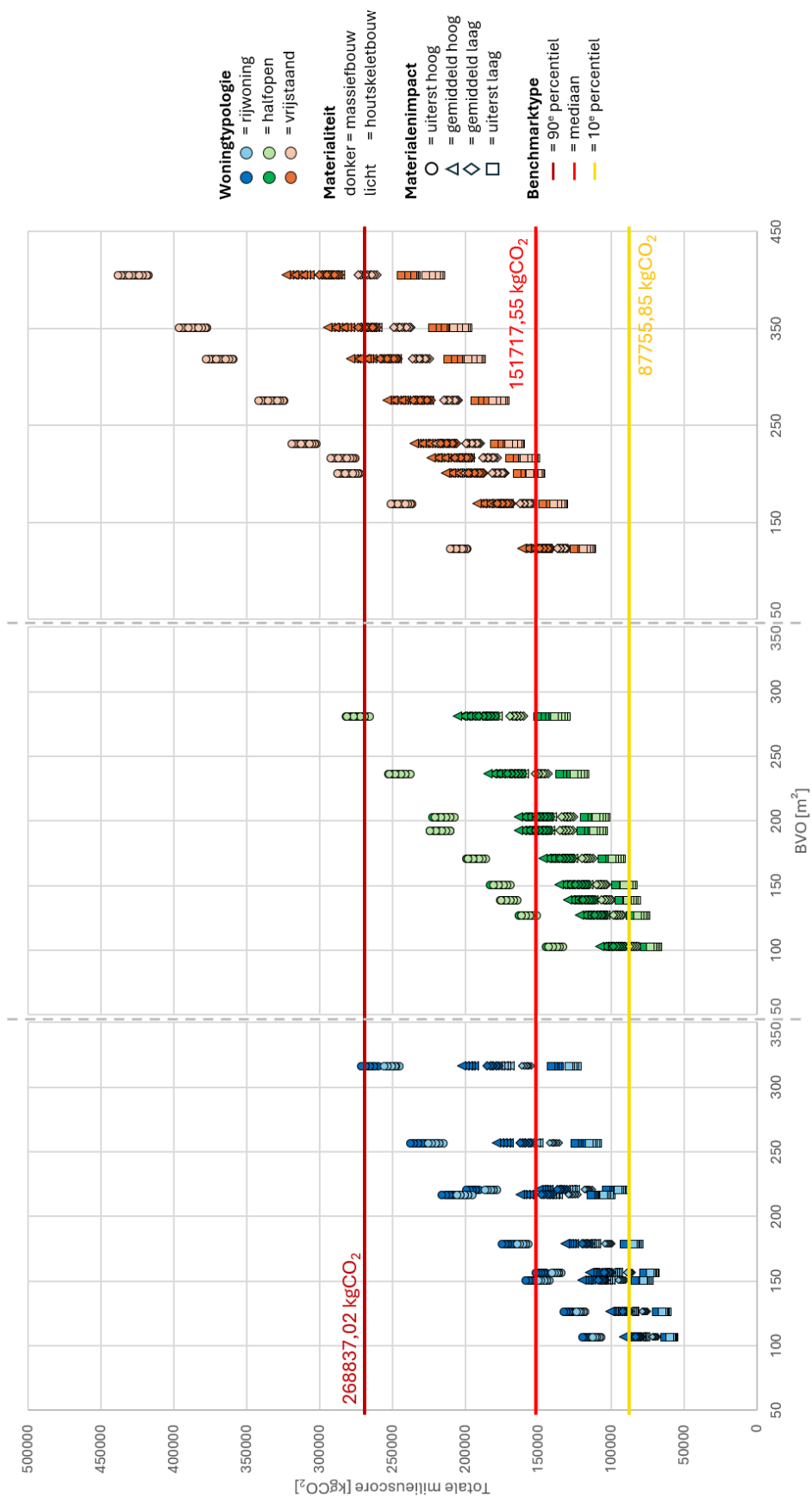
D.2 Houtskeletbouw



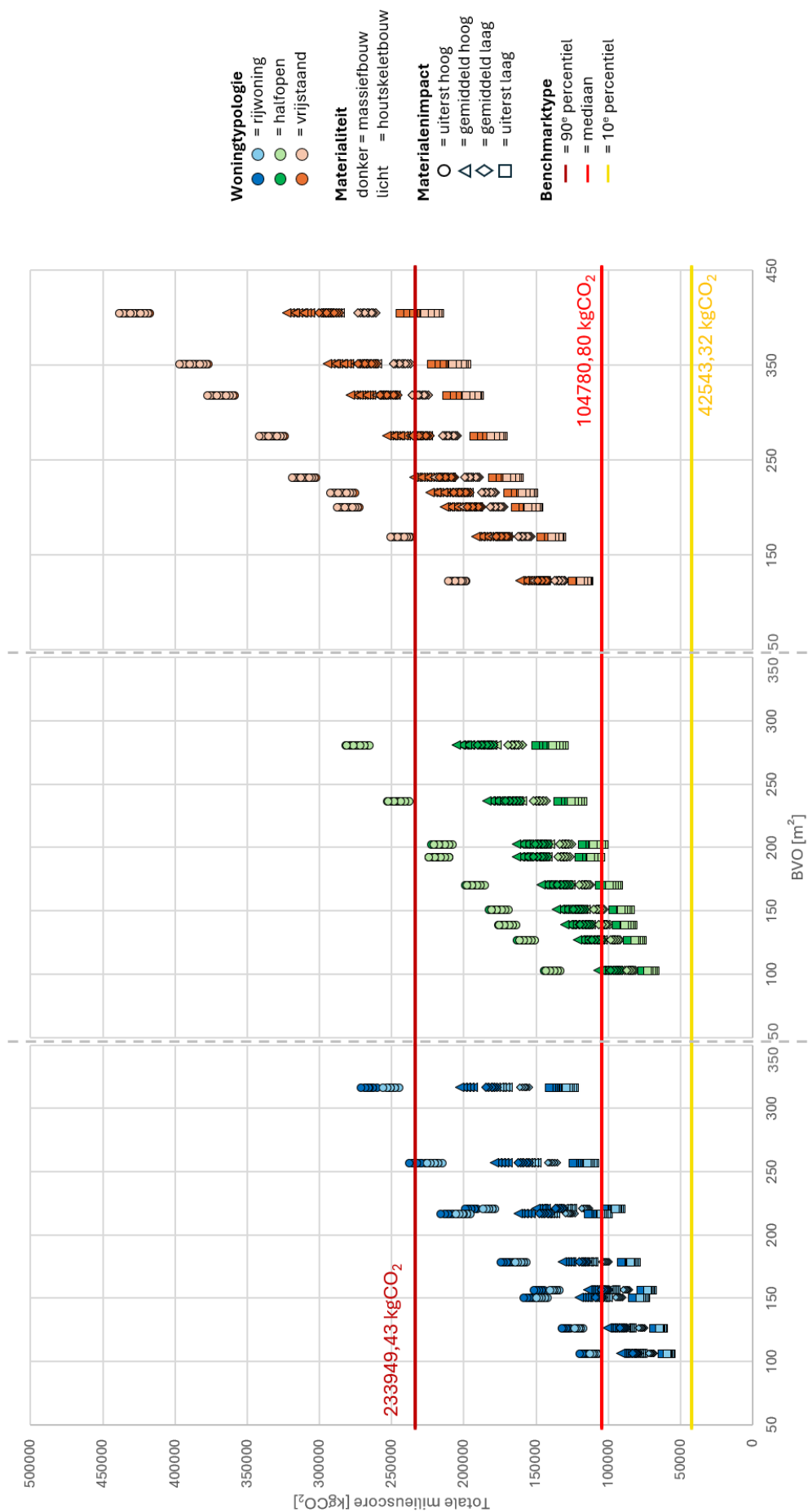
Figuur 68: Aandeel van de milieuscore (kgCO_2/m^2) per gebouwelementen per subcategorie van houtskeletbouw, toegepast op een rijwoning

