

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Het verlagen van de broeikasemissies van een gebouw: onderzoek naar
materiaalgerelateerde CO2e-uitstoot

Lucas Hulsbosch
Jelle Leuckx

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. arch. Wine FIGEYS

BEGELEIDER :

Dhr. Bert LEMMENS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***Het verlagen van de broeikasemissies van een gebouw: onderzoek naar
materiaalgerelateerde CO₂e-uitstoot***

Lucas Hulsbosch

Jelle Leuckx

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. arch. Wine FIGEYS

BEGELEIDER :

Dhr. Bert LEMMENS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterthesis vormt het sluitstuk van de gezamenlijke masteropleiding 'Industriële Ingenieurswetenschappen Bouwkunde' aan de Universiteit Hasselt en de Katholieke Universiteit Leuven.

Graag willen we enkele personen bedanken voor de begeleiding en ondersteuning tijdens onze masterproef. Allereerst zouden we graag onze interne promotor Prof. dr. ir. Jose Gouveia Henriques willen bedanken voor zijn ondersteuning en feedback gedurende de volledige masterproef. Daarnaast willen we ook graag een woord van dank richten aan onze externe promotor Prof. dr. ir. arch. Wine Figeys en onze externe begeleider ir. Bert Lemmens voor de technische ondersteuning en hun waardevol advies. Tenslotte willen we onze dankbaarheid uiten aan Britt Van Damme voor de ondersteuning bij het gebruik van de gehanteerde software.

De professionele inzichten van deze personen hebben bijgedragen aan de kwaliteit van dit onderzoek.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen.....	7
Lijst met figuren.....	9
Afkortingenlijst	11
Verklarende woordenlijst.....	13
Abstract	15
Abstract in English	17
1 Inleiding.....	19
1.1 Situering	19
1.2 Probleemstelling.....	19
1.3 Doelstellingen.....	20
2 Literatuurstudie.....	21
2.1 Broeikasgassen	21
2.2 CO ₂ -voetafdruk.....	21
2.3 Klimaatakkoord van Parijs.....	21
2.4 Operational Carbon	22
2.5 Embodied Carbon	22
2.6 Whole Life Carbon Assessment.....	24
3 Aanpak.....	27
3.1 One Click LCA.....	27
3.2 Referentiegebouw	27
3.3 Werkwijze.....	28
4 Broeikasgasemissie van het betonnen referentiegebouw (vijf verdiepingen)	31
4.1 Lastendaling.....	31
4.2 Broeikasgasemissie.....	32
5 Broeikasgasemissie van het hybride gebouw (vijf verdiepingen)	33
5.1 Ontwerp.....	33
5.1.1 Materiaalkeuzes	33
5.1.2 Ontwerp vloerplaat	34
5.1.3 Ontwerp balken.....	35
5.1.4 Ontwerp kolommen	35
5.2 Broeikasgasemissie.....	36
6 Broeikasgasemissie van het houten gebouw (vijf verdiepingen).....	37

6.1	Ontwerp.....	37
6.1.1	Materiaalkeuzes draagstructuur	37
6.1.2	Materiaalkeuzes niet-dragende structuur	37
6.2	Broeikasgasemissie.....	39
7	Vergelijking van de resultaten.....	41
8	Gebouw van twee verdiepingen	43
8.1	Ontwerp gebouw.....	43
8.2	Betonnen gebouw	43
8.2.1	Ontwerp.....	43
8.2.2	Broeikasgasemissie.....	44
8.3	Hybride gebouw	45
8.3.1	Ontwerp vloerplaat	45
8.3.2	Ontwerp balken.....	45
8.3.3	Ontwerp kolommen	46
8.3.4	Broeikasgasemissie.....	46
8.4	Houten gebouw	47
8.4.1	Materiaalkeuzes draagstructuur	47
8.4.2	Broeikasgasemissie.....	47
8.5	Vergelijking van de resultaten.....	48
9	Gebouw van acht verdiepingen	51
9.1	Ontwerp gebouw.....	51
9.2	Betonnen gebouw	51
9.2.1	Ontwerp.....	51
9.2.2	Broeikasgasemissie.....	52
9.3	Hybride gebouw	52
9.3.1	Ontwerp vloerplaat	52
9.3.2	Ontwerp balken.....	53
9.3.3	Ontwerp kolommen	53
9.3.4	Broeikasgasemissie.....	54
9.4	Houten gebouw	54
9.4.1	Materiaalkeuzes draagstructuur	54
9.4.2	Broeikasgasemissie.....	54
9.5	Vergelijking van de resultaten.....	55
10	Vergelijking tussen de gebouwen met verschillende vorm	59
11	Besluit.....	61
	Referentielijst.....	63

Bijlagen	65
Bijlage A: Lastendaling betonnen gebouw vijf verdiepingen	67
Bijlage B: Ontwerp houten elementen gebouw 5 verdiepingen.....	69
Bijlage C: Ontwerp gebouw van twee verdiepingen.....	77
Bijlage D: Ontwerp gebouw van acht verdiepingen.....	83

Lijst met tabellen

Tabel 1: Overzicht verschillende gebouwen	29
Tabel 2: Afmetingen gebouw	31
Tabel 3: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	32
Tabel 4: Overzicht afmetingen kolommen	36
Tabel 5: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	36
Tabel 6: Overzicht afmetingen kolommen	37
Tabel 7: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	39
Tabel 8: CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e) van de drie gebouwen van vijf verdiepingen	41
Tabel 9: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	44
Tabel 10: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	46
Tabel 11: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	47
Tabel 12: CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e) van de drie gebouwen van twee verdiepingen	48
Tabel 13: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	52
Tabel 14: Overzicht afmetingen kolommen	53
Tabel 15: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	54
Tabel 16: CO ₂ e-uitstoot per gebouwelement	55
Tabel 17: CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e) van de drie gebouwen van acht verdiepingen.....	55

Lijst met figuren

Figuur 1: Verschil tussen embodied en operational carbon [13]	23
Figuur 2: Aandeel embodied en operational carbon [15, p. 3]	23
Figuur 3: Overzicht verschillende fases WLCA [15, p. 21]	24
Figuur 4: 3D-model referentiegebouw	28
Figuur 5: Dragend oppervlak van de muren en kolommen	31
Figuur 6: Ontwerp verdieping hybride gebouw	33
Figuur 7: Gebruikspercentage CLT 120 L5s vloerplaat	34
Figuur 8: Opbouw CLT 120 L5s	35
Figuur 9: Illustratie houten gevelwand [17]	38
Figuur 10: Houten binnenwand [18]	38
Figuur 11: Global warming kg CO ₂ e betonnen gebouw (vijf verdiepingen)	41
Figuur 12: Global warming kg CO ₂ e hybride gebouw (vijf verdiepingen)	42
Figuur 13: Global warming kg CO ₂ e houten gebouw (vijf verdiepingen)	42
Figuur 14: Aanduiding kolommen en balken voor gebouw van twee verdiepen	43
Figuur 15: Zwaarst belaste vloerplaat hybride gebouw (twee verdiepingen)	45
Figuur 16: Global warming kg CO ₂ e betonnen gebouw (twee verdiepingen)	48
Figuur 17: Global warming kg CO ₂ e hybride gebouw (twee verdiepingen)	49
Figuur 18: Global warming kg CO ₂ e houten gebouw (twee verdiepingen)	49
Figuur 19: Aanduiding kolommen en balken voor gebouw van acht verdiepen	51
Figuur 20: Zwaarst belaste vloerplaat hybride gebouw (acht verdiepingen)	53
Figuur 21: Global warming kg CO ₂ e betonnen gebouw (acht verdiepingen)	56
Figuur 22: Global warming kg CO ₂ e hybride gebouw (acht verdiepingen)	56
Figuur 23: Global warming kg CO ₂ e houten gebouw (acht verdiepingen)	57
Figuur 24: CO ₂ e-uitstoot (kg CO ₂ /m ²) i.f.v. het aantal verdiepingen van fase A1 t.e.m. fase A3	59
Figuur 25: CO ₂ e-uitstoot (kg CO ₂ /m ²) i.f.v. het aantal verdiepingen van fase A1 t.e.m. fase A3 zonder de fundering	60

Afkortingenlijst

CLT	Cross Laminated Timber
CO ₂	Koolstofdioxide
CO ₂ e	Koolstofdioxide-equivalent
GL30h	Homogeen gelijmd gelamineerd hout met een buigsterkte van 30 N/mm ²
GL36h	Homogeen gelijmd gelamineerd hout met een buigsterkte van 36 N/mm ²
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Levenscyclusanalyse
OSB	Oriented Strand Board
WLCA	Whole Life Carbon Assessment
WoLC	Whole of Life Carbon

Verklarende woordenlijst

Embodied carbon	De hoeveelheid koolstof die wordt uitgestoten tijdens de bouwfase, gebruiksfase en aan het einde van de levensfase van een gebouw.
Global warming	Klimaatverandering als gevolg van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer.
Materiaal gerelateerde CO ₂ - uitstoot	De CO ₂ -uitstoot die rechtstreeks gelinkt is aan een bepaald materiaal.
Operational carbon	De hoeveelheid koolstof die wordt uitgestoten op vlak van energie- en watergebruik zodra een gebouw in gebruik is.
Whole Life Carbon Assessment	Het is een methode om de totale milieu-impact van een product of project te kwantificeren.
Window-to-wall ratio	De verhouding tussen het totale raamoppervlak en het totale geveloppervlak van een gebouw.

Abstract

Om de opwarming van de aarde tegen 2050 te beperken tot 1,5°C dient de uitstoot van broeikasgassen te worden gereduceerd. De bouwsector is verantwoordelijk voor 49% van de totale wereldwijde CO₂-uitstoot. Om binnen de bouwsector de CO₂e-emissies te verminderen moeten er milieubewuste materiaalkeuzes gemaakt worden. Daarom vergelijkt deze masterproef de materiaalgerelateerde CO₂e-uitstoot van een betonnen, een hybride en een houten gebouw met dezelfde structurele eigenschappen. Hierdoor kan er een beeld gevormd worden van de milieu-impact van de verschillende bouwmaterialen.

Voor elk gebouwtype worden drie modellen ontworpen van respectievelijk twee, vijf en acht verdiepingen hoog, maar met een gelijke totale vloeroppervlakte. Voor ieder gebouw worden de hoeveelheden van de gebruikte materialen berekend. Deze hoeveelheden worden in de software One Click LCA ingegeven. Met deze gegevens berekent de software de totale CO₂e-uitstoot.

Uit het onderzoek blijkt dat hoe meer hout er wordt gebruikt in de constructie, hoe lager de CO₂e-uitstoot van het gebouw is. Bovendien heeft een lager gebouw een grotere CO₂e-uitstoot dan een hoger gebouw met dezelfde totale vloeroppervlakte. Dit komt doordat de funderingsplaat een aanzienlijke impact heeft op de uitstoot van broeikasgassen.