E. Totale milieu-impact [kgCO₂]

E.1 Eénggezinswoningen

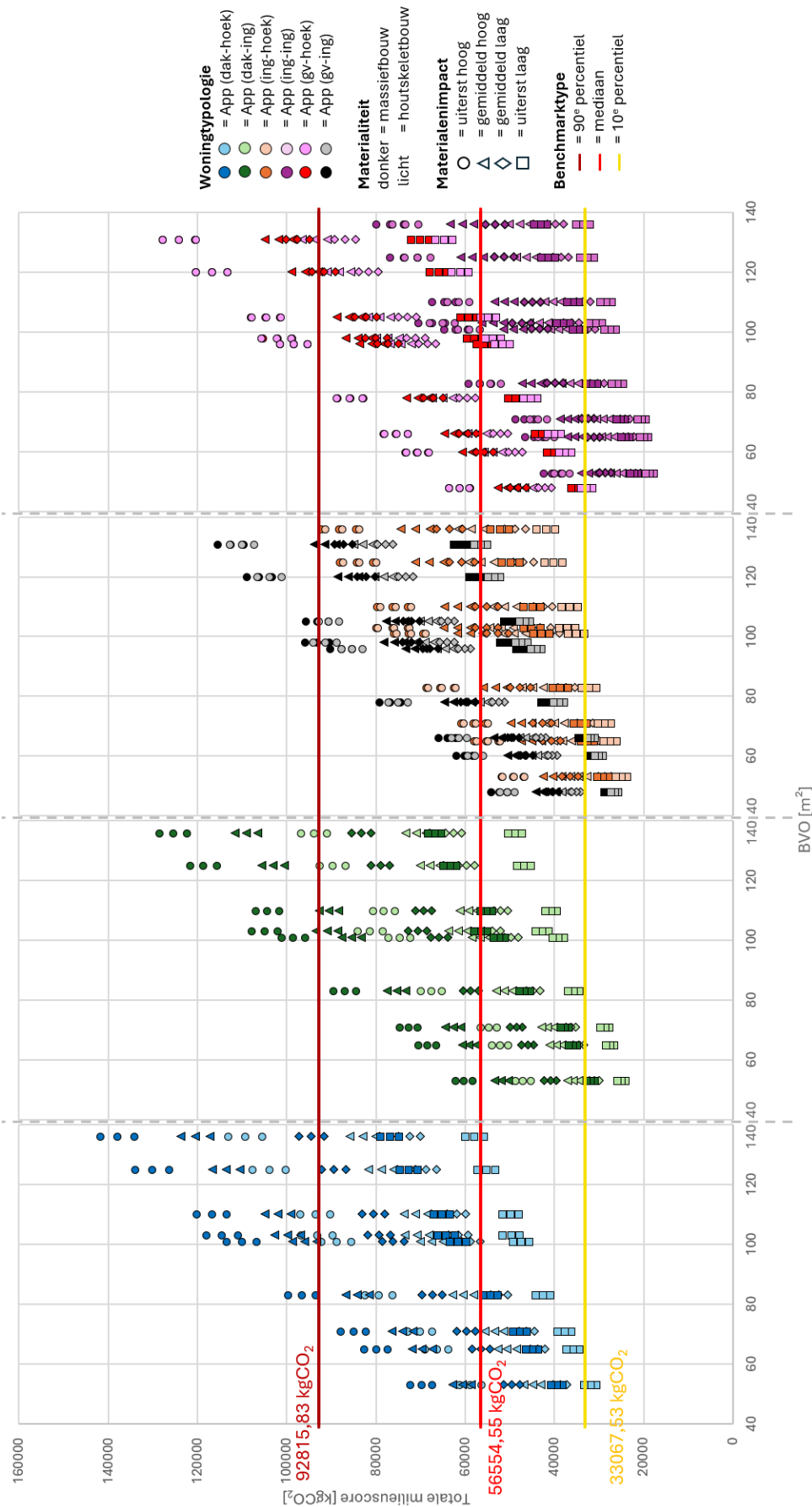


Figuur 69: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO₂, voor alle éénggezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op de éénggezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt.

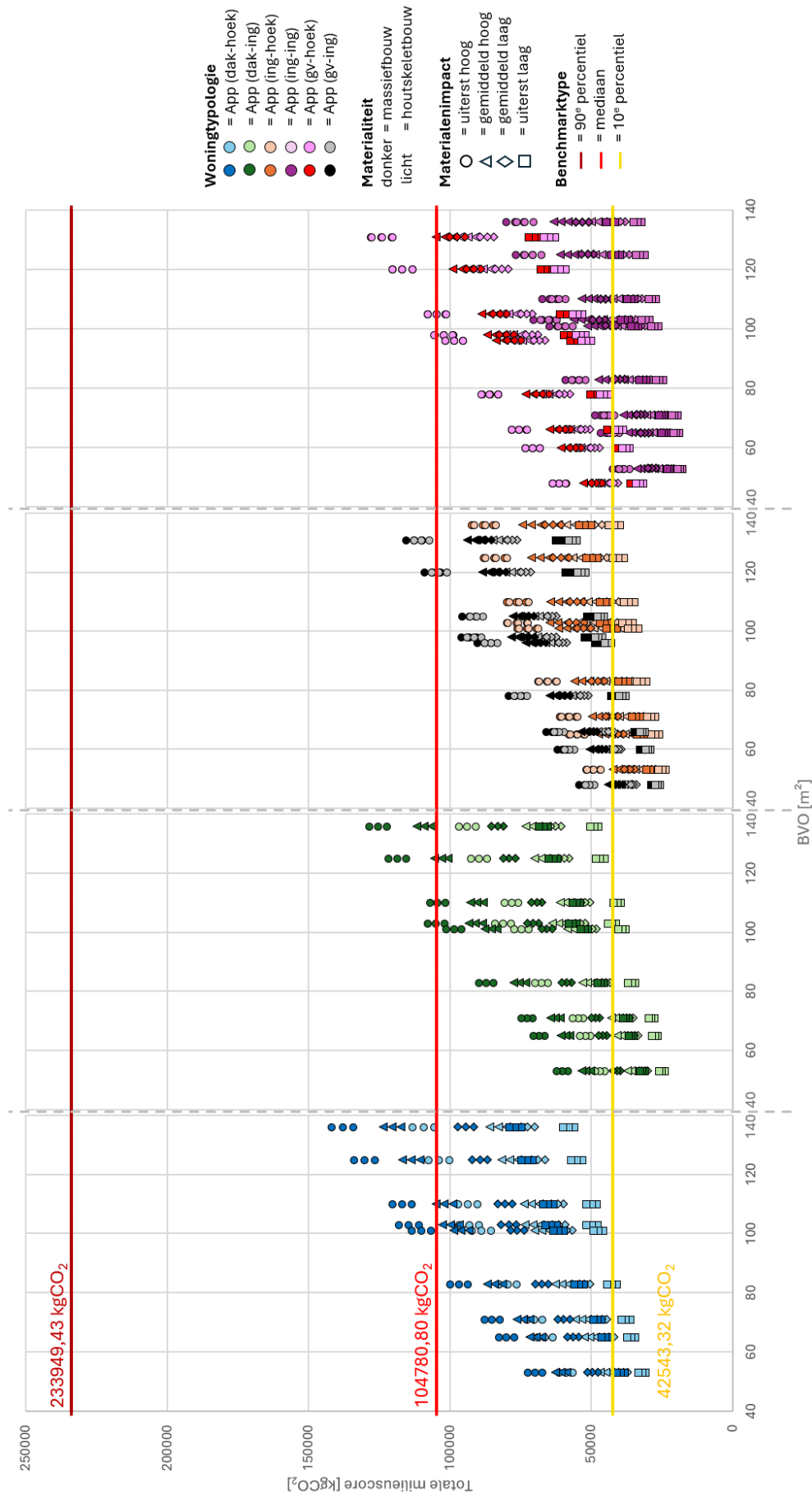


Figuur 70: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO₂, voor alle ééngezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaarden gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens opnieuw oploopt.

E.2 Meergezinswoningen



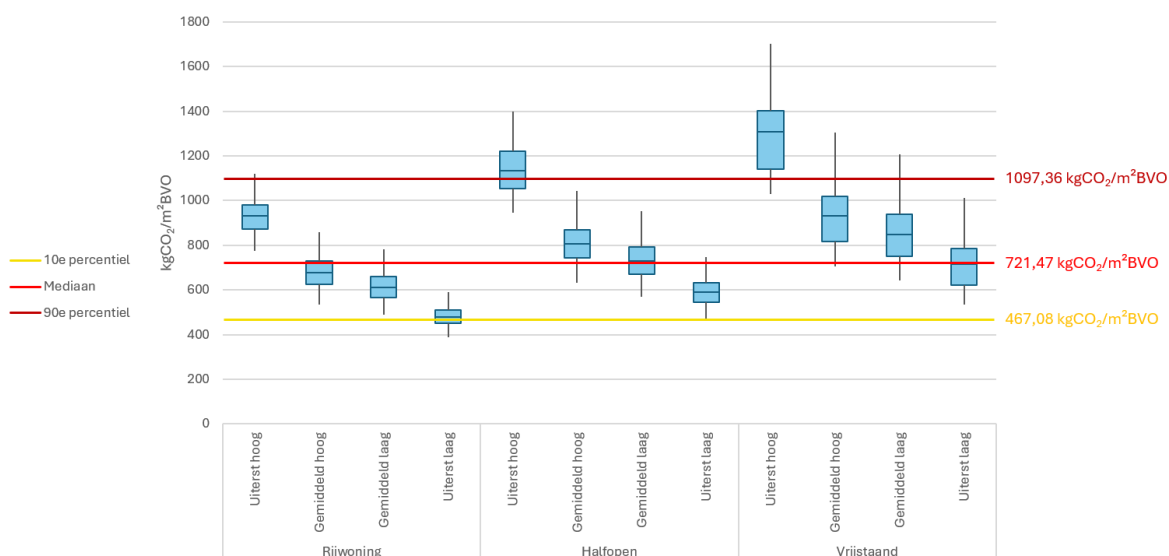
Figuur 71: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO₂, voor alle meergezinswoningen in functie van de bruto vloeroppervlakte met benchmarkwaarden gebaseerd op de meergezinswoningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m² tot 140m² oploopt om daarna opnieuw te starten.



Figuur 72: Totale milieuscore, uitgedrukt in kgCO₂, voor alle meergezinswoningen in functie van de brutovloeroppervlakte met benchmarkwaardes gebaseerd op alle woningen. Let op voor de x-as die telkens van 40m² tot 140m² oploopt om daarna opnieuw te starten.