Abstract in English

To limit global warming to 1.5°C by 2050, greenhouse gas emissions need to be reduced. The construction sector accounts for 49% of total global CO₂ emissions. To reduce CO₂e emissions within the construction sector, environmentally conscious material choices must be made. Therefore, this master's thesis compares the material-related CO₂e emissions of a concrete, a hybrid, and a timber building with the same structural properties. In this way, it is possible to understand the environmental impact of different building materials.

For each building type, three models are designed of two, five, and eight storeys, respectively, but with an equal total floor area. For each building, the quantities of the used materials are calculated. These quantities are entered into the One Click LCA software. With this data, this software calculates the total CO₂e emissions.

The study shows that the more wood used in the construction, the lower the CO₂e emissions of the building. Moreover, a lower building has higher CO₂e emissions than a higher building with the same total floor area. This is because the foundation slab has a significant impact on greenhouse gas emissions.

1 Inleiding

1.1 Situering

Tussen 2011 en 2020 is de mondiale gemiddelde oppervlaktetemperatuur met 1,1°C gestegen ten opzichte van de periode tussen 1850 en 1900.

De opwarming van de aarde is grotendeels te wijten aan de uitstoot van broeikasgassen ten gevolge van niet-duurzaam energiegebruik, levensstijlen en consumptie- en productiepatronen [1].

Recentelijk gepubliceerde bevindingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tonen aan dat het zeer waarschijnlijk is dat de opwarming van de aarde niet beperkt kan worden tot 1,5°C, zelfs niet als er aanzienlijke verminderingen van broeikasgasemissies worden gerealiseerd gedurende de komende twee decennia [2].

Een van de doelstellingen van het Klimaatakkoord van Parijs is de overgang naar een koolstofarme maatschappij. Daarom hebben tal van bedrijven, organisaties en overheden in de afgelopen jaren inspanningen geleverd om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

Dit impliceert de intentie om de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen zo snel mogelijk te laten pieken, gevolgd door een aanzienlijke daling, met als uiteindelijk doel om tegen 2050 een koolstofneutraal evenwicht te bereiken. Dit houdt in dat er een evenwicht wordt bereikt tussen door de mens veroorzaakte uitstoot en de opname van broeikasgassen [3].

Deze masterproef is uitgevoerd in samenwerking met Arcadis. Binnen de bouwsector is Arcadis een vooraanstaand bedrijf dat zich inzet voor duurzaamheid. Arcadis is een toonaangevende internationale organisatie die ontwerp-, engineering- en adviesdiensten levert voor een duurzame gebouwde en natuurlijke omgeving. Met meer dan 36 000 mensen in ruim 70 landen probeert het bedrijf de leefomgeving over de hele wereld te verbeteren [4].

1.2 Probleemstelling

De CO₂-uitstoot gerelateerd aan het energieverbruik van gas en elektriciteit, ook *operational carbon* genoemd, is het aandeel van de totale CO₂-emissie waar vandaag de dag de meeste aandacht aan wordt besteed. Echter, de productie, logistiek en installatie van de gebruikte bouwmaterialen dragen eveneens bij aan de totale CO₂-uitstoot die aan een gebouw kan worden toegeschreven. Hierdoor is het aandeel van zogenaamde *embodied carbon* niet te verwaarlozen. Hoewel de kennis rond *embodied carbon* groeit, is er nog steeds behoefte aan meer onderzoek om een dieper inzicht te krijgen in materiaalgerelateerde CO₂-uitstoot.

De bouwsector heeft een groot aandeel in de wereldwijde CO₂-uitstoot, namelijk 49% [5]. In België alleen werd in 2021 per vierkante meter nieuwbouwwoning ongeveer 340 kg CO₂ uitgestoten door de materiaalproductie en het bouwproces [6]. Uit onderzoek [7] blijkt dat de wereldwijde energiegerelateerde CO₂-emissie als gevolg van het gebruik van gebouwen tien gigaton bedraagt. Deze uitstoot is vooral te wijten aan verwarming en koeling van de gebouwen.

Specifiek voor een nieuw klassiek kantoorgebouw met een basisafwerking in Londen bedraagt de *embodied carbon emission* 67% en de *operational carbon emission* 33% van de totale CO₂-uitstoot tijdens de totale levenscyclus van het gebouw [8].

Deze masterproef onderzoekt hoe de materiaalgerelateerde broeikasgasemissies tussen een betonnen en een houten gebouw met equivalente structurele eigenschappen variëren. Daarnaast wordt ook de invloed van de vorm van het gebouw op de broeikasgasemissies bestudeerd.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze masterproef is om een vergelijking te maken tussen de materiaalgerelateerde broeikasgasemissies van een betonnen, een hybride en een houten gebouw met dezelfde structurele eigenschappen eigenschappen. De materiaalgerelateerde broeikasgasemissies omvatten de totale CO₂e-emissies van de gebruikte bouwmaterialen tijdens de volledige levensduur van deze materialen. Door een vergelijking te maken tussen verschillende bouwmaterialen kan een oplossing gevonden worden met een zo laag mogelijke CO₂e-emissie. Hiervoor is er gewerkt in meerdere deeldoelstellingen:

- De eerste deeldoelstelling bestaat eruit om de CO₂e-emissies, uitgedrukt in ton, van het gebouw in kaart te brengen met een software, genaamd One Click LCA. Hiervoor worden eerst de structurele eigenschappen van het betonnen gebouw berekend.
- De volgende deeldoelstelling is het genereren van een hybride en een houten gebouw met dezelfde structurele eigenschappen als het betonnen gebouw. Bij het hybride gebouw worden de vloerplaten, kolommen en balken uitgevoerd in hout en worden de wanden uitgevoerd in beton. Ook van deze gebouwen wordt met behulp van de software One Click LCA de CO₂e-emissie bepaald.
- De laatste deeldoelstelling is om een vergelijkende studie uit te voeren tussen de broeikasgasemissies van de drie gebouwen. In deze deeldoelstelling wordt ook bepaald welke structurelementen van de gebouwen de grootste bijdrage leveren aan de gehele CO₂e-emissies.

Daarnaast is er ook een nevendoelstelling waarbij onderzoek wordt gedaan naar de invloed van de vorm van het gebouw op de CO₂e-emissies. In deze doelstelling wordt het aantal verdiepingen van het gebouw vermeerderd en verminderd om op deze manier te onderzoeken wat de invloed hiervan is op de broeikasgasemissies. De totale vloeroppervlakte van het gebouw blijft constant.

2 Literatuurstudie

2.1 Broeikasgassen

Broeikasgassen zijn gasen in de atmosfeer die de warmte van de zon vasthouden, waardoor de oppervlaktetemperatuur op aarde zal stijgen. Broeikasgassen zijn van nature aanwezig in de atmosfeer, maar de concentratie aan broeikasgassen neemt toe ten gevolge van niet-duurzaam energiegebruik, levensstijlen en consumptie- en productiepatronen [9]. Enkele voorbeelden van broeikasgassen zijn koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en distikstofoxide (N_2O). Tussen 2011 en 2020 is de mondiale gemiddelde oppervlaktetemperatuur met $1,1^\circ\text{C}$ gestegen ten opzichte van de periode tussen 1850 en 1900 [9].

2.2 CO_2 -voetafdruk

De CO_2 -voetafdruk is een maatstaf voor de totale hoeveelheid koolstofdioxide die wordt uitgestoten door menselijke activiteiten, zoals tijdens het bouwproces. De CO_2 -emissies worden meestal uitgedrukt in tonnen CO_2 -equivalent per vergelijkingseenheid, zoals bijvoorbeeld per jaar en per vierkante meter [10].

Wanneer men verschillende broeikasgassen wil vergelijken met elkaar drukt men de uitstoot ervan uit in CO_2 -equivalent, dit is nodig omdat de verschillende soorten broeikasgassen niet allemaal in dezelfde mate bijdragen tot het broeikaseffect. De CO_2 -equivalent wordt berekend aan de hand van de Global Warming Potential (GWP). Dit is een aanduiding voor de mate waarin een broeikasgas bijdraagt tot de klimaatopwarming [11].

2.3 Klimaatakkoord van Parijs

De transitie naar een klimaatneutrale toekomst is met de Overeenkomst van Parijs [12] onomkeerbaar in gang gezet. Het Akkoord van Parijs getuigt onmiskenbaar van ambitie, aangezien het beoogt:

- De opwarming van de aarde ruim onder de 2°C te houden ten opzichte van de pre-industriële niveaus en zelfs te streven naar een beperking van de opwarming tot $1,5^\circ\text{C}$.
- De capaciteit van landen te vergroten om zich aan te passen aan klimaatverandering en veerkracht om klimaatverandering te vergroten.
- De overgang naar een koolstofarme samenleving te bewerkstelligen door wereldwijde uitstoot van broeikasgassen zo snel mogelijk te laten pieken en vervolgens snel te laten afnemen, om tegen de tweede helft van deze eeuw een evenwicht te bereiken tussen door de mens veroorzaakte uitstoot en absorptie van broeikasgassen.

- De financiële stromen in overeenstemming te brengen met de transitie naar deze koolstofarme en klimaatbestendige ontwikkeling.

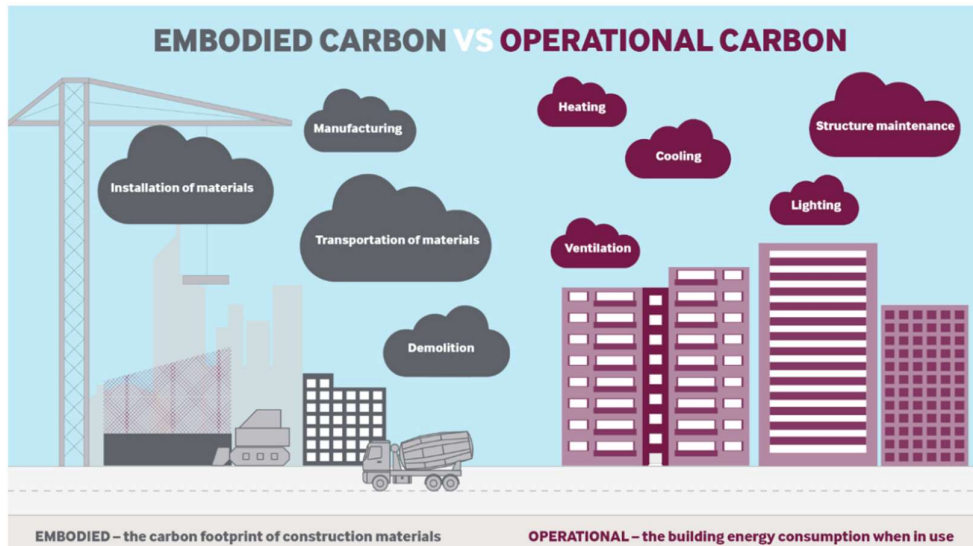
Concreet betekent dit voor de lidstaten van de Europese Unie een vermindering van de broeikasgasemissies tegen 2050 met 80% tot 95% ten opzichte van 1990 [12].