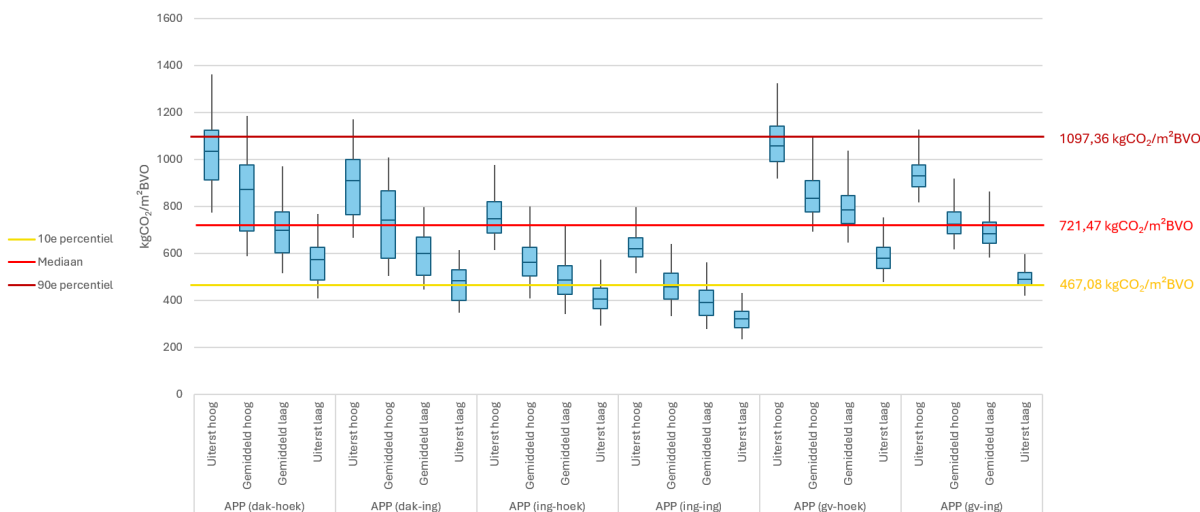
F. Normalisatie naar brutovloeroppervlakte [$\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$]

F.1 Eéngesinswoningen



Figuur 73: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$ en weergegeven per ééngezinswoningstypologie en per materialenimpact

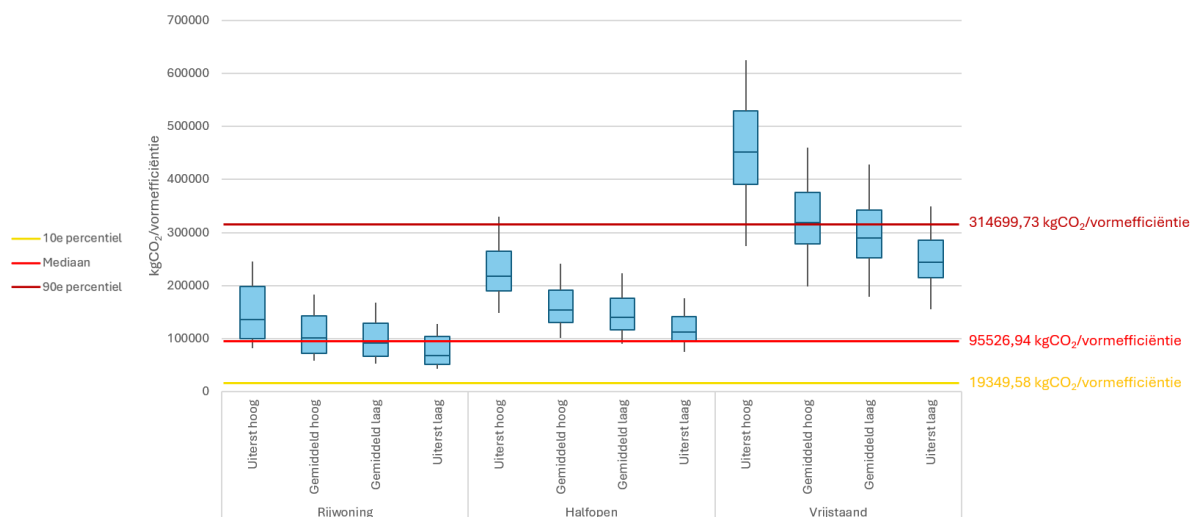
F.2 Meergezinswoningen



Figuur 74: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{BVO}$ en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact

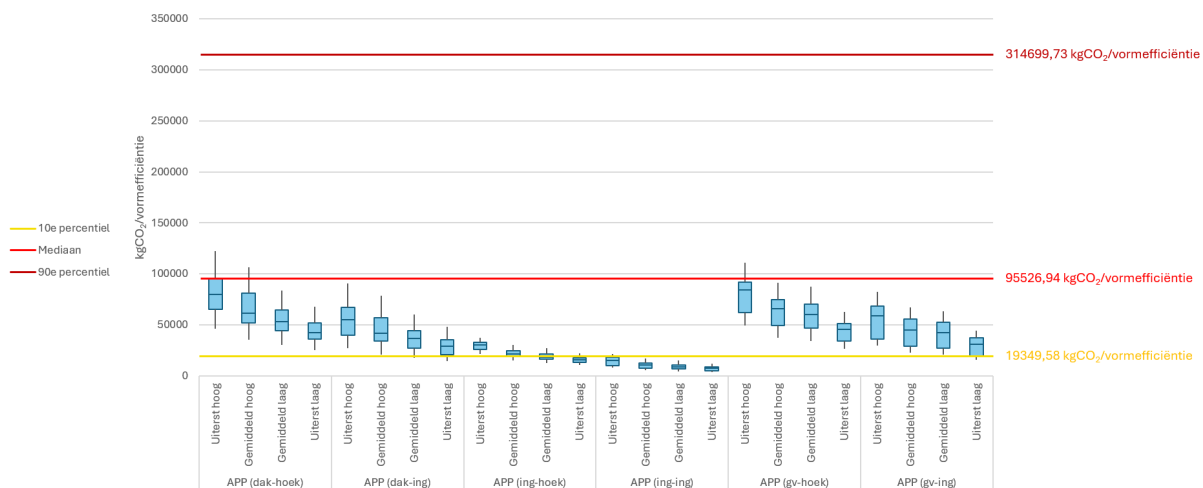
G. Normalisatie naar vormefficiëntie [kgCO₂/vormefficiëntie]

G.1 Eéngesinswoningen



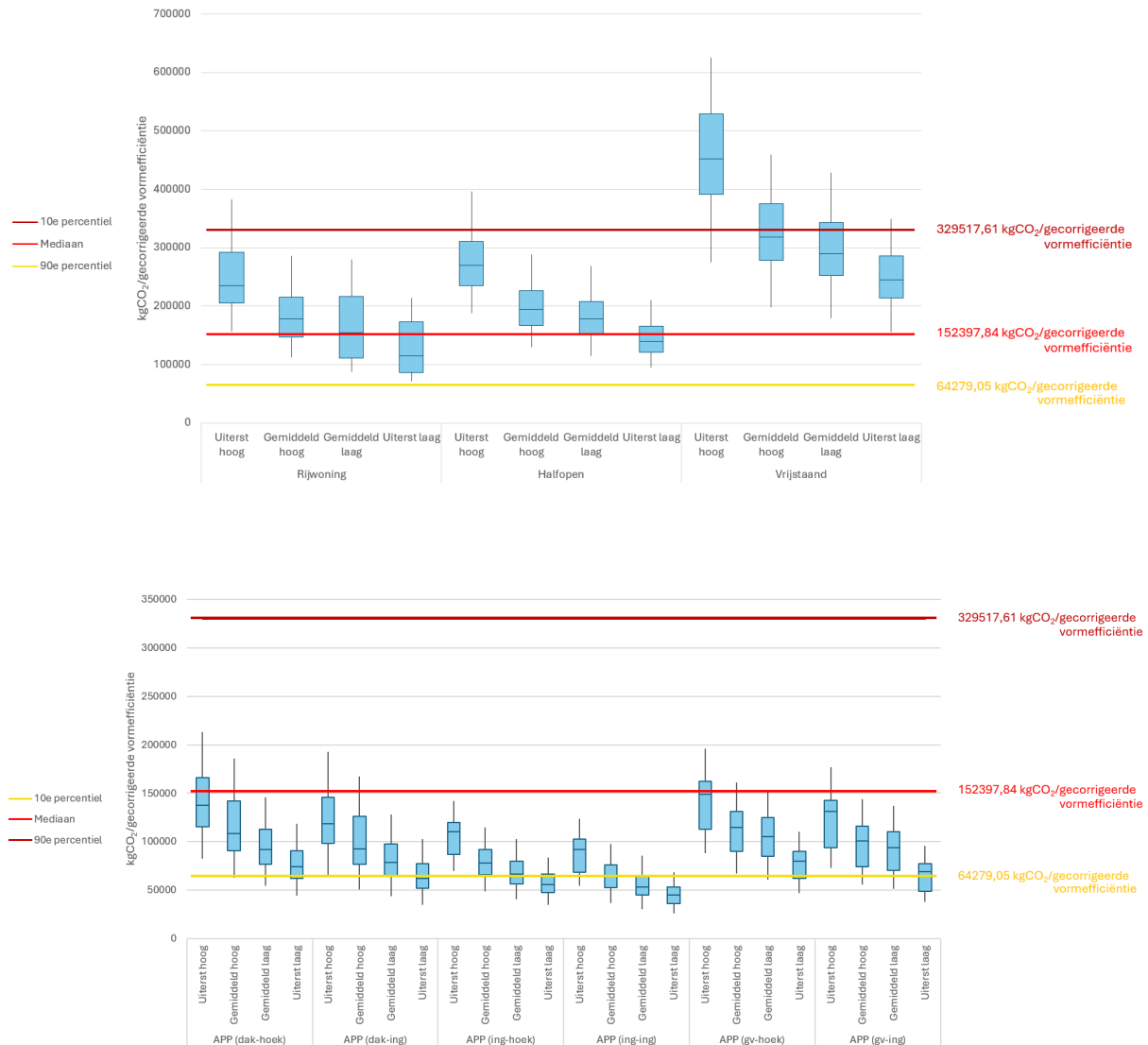
Figuur 75: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in kgCO₂/vormefficiëntie en weergegeven per eéngesinswoningstypologie en per materialenimpact