2.4 Operational Carbon

De *operational carbon* omvat de hoeveelheid koolstof die wordt uitgestoten op vlak van energie- en watergebruik zodra een gebouw in gebruik is. Het is gemakkelijker te becijferen dan *embodied carbon* en is al enige tijd een prioriteit bij het terugdringen van de totale CO₂-uitstoot. Een van de maatregelen is het ontwerpen van nieuwe gebouwen met energie-efficiëntere technieken, die gebruikmaken van wind- of zonne-energie [13]. Op dit moment wordt de focus vooral gelegd op de reductie van de *operational carbon* en minder op de reductie van *embodied carbon*.

2.5 Embodied Carbon

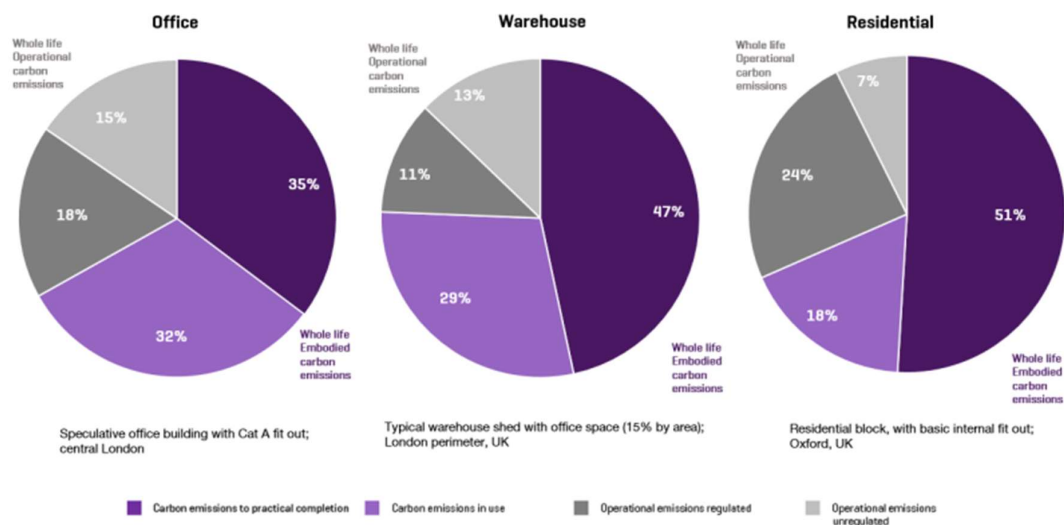
Embodied carbon is de hoeveelheid koolstof die wordt uitgestoten tijdens de productiefase, constructiefase, gebruiksfase en aan het einde van de levensfase van een gebouw. Tijdens de productiefase en constructiefase wordt de uitstoot van koolstof voornamelijk beïnvloed door de winning van grondstoffen, de productie en verfijning van materialen, alsmede het transport en de installatie van apparatuur en machines [13]. Gedurende de gebruiksfase is er sprake van emissies als gevolg van onderhoud, vervangingen en reparaties aan het gebouw. Aan het einde van de levensfase van het gebouw komt *embodied carbon* naar voren tijdens de ontmanteling van het gebouw en de verwerking van het bouwafval. Onderstaande figuur geeft het verschil tussen de *embodied* en *operational carbon* weer [13].



Figuur 1: Verschil tussen embodied en operational carbon [13]

De *embodied carbon* van gebouwen is naar schatting verantwoordelijk voor 11% van de wereldwijde koolstofuitstoot en 75% van de koolstofuitstoot van een gebouw gedurende de hele levenscyclus [14].

Figuur 2 illustreert een typische verdeling van koolstofemissies gedurende de hele levensduur voor verschillende gebouwtypes, waarbij het relatieve gewicht van *operational* en *embodied* carbon wordt gebruikt. De getoonde cijfers voor de hele levensduur houden rekening met alle componenten waaruit het gebouw is opgebouwd en bestrijken een bereik van productie tot afbraak gedurende een levenscyclus van 60 jaar [15].



Figuur 2: Aandeel embodied en operational carbon [15, p. 3]

2.6 Whole Life Carbon Assessment

In een Whole Life Carbon Assessment (WLCA) worden de milieueffecten van alle processen en grondstoffen, die nodig zijn om een product toe te passen, berekend. Een WLCA kan gedaan worden voor een materiaal, product en gebouw, maar ook voor een proces of een bedrijf. Het is een methode om de totale milieu-impact van een product te kwantificeren. Op deze manier kan inzicht verkregen worden in de kritische grondstoffen en kunnen alternatieven worden onderzocht [15].

Een WLCA dient te worden uitgevoerd tijdens de ontwerpfase, de bouwphase en na het afronden van de bouwphase. Op die manier kan al vroeg in de ontwerpfase worden bijgestuurd om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. In de ontwerpfase is er nog een groot potentieel om de uitstoot te verminderen. Dit reductiepotentieel neemt af naarmate de uitvoering van het project vordert [15].

Het resultaat van een WLCA kan gebruikt worden om de duurzaamheidsstrategie te bepalen en om de milieuprestatie te communiceren aan klanten of leveranciers. Het verschil tussen een WLCA en een CO₂-voetafdruk is dat een CO₂-voetafdruk alleen de koolstofdioxide-emissies kwantificeert, terwijl een WLCA meerdere broeikasgassen en milieu-impactcategorieën, zoals land- en watergebruik in rekening brengt [15].

Figuur 3 geeft een overzicht van de verschillende fases, waarmee rekening wordt gehouden tijdens een levenscyclusanalyse (WLCA).

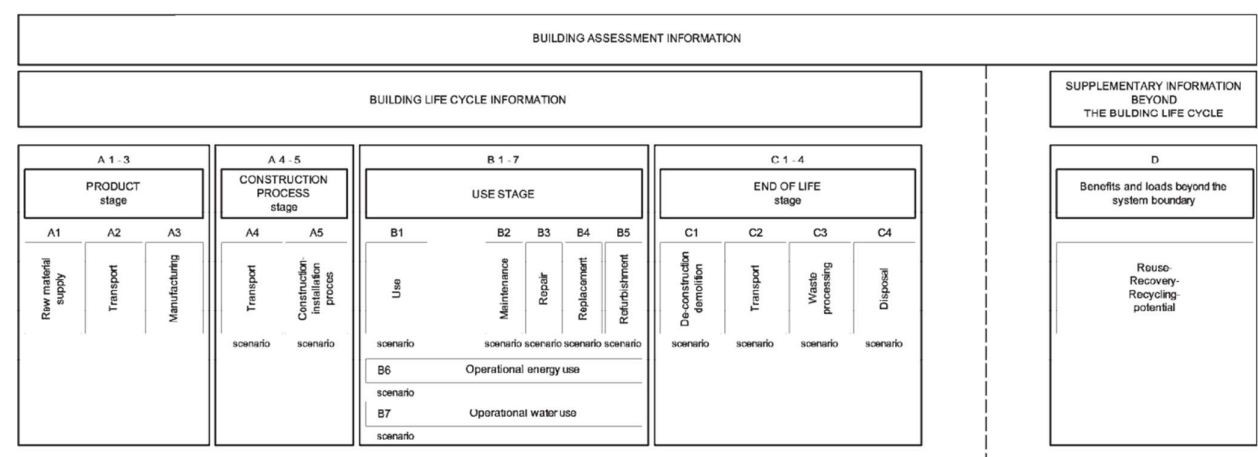


Figure 6 — Display of modular information for the different stages of the building assessment

Figuur 3: Overzicht verschillende fases WLCA [15, p. 21]

In dit onderzoek wordt er enkel rekening gehouden met de *product stage* (A1-A3) aangezien de product stage de grootste impact heeft op de totale broeikasgasemissies van een gebouw. Bovendien gaat deze masterproef de invloed van verschillende materiaalsoorten na op de totale CO₂e-emissies van een gebouw. Hierdoor is enkel de product stage relevant om in rekening te brengen tijdens dit onderzoek. In deze *product stage* wordt de uitstoot van de gebruikte materialen in rekening gebracht.

Dit gaat van het ontginnen van de grondstoffen, transport van de grondstoffen tot de productie van de gebruikte materialen [15].

De volgende fase is de *construction process stage* (A4-A5) en omvat de uitstoot die gepaard gaat met het transport van de materialen van de fabriek naar de projectsite en de plaatsing [15]. De *use stage* (B1-B7) is de voorlaatste fase in de WLCA en omvat de uitstoot tijdens de gehele gebruiksfase van het gebouw. Hierin wordt de *operational carbon*, watergebruik en uitstoot in verband met onderhoud, reparatie en vervanging van materialen en toestellen in rekening gebracht [15].

Op het einde van de WLCA wordt de uitstoot in de *end of life stage* (C1-C4) berekend. In deze laatste *stage* worden alle emissies, die ontstaan bij de ontmanteling, demontage en het vervoer van de materialen tot de verwerking van het afval in kaart gebracht [15].

3 Aanpak

3.1 One Click LCA

Om de broeikasgasemissies van de verschillende gebouwen te bepalen wordt gebruikgemaakt van de software One Click LCA. Dit is een geautomatiseerde life cycle assessment software die helpt om de milieu-impact van gebouwen en infrastructuurprojecten te bepalen. Met One Click LCA kunnen gebruikers de milieu-impact van verschillende ontwerpalternatieven en materialen evalueren gedurende de hele levenscyclus, van grondstoffenwinning tot productie, gebruik en uiteindelijke afbraak. Gebruikers dienen gegevens over een project in te voeren, inclusief informatie over het ontwerp, de materialen die worden gebruikt, energieverbruik en transport [16].

One Click LCA analyseert dan het project gedurende zijn hele levenscyclus, vanaf de winning van grondstoffen tot aan de afbraak. Daarnaast kijkt de software naar hoe het project het milieu beïnvloedt. De software berekent de milieu-impact van het project in verschillende categorieën, zoals klimaatverandering, waterverbruik en luchtverontreiniging. Dit omvat het meten van uitstoot van broeikasgassen en energieverbruik. One Click LCA helpt projectontwikkelaars om beslissingen te nemen die de milieu-impact verminderen en duurzame ontwikkeling bevorderen [16].

De software voldoet aan de bepalingen en vereisten van de normen EN 15978, ISO 21931-1 en ISO 21929. De verificatie van de naleving van deze normen houdt rekening met de vereisten voor gegevenskwaliteit zoals gespecificeerd in ISO 14040 en EN 15804, evenals relevante normatieve referenties [16].

3.2 Referentiegebouw

De plannen van het referentiegebouw van vijf verdiepingen zijn ter beschikking gesteld door Arcadis. Het gaat om een rechthoekig kantoorgebouw in Gent met een totale vloeroppervlakte van 7500 m². Voor deze masterproef worden de kelderverdiepingen niet in rekening gebracht. Figuur 4 toont het 3D-model van het referentiegebouw.



Figuur 4: 3D-model referentiegebouw

3.3 Werkwijze

Dit onderzoek maakt een onderscheid tussen drie verschillende gebouwtypes. Voor ieder gebouwtype wordt dezelfde methode gebruikt. De verschillende gebouwtypes, die worden vergeleken, zijn: een volledig betonnen gebouw, een hybride gebouw en een volledig houten gebouw. Het hybride gebouw bestaat uit houten vloerplaten, houten balken en houten kolommen in combinatie met prefab betonnen gevelelementen en prefab betonnen interne wanden.

Voor ieder gebouwtype worden nog eens drie verschillende gebouwen gedimensioneerd met verschillende afmetingen maar met dezelfde totale vloeroppervlakte. Alle gebouwen hebben een totale vloeroppervlakte van 7500 m² en zijn respectievelijk twee verdiepingen, vijf verdiepingen en acht verdiepingen hoog.

Om de resultaten overzichtelijk te houden wordt er altijd vergeleken met het referentiegebouw van vijf verdiepingen hoog. Tabel 1 geeft een duidelijk overzicht van de negen verschillende gebouwen en de bijhorende afmetingen die worden gebruikt in dit onderzoek.

Tabel 1: Overzicht verschillende gebouwen

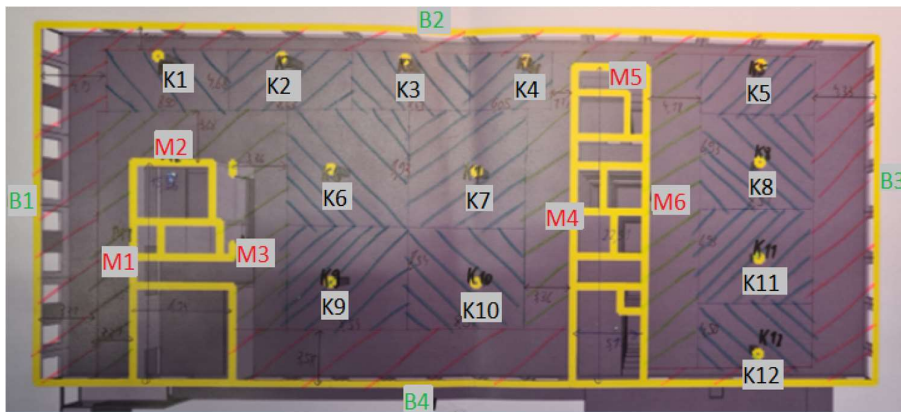
Betonnen gebouw	Hybride gebouw	Houten gebouw	Afmetingen grondvlak L x B
2 verdiepingen	2 verdiepingen	2 verdiepingen	94,41 x 39,72 m
5 verdiepingen	5 verdiepingen	5 verdiepingen	60,04 x 25,09 m
8 verdiepingen	8 verdiepingen	8 verdiepingen	47,20 x 19,86 m

Om de resultaten van de verschillende gebouwen te kunnen vergelijken zijn er enkele globale afspraken gemaakt. De *window-to-wall ratio* bedraagt voor alle gebouwen 47%. De verhouding van de lengte op de breedte bedraagt 2,4. Dit wordt gedaan aangezien de invloed van een fundering niet weg te denken is, maar het type fundering afhankelijk is van het project. Om een goede vergelijking te kunnen maken, wordt er onder ieder gebouw een funderingsplaat van 70 cm voorzien onder het volledige grondoppervlak. De totale lengte van de binnenmuren bedraagt steeds 721 m.

4 Broeikasgasemissie van het betonnen referentiegebouw (vijf verdiepingen)

4.1 Lastendaling

Allereerst is er een lastendaling uitgevoerd van het betonnen referentiegebouw met vijf identieke verdiepingen. Onderstaande figuur geeft weer wat het dragend oppervlak is van de verschillende kolommen en muren per verdieping.



Figuur 5: Dragend oppervlak van de muren en kolommen

Tabel 2 geeft een overzicht van de verschillende afmetingen van het gebouw.

Tabel 2: Afmetingen gebouw

Lengte gebouw	60,70 m
Breedte gebouw	25,75 m
Verdiepingshoogte	4,13 m
Dikte betonnen vloerplaten	30 cm
Dikte betonnen dakplaat	35 cm
Betonnen kolommen gelijkvloers en 1e verdieping	60 x 60 cm
Betonnen kolommen 2e, 3e en 4e verdieping	50 x 50 cm
Dikte betonnen dragende binnen- en buitenmuren	22 cm
Dikte betonnen funderingsplaat	70 cm

Wapening vloerplaten en wanden	45 kg/m ³
Wapening kolommen	140 kg/m ³

Vervolgens is de last, die iedere kolom en muur opneemt, bepaald. Op deze manier is dan de maximaal belaste kolom en maximaal belaste wand vastgesteld. De opgenomen belasting in de uiterste grenstoestand per element per verdieping wordt weergegeven in tabel A1 in bijlage A. Aangezien dat er gewerkt wordt in de uiterste grenstoestand worden de permanente lasten vermenigvuldigd met 1,35 en worden de veranderlijke lasten vermenigvuldigd met 1,50. Uit NBN EN 1991-1-1 blijkt dat de veranderlijke verdeelde last van een kantoorgebouw 3,0 kN/m² bedraagt.

Uit de lastendaling (tabel A1) blijkt dat buitenmuur 4, binnenmuur 6 en kolom 6 en 7 de zwaarst belaste elementen op iedere verdieping van de structuur zijn. Daarnaast blijkt dat iedere verdieping een bijkomende last uitoefent op de onderliggende verdieping van 29 692 kN in de uiterste grenstoestand.

4.2 Broeikasgasemissie

De berekening van de broeikasgasemissie is uitgevoerd met behulp van de software One Click LCA. In deze software zijn de materialen en de volumes van alle dragende elementen gedefinieerd. Voor dit onderzoek wordt enkel rekening gehouden met de *product stage* (A1-A3). De CO₂e-emissie bedraagt 1264 ton CO₂-equivalent. Er wordt uitgegaan van een ontwerplevensduur van het gebouw van 50 jaar. Tabel 3 geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 3: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	303
Buitenmuren	164
Kolommen en dragende wanden	201
Vloerplaten en balken	596
Totaal	1264

5 Broeikasgasemissie van het hybride gebouw (vijf verdiepingen)

5.1 Ontwerp

5.1.1 Materiaalkeuzes

Bij het hybride gebouw zijn de vloerplaten, balken en kolommen vervaardigd uit hout en zijn de gevelementen en dragende binnenwanden vervaardigd uit beton. De buitenafmetingen van het hybride gebouw zijn constant gehouden ten opzichte van het betonnen referentiegebouw. Er is gekozen voor deze hybride oplossing om meer inzicht te krijgen in de bijdrage aan broeikasgasemissies van de dragende en niet-dragende structuur. Het hybride gebouw is een tussenoplossing.

In het hybride gebouw zijn meer kolommen gebruikt ten opzichte van het betonnen gebouw, aangezien de maximale overspanning van houten balken kleiner is dan die van beton. Voor de vloerplaat is gekozen om te werken met *Cross Laminated Timber* (CLT). Voor de balken en kolommen is gekozen om te werken met gelijmd gelamineerd hout. Figuur 6 geeft het ontwerp van een verdieping met aanduiding van de kolommen en de zwaarst belaste vloerplaat.



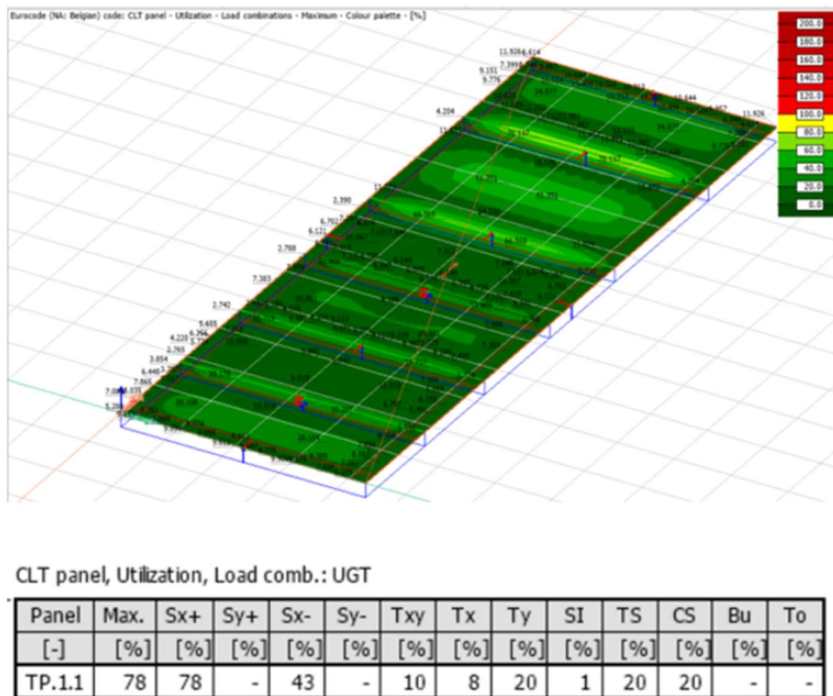
Figuur 6: Ontwerp verdieping hybride gebouw

5.1.2 Ontwerp vloerplaat

De vloerplaat is ontworpen met behulp van de software 'FEM Design 22 3D Structure'. Dit is een eindige elementensoftware waarmee het gebruikspercentage van elementen bepaald kan worden. In deze software is de maximaal belaste vloerplaat ingetekend.

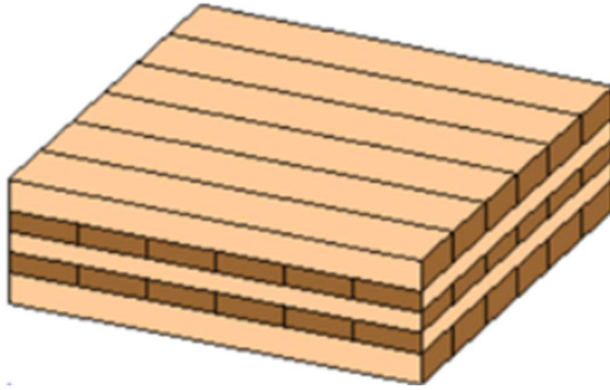
De reactiekrachten, die op de vloerplaat inwerken, zijn het eigengewicht en de verdeelde variabele kantoorbelasting. Voor het eigengewicht van de vloeropbouw wordt uitgegaan van een waarde van $0,5 \text{ kN/m}^2$ en de verdeelde variabele kantoorbelasting bedraagt $3,0 \text{ kN/m}^2$. De vloerplaat wordt uitgerekend in de uiterste grenstoestand.

Onderstaande figuur geeft weer dat een CLT 120 L5s plaat in de uiterste grenstoestand voor 78% van zijn totale capaciteit gebruikt wordt. Met als gevolg dat CLT 120 L5s geschikt is als vloerplaat.



Figuur 7: Gebruikspercentage CLT 120 L5s vloerplaat

Figuur 8 toont de structuur van CLT 120 L5s. CLT 120 L5s bestaat uit vijf lagen met een totale dikte van 120 mm. Zoals zichtbaar op de figuur liggen de vezels van de lagen loodrecht op elkaar. Het hout waaruit de verschillende lagen bestaan is C24-hout. De bovenste en onderste laag hebben een dikte van 30 mm en de overige lagen hebben een dikte van 20 mm. Het eigengewicht van deze vloerplaat bedraagt $0,5 \text{ kN/m}^2$.