G.2 Meergezinswoningen



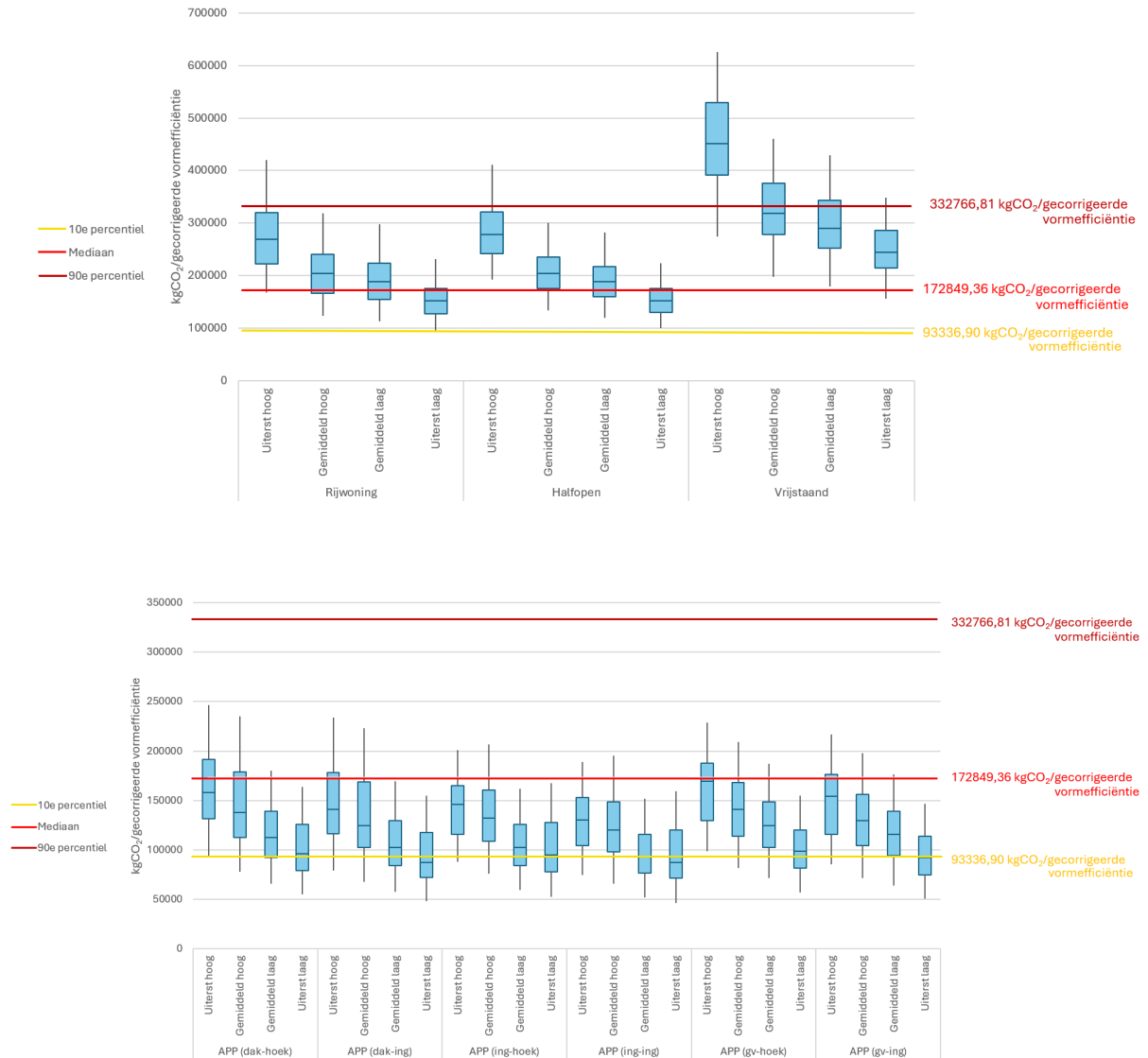
Figuur 76: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in kgCO₂/vormefficiëntie en weergegeven per meergezinswoningstypologie en per materialenimpact