Figuur 8: Opbouw CLT 120 L5s

5.1.3 Ontwerp balken

Uit de afmetingen van de vloerplaat op figuur 6 kan wordt afgeleid dat balk 'B34' het zwaarst belast wordt. Alle balken worden gedimensioneerd op basis van deze zwaarst belaste balk. De last van de vloerplaat wordt in beide richtingen evenveel afgedragen. De lijnlast in de uiterste grenstoestand op deze balk bedraagt 15,8 kN/m.

Met behulp van de software 'FEM Design 22 3D Structure' is bekomen dat balken uit gelijmd gelamineerd hout GL36h met afmetingen 215 x 405 mm voldoen (zie figuur B4 in bijlage B).

5.1.4 Ontwerp kolommen

Voor het ontwerp van de kolommen is er een onderscheid gemaakt tussen drie verschillende soorten kolommen: de randkolommen, kolommen type A en kolommen type B. Kolommen type A zijn de kolommen in het gebouw die gesitueerd zijn op het gelijkvloers en op de eerste verdieping. Kolommen type B zijn de kolommen die gesitueerd zijn op de drie bovenste verdiepingen. Dit onderscheid wordt gemaakt omdat de kolommen onderaan in het gebouw meer last moeten dragen dan de kolommen bovenaan in het gebouw.

De kolommen zijn gedimensioneerd met de software 'Stora Enso Calculatis'. In deze software moeten de afmetingen, randvoorwaarden en de belasting gedefinieerd worden. Stora Enso Calculatis kan met deze gegevens het gebruikspercentage bepalen.

Het materiaal van alle kolommen is GL30h. De belastingen die in rekening worden gebracht zijn: het eigengewicht, het gewicht van de bovenliggende structuur en de veranderlijke variabele kantoorbelasting. De berekening wordt uitgevoerd in de uiterste grenstoestand. Tabel 4 geeft een overzicht van de afmetingen van de verschillende kolomtypes.

Tabel 4: Overzicht afmetingen kolommen

Type kolom	Afmetingen
Type A	400 x 400 mm
Type B	300 x 300 mm
Randkolommen	350 x 350 mm

5.2 Broeikasgasemissie

Met behulp van de software One Click LCA is de broeikasgasemissie van *stage A1-A3* van het hybride gebouw bepaald, deze bedraagt 774 ton CO₂-equivalent. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 5: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	303
Buitenmuren	163
Kolommen en dragende wanden	196
Vloerplaten en balken	112
Totaal	774

6 Broeikasgasemissie van het houten gebouw (vijf verdiepingen)

6.1 Ontwerp

Bij het houten gebouw is zowel de dragende als de niet-dragende structuur gedimensioneerd uit hout. De buitenafmetingen van het houten gebouw zijn constant gehouden ten opzichte van het betonnen referentiegebouw. Bij het houten gebouw zijn alle binnenwanden als niet-dragend ontworpen, enkel de vloeren, balken en kolommen zorgen voor de dragende structuur.

6.1.1 Materiaalkeuzes draagstructuur

De draagstructuur van het houten gebouw is identiek aan die van het hybride gebouw. De vloeren bestaan uit CLT 120 L5s platen, de balken zijn van het houttype GL36h en de afmetingen ervan bedragen 215 x 405 mm. De kolommen komen overeen met de kolommen van het hybride gebouw, ook hier is gekozen om te werken met GL30h.

Tabel 6 geeft de afmetingen van de kolommen weer. De kolommen type A worden geplaatst op het gelijkvloers en op de eerste verdieping, De kolommen type B worden geplaatst op de bovenste drie verdiepingen.

Tabel 6: Overzicht afmetingen kolommen

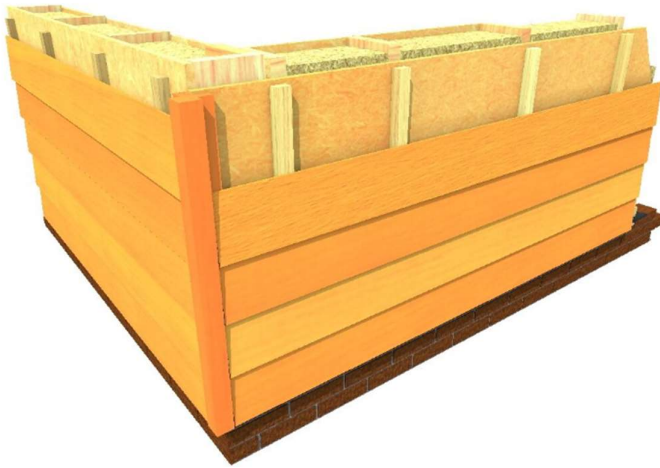
Type kolom	Afmetingen
Type A	400 x 400 mm
Type B	300 x 300 mm
Randkolommen	350 x 350 mm

6.1.2 Materiaalkeuzes niet-dragende structuur

De niet-dragende structuur bestaat uit de gevelwanden en de binnenwanden. Beide elementen hebben een verschillende opbouw.

De gevelwanden zijn opgebouwd uit een houten raamwerk vervaardigd uit vurenhouten balken (38 x 140 mm). Aan de binnenzijde van de wand zijn gipsplaten met een dikte van 15 mm voorzien. Bovendien zijn aan de binnenzijde van het houten raamwerk OSB-platen voorzien van 15 mm dik. Als isolatie is er gekozen voor steenwolisolatie (140 mm). Aan de buitenzijde van het houten raamwerk worden houtvezelplaten van 15 mm dik voorzien. Om een ventilatiespouw van 28 mm te realiseren is gekozen voor balkjes met een dikte van 28 mm waarop de gevelbekleding wordt vastgemaakt. De

gevelbekleding bestaat uit cederhout met een dikte van 20 mm. Figuur 9 illustreert de opbouw van de gevelwand.



Figuur 9: Illustratie houten gevelwand [17]

De houten binnenwanden bestaan uit een houten raamwerk van vurenhouten balken met een doorsnede van 38 x 140 mm. Aan beide zijden van de wand worden OSB-platen voorzien van 15 mm dik. Als isolatie is er gekozen voor minerale wol (70 mm). Aan beide zijden zijn de binnenwanden afgewerkt met gipsplaten van 15 mm dik. Figuur 10 geeft de opbouw van de houten binnenwand weer.



Figuur 10: Houten binnenwand [18]

6.2 Broeikasgasemissie

De CO₂e-emissie van *stage A1-A3* van het houten gebouw bedraagt 524 ton CO₂. Tabel 7 geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 7: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	303
Buitenmuren	69
Kolommen	15
Vloerplaten en balken	112
Niet-dragende binnenwanden	25
Totaal	524

7 Vergelijking van de resultaten

Tabel 8 geeft een overzicht van de CO₂e-emissies van *stage A1-A3* van de drie verschillende gebouwen. Hieruit kan besloten worden dat de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 42% bedraagt van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het betonnen gebouw. Bovendien bedraagt de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 68% van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het hybride gebouw. Hieruit kan besloten worden dat hoe meer beton vervangen wordt door hout in de constructie, hoe lager de CO₂e-emissies van het gebouw zullen zijn.

Tabel 8: CO₂e-uitstoot (ton CO₂e) van de drie gebouwen van vijf verdiepingen

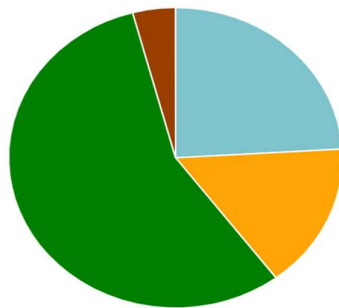
	Betonnen gebouw	Hybride gebouw	Houten gebouw
CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e)	1264	774	524

De betonnen funderingsplaat is bij elk van de drie gebouwen hetzelfde. Deze funderingsplaat zorgt voor 303 ton CO₂e.

Bij het betonnen gebouw wordt de grootste bijdrage (56,1%) aan de broeikasgasemissie geleverd door de gevelelementen. De fundering zorgt voor de tweede grootste bijdrage (24,1%). Figuur 11 geeft een overzicht van de verschillende elementen die een bijdrage leveren aan de CO₂e-uitstoot van het betonnen gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 24.1%
- 1.2 Load bearing structural frame - 15.7%
- 1.2.3 External walls - 56.1%
- 1.3.1 Ground floor slab - 4.1%

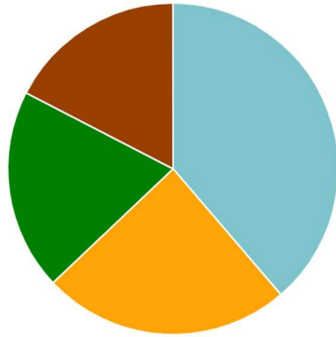


Figuur 11: Global warming kg CO₂e betonnen gebouw (vijf verdiepingen)

Bij het hybride gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor de grootste bijdrage (38,7%) aan de CO₂e-uitstoot. De tweede grootste bijdrage (22,0%) wordt geleverd door de betonnen balken, kolommen en dragende muren. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het hybride gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 38.7%
- 1.2 Load bearing structural frame - 24.2%
- 1.2.3 External walls - 19.6%
- 1.3.1 Ground floor slab - 17.4%

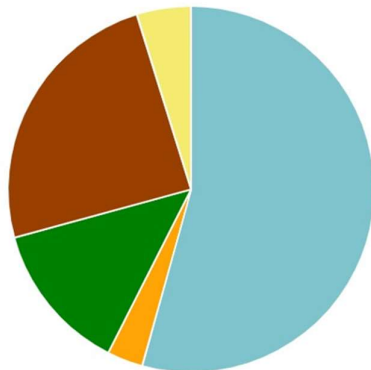


Figuur 12: Global warming kg CO₂e hybride gebouw (vijf verdiepingen)

Bij het houten gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor 54,3% van de totale CO₂e-uitstoot. De tweede grootste bijdrage aan de CO₂e-emissie wordt geleverd door de CLT-vloerplaten, deze leveren een bijdrage van 24,4%. Figuur 13 geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het houten gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 54.3%
- 1.2 Load bearing structural frame - 3.2%
- 1.2.3 External walls - 13.3%
- 1.3.1 Ground floor slab - 24.4%
- 1.3.2 Internal walls, partitions and doors - 4.8%

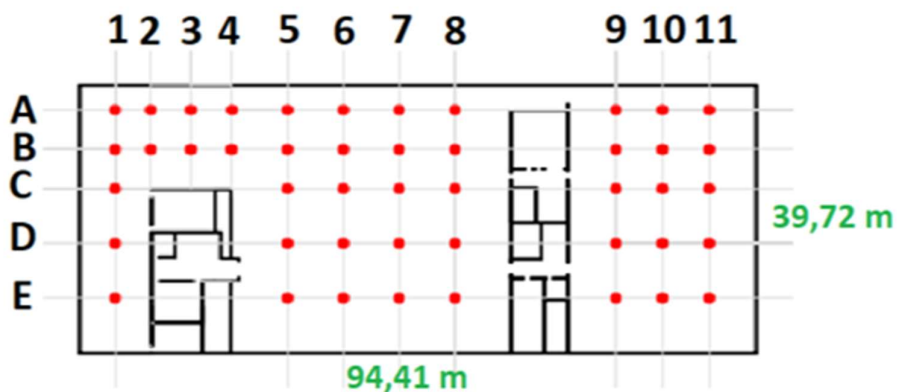


Figuur 13: Global warming kg CO₂e houten gebouw (vijf verdiepingen)

8 Gebouw van twee verdiepingen

8.1 Ontwerp gebouw

Figuur 14 toont het grondplan voor het gebouw van twee verdiepingen. Het grondplan van het gelijkvloers is identiek aan het grondplan van de eerste verdieping. Per verdieping worden 46 kolommen geplaatst in het gebouw. De hoogte van iedere verdieping bedraagt 4,13 m.



Figuur 14: Aanduiding kolommen en balken voor gebouw van twee verdiepen

8.2 Betonnen gebouw

8.2.1 Ontwerp

De gebruikte materialen van het betonnen gebouw van twee verdiepingen komen overeen met die van het betonnen gebouw van vijf verdiepingen. Het volume van de betonnen funderingsplaat is toegenomen met een factor van 2,4. De totale buitengeveloppervlakte bedraagt 2414 m², rekening houdend met de window-to-wall ratio van 47% bedraagt de totale buitenmuuroppervlakte dan 1279 m².

Daarnaast kunnen de kolommen slanker uitgevoerd worden, aangezien de betonnen kolommen een kleinere belasting moeten dragen. De maximaal op te vangen belasting is verkregen door een lastendaling uit te voeren.

De meest belaste kolom is K.7.D. Deze kolom draagt een vloeroppervlakte van 64 m². In de uiterste grenstoestand bedraagt de maximaal op te vangen belasting 4402 kN. De afmeting van de vierkante kolommen bedraagt 40 cm. Deze afmetingen zijn bekomen door een controle te doen op de maximale drukspanning in het beton (1). Er wordt uitgegaan van betonsoort C30/37.

$$\sigma_{optredend} = \frac{4402 \cdot 10^3}{400 \cdot 400} = 27,51 \frac{N}{mm^2} < \sigma = 30 \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK} \quad (1)$$

Ook zijn de kolommen gecontroleerd op knik m.b.v. de knikformule van Euler (2). Voor de veiligheid wordt er uitgegaan van een knikgetal van 5. Bijgevolg moet N_{Euler} groter zijn dan de maximaal op te vangen belasting vermenigvuldigd met 5. De afmeting van 400 mm werd ingevuld in het traagheidsmoment I .

$$N_{\text{Euler}} = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{L_0^2} = \frac{33000 \cdot \frac{400^4}{12} \cdot \pi^2}{4130^2} = 40735 \text{ kN} > 22010 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad (2)$$

8.2.2 Broeikasgasemissie

Met behulp van de software One Click LCA werd de CO₂e-emissie van *stage A1-A3* van het betonnen gebouw bepaald, deze bedraagt 1810 ton CO₂e. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de resultaten, die gegenereerd zijn door One Click LCA.

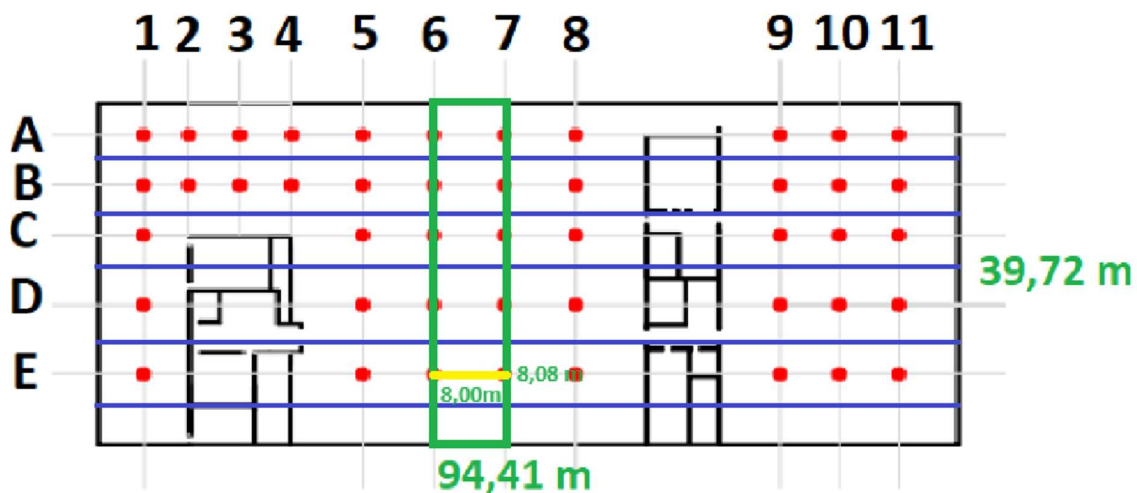
Tabel 9: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	756
Buitenmuren	144
Kolommen en dragende wanden	188
Vloerplaten en balken	722
Totaal	1810

8.3 Hybride gebouw

8.3.1 Ontwerp vloerplaat

De vloerplaat is ontworpen m.b.v. de software 'FEM Design 22 3D Structure'. Figuur 15 geeft de zwaarst belaste vloerplaat weer. Er zijn extra balken toegevoegd om de overspanningen te beperken. Deze balken worden aangeduid in onderstaande figuur met blauwe lijnen.



Figuur 15: Zwaarst belaste vloerplaat hybride gebouw (twee verdiepingen)

8.3.2 Ontwerp balken

Uit de afmetingen van de vloerplaat op figuur 15 kan worden afgeleid dat balk 'E67' het zwaarst belast wordt. Alle balken worden gedimensioneerd op basis van deze zwaarst belaste balk. De last van de vloerplaat wordt in beide richtingen evenveel afgedragen. De lijnlast in de uiterste grenstoestand op deze balk bedraagt 14,0 kN/m.

Met behulp van de software 'FEM Design 22 3D Structure' is bekomen dat balken uit gelijmd gelamineerd hout GL36h met afmetingen 215 x 405 mm voldoen (zie figuur C3 in bijlage C).

8.3.3 Ontwerp kolommen

Voor de kolommen is er een onderscheid gemaakt tussen de randkolommen en de traditionele kolommen. Met behulp van de software 'Stora Enso Calculatis' zijn de afmetingen van de houten kolommen bepaald. De afmetingen van de vierkante randkolommen en middenkolommen zijn 250 x 250 mm (zie figuren C4 en C5 in bijlage C).

8.3.4 Broeikasgasemissie

De CO₂e-emissie van *stage A1-A3* van het hybride gebouw bedraagt 1260 ton CO₂e. Tabel 11 geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 10: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	756
Buitenmuren	144
Kolommen en dragende wanden	187
Vloerplaten en balken	173
Totaal	1260

8.4 Houten gebouw

8.4.1 Materiaalkeuzes draagstructuur

De draagstructuur van het houten gebouw is identiek aan die van het hybride gebouw. De vloeren bestaan uit CLT 190 L5s platen, de balken zijn van het houttype GL36h en de afmetingen ervan bedragen 215 x 405 mm.

Alle kolommen zijn vervaardigd uit gelijmd gelamineerd hout (GL30h). Zowel de randkolommen als de interne kolommen hebben een doorsnede van 250 x 250 mm. De opbouw van de gevel- en binnenwanden zijn identiek aan deze voor het houten gebouw van vijf verdiepingen (zie 6.1.2).

8.4.2 Broeikasgasemissie

De CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw bedraagt 992 ton CO₂e. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 11: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	756
Buitenmuren	37
Kolommen	6
Vloerplaten en balken	173
Niet-dragende binnenwanden	20
Totaal	992

8.5 Vergelijking van de resultaten

Tabel 13 geeft een overzicht van de CO₂e-emissies van *stage A1-A3* van de drie verschillende gebouwen. Hieruit kan besloten worden dat de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 55% bedraagt van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het betonnen gebouw. Bovendien bedraagt de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 79% van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het hybride gebouw. Hieruit kan besloten worden dat hoe meer beton vervangen wordt door hout in de constructie, hoe lager de CO₂e-emissie van het gebouw zal zijn.

Tabel 12: CO₂e-uitstoot (ton CO₂e) van de drie gebouwen van twee verdiepingen

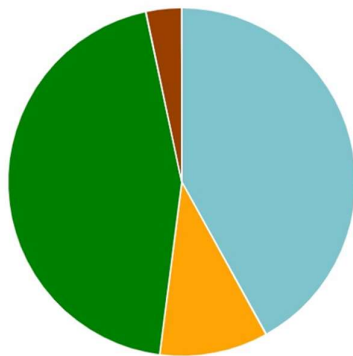
	Betonnen gebouw	Hybride gebouw	Houten gebouw
CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e)	1810	1260	992

De betonnen funderingsplaat is bij elk van de drie gebouwen hetzelfde. Deze funderingsplaat zorgt voor 756 ton CO₂e.

Bij het betonnen gebouw wordt de grootste bijdrage (44,6%) aan de CO₂e-emissie geleverd door de gevelelementen. De fundering zorgt voor de tweede grootste bijdrage (41,9%). Figuur 16 geeft een overzicht van de verschillende elementen die een bijdrage leveren aan de CO₂e-uitstoot van het betonnen gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 41.9%
- 1.2 Load bearing structural frame - 10.1%
- 1.2.3 External walls - 44.6%
- 1.3.1 Ground floor slab - 3.3%

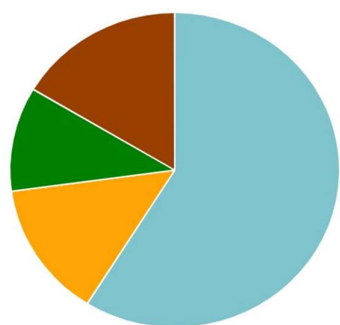


Figuur 16: Global warming kg CO₂e betonnen gebouw (twee verdiepingen)

Bij het hybride gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor de grootste bijdrage (58,9%) aan de CO₂e-uitstoot. De tweede grootste bijdrage (16,4%) wordt geleverd door de CLT-vloerplaten. Figuur 17 geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het hybride gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 58.9%
- 1.2 Load bearing structural frame - 13.9%
- 1.2.3 External walls - 10.7%
- 1.3.1 Ground floor slab - 16.4%

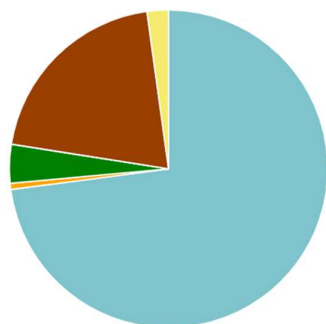


Figuur 17: Global warming kg CO₂e hybride gebouw (twee verdiepingen)