G.3 Eén- en meergezinswoningen inclusief correctie equivalente boloppervlakte



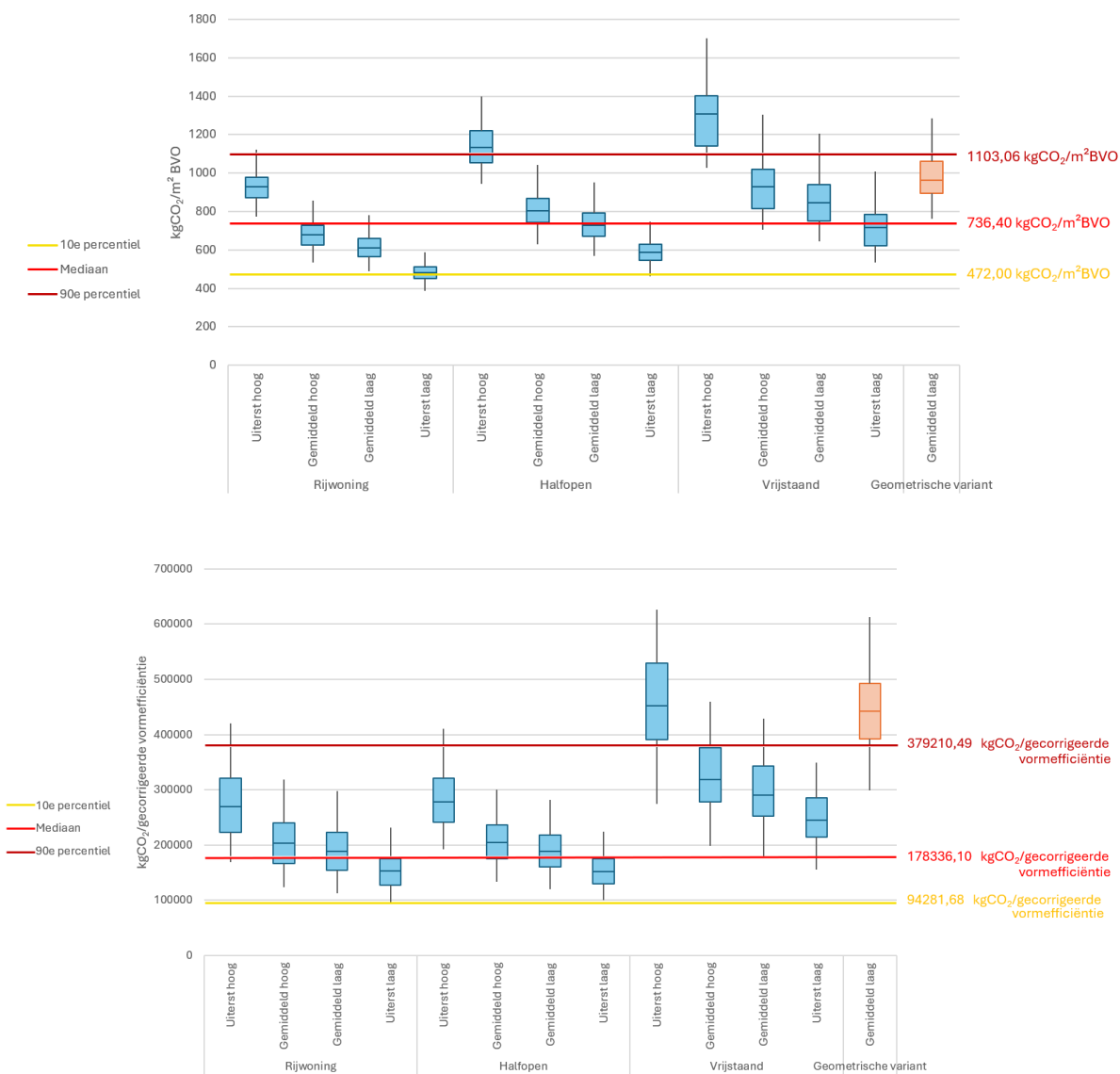
Figuur 77: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte.

G.4 Eén- en meergezinswoningen inclusief correctie equivalente boloppervlakte en transmissieverliezen



Figuur 78: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen uitgedrukt in kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie en weergegeven per één- (boven) en meergezinswoningstypologie (onder) per materialenimpact. De correctie van de vormefficiëntie via de gecorrigeerde equivalente boloppervlakte en inclusief transmissieverliezen.

H. Gevoeligheidsanalyse [kgCO₂]



Figuur 79: Benchmarktypes (10^e percentiel, mediaan en 90^e percentiel) berekend op basis van één- en meergezinswoningen, inclusief de niet-compacte vrijstaande woningen, uitgedrukt in kgCO₂/m²BVO (bovenaan) en kgCO₂/gecorrigeerde vormefficiëntie (onderaan)