Bij het houten gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor 72,9% van de totale CO₂e-emissie. De tweede grootste bijdrage aan de CO₂e-uitstoot wordt geleverd door de CLT-vloerplaten, deze leveren een bijdrage van 20,3%. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het houten gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 72.9%
- 1.2 Load bearing structural frame - 0.6%
- 1.2.3 External walls - 3.9%
- 1.3.1 Ground floor slab - 20.3%
- 1.3.2 Internal walls, partitions and doors - 2.2%

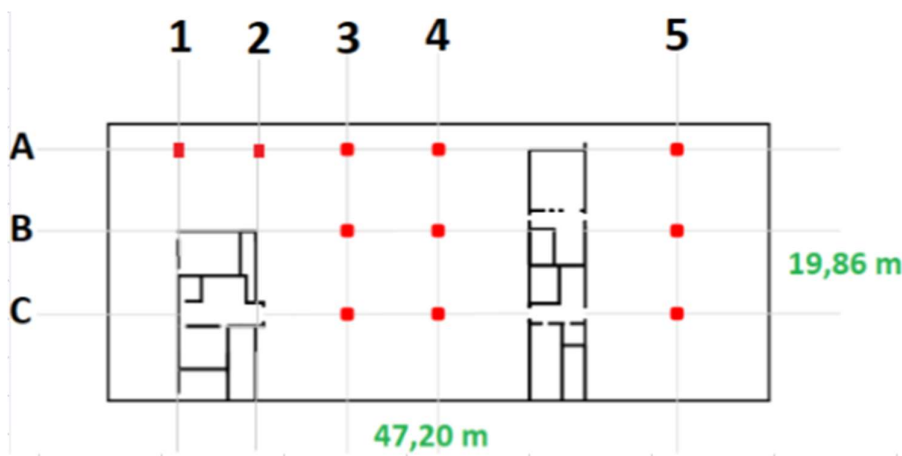


Figuur 18: Global warming kg CO₂e houten gebouw (twee verdiepingen)

9 Gebouw van acht verdiepingen

9.1 Ontwerp gebouw

Onderstaande figuur geeft het grondplan weer voor het gebouw van acht verdiepingen. Het gebouw is 47,20 m lang en 19,86 m breed. Het grondplan van het gelijkvloers is identiek aan het grondplan van de zeven andere verdiepingen. Per verdieping worden er 11 kolommen geplaatst in het gebouw. De hoogte van iedere verdieping bedraagt 4,13 m.



Figuur 19: Aanduiding kolommen en balken voor gebouw van acht verdiepen

9.2 Betonnen gebouw

9.2.1 Ontwerp

De gebruikte materialen van het betonnen gebouw van acht verdiepingen komen overeen met die van het betonnen gebouw van vijf verdiepingen. Het volume van de betonnen funderingsplaat is afgenomen met een factor van 0,6. De totale buitengeveleppervlakte bedraagt 4828 m², rekening houdend met de window-to-wall ratio van 47% bedraagt de buitenmuuroppervlakte 2578 m².

Daarnaast dienen de kolommen op de onderste verdiepingen zwaarder uitgevoerd te worden dan de kolommen op de bovenste verdiepingen, aangezien de betonnen kolommen op de onderste verdiepingen een grotere belasting dragen.

De meest belaste kolom is K.4.C. Deze kolom draagt een oppervlak van 40 m². Voor de kolommen op de vier bovenste verdiepingen bedraagt de maximaal op te vangen belasting in de uiterste grenstoestand 3457 kN en voor de onderste vier verdiepingen bedraagt dit 6419 kN.

Bovendien wordt er uitgegaan van betonsoort C30/37. De kolommen zijn gecontroleerd op druksterkte en op knik. De knik is gecontroleerd met de formule van Euler en er is voor de veiligheid uitgegaan van een knikgetal van 5. De berekeningen van deze kolommen zijn opgenomen in bijlage D. De afmetingen van de vierkante kolommen op de onderste vier verdiepingen bedragen 50 x 50 cm en op de bovenste vier verdiepingen bedragen de afmetingen 35 x 35 cm.

9.2.2 Broeikasgasemissie

Met behulp van de software One Click LCA werd de broeikasgasemissie van *stage A1-A3* van het betonnen gebouw bepaald, deze bedraagt 1260 ton CO₂e. Tabel 14 geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

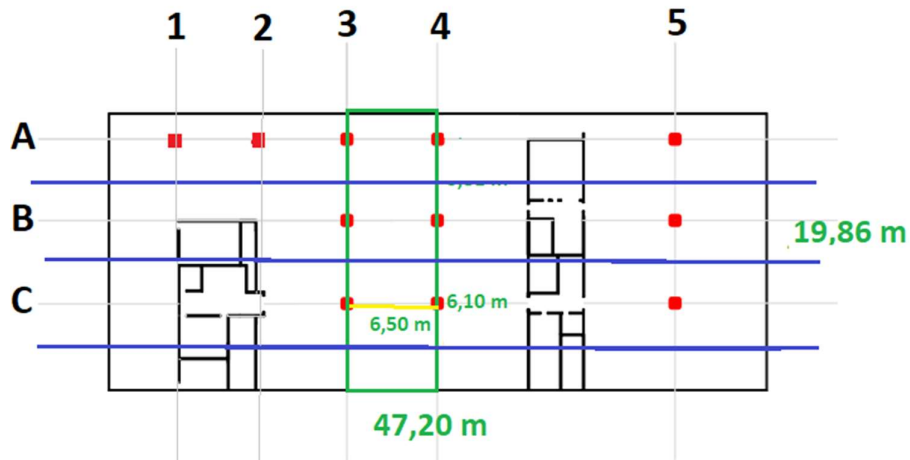
Tabel 13: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	189
Buitenmuren	161
Kolommen en dragende wanden	188
Vloerplaten en balken	722
Totaal	1260

9.3 Hybride gebouw

9.3.1 Ontwerp vloerplaat

De vloerplaat is ontworpen m.b.v. de software 'FEM Design 22 3D Structure'. Figuur 20 geeft de zwaarst belaste vloerplaat weer. Er zijn extra balken toegevoegd om de overspanningen te beperken. Deze balken worden aangeduid in onderstaande figuur met blauwe lijnen. Een vloerplaat uit CLT 140 L5s voldoet volgens de gebruikte ontwerpsoftware. In bijlage D zijn de uitgevoerde analyses toegevoegd.



Figuur 20: Zwaarst belaste vloerplaat hybride gebouw (acht verdiepingen)

9.3.2 Ontwerp balken

Uit de afmetingen van de vloerplaat op figuur 20 kan worden afgeleid dat balk 'C34' het zwaarst belast wordt. Alle balken worden gedimensioneerd op basis van deze zwaarst belaste balk. De last van de vloerplaat wordt in beide richtingen evenveel afgedragen. De lijnlast in de uiterste grenstoestand op deze balk bedraagt 10,1 kN/m.

Met behulp van de software 'FEM Design 22 3D Structure' is gekomen dat balken uit gelijmd gelamineerd hout GL36h met afmetingen 190 x 225 mm voldoen (bijlage D).

9.3.3 Ontwerp kolommen

Voor de kolommen is er een onderscheid gemaakt tussen de randkolommen, de kolommen op de onderste vier verdiepingen (type A) en de kolommen op de bovenste vier verdiepingen (type B). Met behulp van de software 'Stora Enso Calculatis' zijn de afmetingen van de houten kolommen bepaald (bijlage D).

Tabel 14: Overzicht afmetingen kolommen

Type kolom	Afmetingen
Type A	350 x 350 mm
Type B	300 x 300 mm
Randkolommen	350 x 350 mm

9.3.4 Broeikasgasemissie

De CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het hybride gebouw bedraagt 667 ton CO₂e. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 15: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	189
Buitenmuren	161
Kolommen en dragende wanden	196
Vloerplaten en balken	121
Totaal	667

9.4 Houten gebouw

9.4.1 Materiaalkeuzes draagstructuur

De draagstructuur van het houten gebouw is identiek aan die van het hybride gebouw. De vloeren bestaan uit CLT 140 L5s platen, de balken zijn van het houttype GL36h en de afmetingen ervan bedragen 190 x 225 mm.

Alle kolommen zijn vervaardigd uit gelijmd gelamineerd hout (GL30h). De randkolommen en de kolommen op de onderste vier verdiepingen hebben een doorsnede van 350 x 350 mm. De kolommen op de bovenste vier verdiepingen hebben een doorsnede van 300 x 300 mm.

De opbouw van de gevel- en binnenwanden zijn identiek aan deze voor het houten gebouw van vijf verdiepingen (zie 6.1.2).

9.4.2 Broeikasgasemissie

De broeikasgasemissie van *stage A1-A3* van het houten gebouw bedraagt 427 ton CO₂e. Tabel 17 geeft een overzicht van de uitstoot per gebouwelement.

Tabel 16: CO₂e-uitstoot per gebouwelement

Gebouwelement	CO ₂ e-uitstoot (ton)
Fundering	189
Buitenmuren	76
Kolommen	16
Vloerplaten en balken	121
Niet-dragende binnenwanden	25
Totaal	427

9.5 Vergelijking van de resultaten

Tabel 18 geeft een overzicht van de CO₂e-emissies van *stage A1-A3* van de drie verschillende gebouwen. Hieruit kan besloten worden dat de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 34% bedraagt van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het betonnen gebouw. Bovendien bedraagt de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het houten gebouw 64% van de CO₂e-uitstoot van *stage A1-A3* van het hybride gebouw. Hieruit kan besloten worden dat hoe meer beton vervangen wordt door hout in de constructie, hoe lager de CO₂e-emissie van het gebouw zal zijn.

Tabel 17: CO₂e-uitstoot (ton CO₂e) van de drie gebouwen van acht verdiepingen

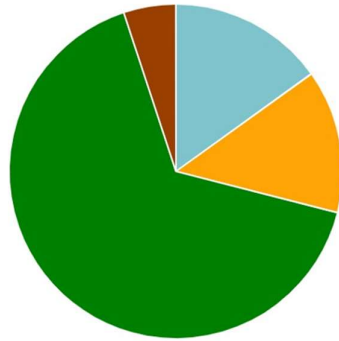
	Betonnen gebouw	Hybride gebouw	Houten gebouw
CO ₂ e-uitstoot (ton CO ₂ e)	1260	667	427

De betonnen funderingsplaat is bij elk van de drie gebouwen hetzelfde. Deze funderingsplaat zorgt voor 189 ton CO₂e.

Bij het betonnen gebouw wordt de grootste bijdrage (66,0%) aan de totale CO₂e-uitstoot geleverd door de gevelelementen. De fundering zorgt voor de tweede grootste bijdrage (15,1%). Figuur 21 geeft een overzicht van de verschillende elementen die een bijdrage leveren aan de broeikasgasemissie van het betonnen gebouw.

Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 15.1%
- 1.2 Load bearing structural frame - 13.9%
- 1.2.3 External walls - 66.0%
- 1.3.1 Ground floor slab - 5.1%

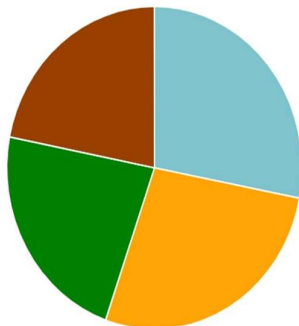


Figuur 21: Global warming kg CO₂e betonnen gebouw (acht verdiepingen)

Bij het hybride gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor de grootste bijdrage (28,0%) aan de totale broeikasgasemissie. De tweede grootste bijdrage (27,4%) wordt geleverd door de betonnen binnenwanden. Figuur 22 geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het hybride gebouw.

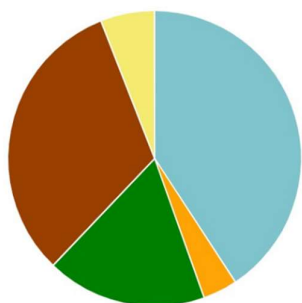
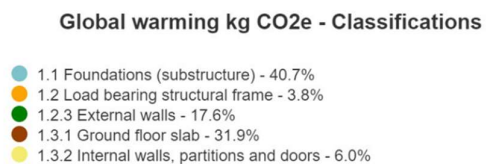
Global warming kg CO₂e - Classifications

- 1.1 Foundations (substructure) - 28.0%
- 1.2 Load bearing structural frame - 27.4%
- 1.2.3 External walls - 22.7%
- 1.3.1 Ground floor slab - 21.9%



Figuur 22: Global warming kg CO₂e hybride gebouw (acht verdiepingen)

Bij het houten gebouw zorgt de betonnen funderingsplaat voor 40,7% van de totale CO₂e-emissie. De tweede grootste bijdrage aan de broeikasgasemissie wordt geleverd door de CLT-vloerplaten, deze leveren een bijdrage van 31,9%. Figuur 23 geeft een overzicht van de bijdrage aan de CO₂e-uitstoot van de verschillende bouwelementen van het houten gebouw.

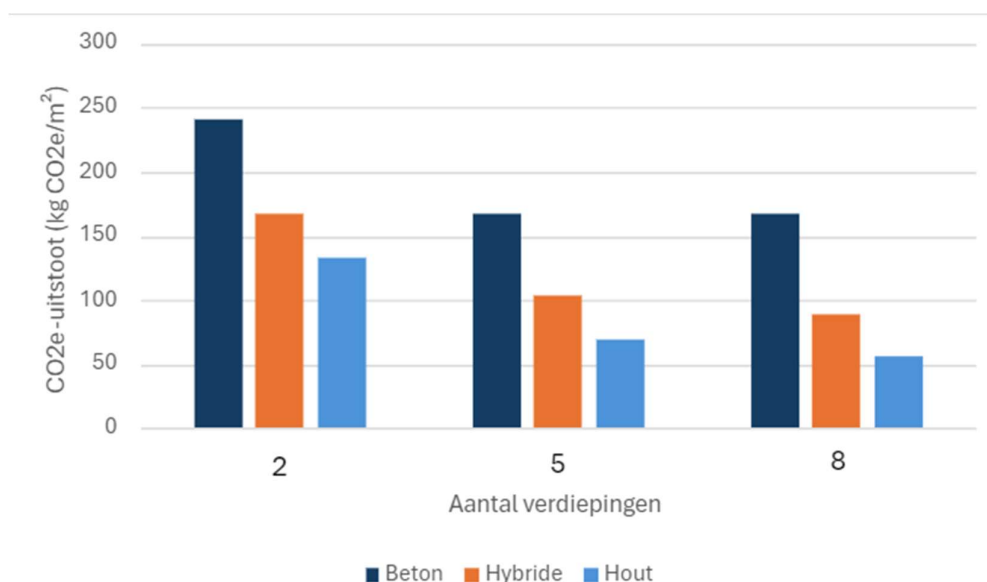


Figuur 23: Global warming kg CO₂e houten gebouw (acht verdiepingen)

10 Vergelijking tussen de gebouwen met verschillende vorm

Onderstaand staafdiagram geeft de CO₂e-uitstoot in functie van het aantal verdiepingen weer voor fase A1 tot en met fase A3. Hieruit kan worden besloten dat de CO₂e-uitstoot voor het gebouw van twee verdiepingen hoger is dan voor de gebouwen met vijf en acht verdiepingen.

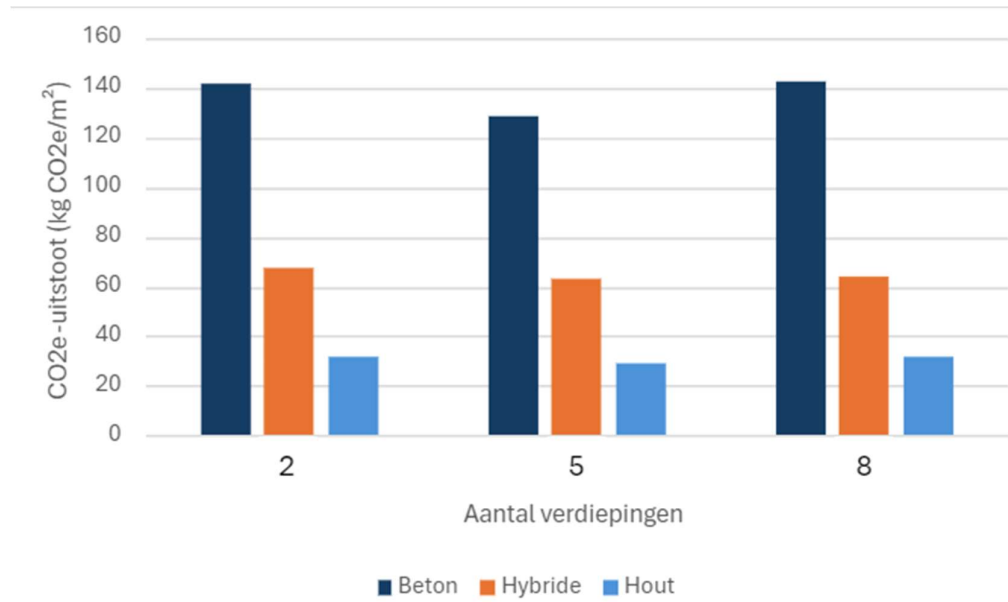
Een tweede besluit dat genomen kan worden is dat de CO₂e-uitstoot voor het houten gebouw voor iedere gebouwhoogte lager is dan de CO₂e-uitstoot van het hybride en betonnen gebouw.



Figuur 24: CO₂e-uitstoot (kg CO₂/m²) i.f.v. het aantal verdiepingen van fase A1 t.e.m. fase A3

De betonnen funderingszool van 70 cm dik zorgt voor een sterke toename van de CO₂e-uitstoot bij ieder gebouw. Dit zorgt ervoor dat het onderlinge verschil van de CO₂e-uitstoot tussen de verschillende bouwmaterialen kleiner wordt. Dit geeft een vertekend beeld van de werkelijkheid aangezien een houten gebouw in werkelijkheid op een lichtere fundering geplaatst kan worden dan een betonnen gebouw.

Daarom wordt op onderstaand staafdiagram, dat de CO₂e-uitstoot in functie van het aantal verdiepingen weergeeft voor fase A1 tot en met fase A3, deze betonnen funderingszool niet in rekening gebracht. Hieruit blijkt dat het relatieve verschil in CO₂e-uitstoot tussen het betonnen en het houten gebouw veel groter wordt. Daarnaast speelt het aantal verdiepingen een veel kleinere rol voor de CO₂e-uitstoot voor ieder bouw materiaal.



Figuur 25: CO₂e-uitstoot (kg CO₂/m²) i.f.v. het aantal verdiepingen van fase A1 t.e.m. fase A3 zonder de fundering

11 Besluit

Om de wereldwijde toenemende broeikasgasuitstoot te beperken is het noodzakelijk om naast de *operational carbon* ook de *embodied carbon* van gebouwen te onderzoeken. Aangezien de *embodied carbon* een grotere invloed heeft op de broeikasgasuitstoot dan de *operational carbon*. Doordat de bouwsector een aanzienlijk aandeel heeft in de wereldwijde totale broeikasgasuitstoot is het van groot belang om deze emissies in kaart te brengen. Dit is de reden dat deze masterproef als hoofddoel heeft om de materiaalgerelateerde CO₂e-uitstoot van een betonnen, hybride en houten gebouw met dezelfde structurele eigenschappen te vergelijken.

Uit het gevoerde onderzoek kan geconcludeerd worden dat naarmate er meer beton vervangen wordt door hout, de CO₂e-emissie van het gebouw aanzienlijk afneemt in de *product stage* (A1-A3). Dit komt doordat houten elementen een kleinere uitstoot van broeikasgassen hebben tijdens het ontginnings- en verwerkingsproces dan betonnen elementen. Een tweede conclusie die getrokken kan worden, is dat een lager gebouw een hogere CO₂e-uitstoot tijdens de *product stage* heeft dan een hoger gebouw met dezelfde vloeroppervlakte en dezelfde dikte van de funderingsplaat. Dit komt doordat bij een lager gebouw de funderingsplaat een groter volume zal hebben dan bij een hoger gebouw met dezelfde totale vloeroppervlakte. Aangezien de fundering een aanzienlijke invloed heeft op de totale broeikasgasemissie is een nauwkeurige berekening van de fundering belangrijk. De berekening voor de fundering is voor elke case verschillend, aangezien deze naast het gewicht van het gebouw ook afhankelijk is van de ondergrond. Dit is de reden dat een goede studie van de ondergrond van groot belang is. Zonder rekening te houden met de aanzienlijke invloed van de funderingsplaat, bedraagt de uitstoot van broeikasgassen tijdens de *product stage* van een houten en hybride gebouw in alle gevallen minder dan die van een betonnen gebouw.

Toekomstig onderzoek zou de volledige levenscyclus (WLCA) van het gebouw in rekening kunnen brengen om op deze manier een beeld te krijgen van de broeikasgasemissie van het gebouw gedurende zijn volledige levensduur.

Daarnaast zou het ook mogelijk zijn om een applicatie te maken, die het ideale materiaalgebruik en de optimale vorm van het gebouw kan bepalen. Op deze manier kunnen gebouwen zo duurzaam mogelijk worden ontworpen. Bovendien zou het interessant zijn dat deze applicatie de meest optimale fundering uitrekent, zodat de hoeveelheid gebruikte beton beperkt kan blijven tot het minimum.

Referentielijst

- [1] ipcc, „Headline Statements,” [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements>. [Geopend 20 september 2023].
- [2] Arcadis, „In stroomversnelling naar Net Zero,” [Online]. Available: <https://www.arcadis.com/nl-be/knowledge-hub/perspectives/global/2021/energietransitie>. [Geopend 20 september 2023].
- [3] Klimaat.be, „De Overeenkomst van Parijs,” [Online]. Available: <https://klimaat.be/klimaatbeleid/internationaal/overeenkomst-van-parijs>. [Geopend 27 september 2023].
- [4] Arcadis, „Over ons,” [Online]. Available: <https://www.arcadis.com/nl-be/over-ons>. [Geopend 15 februari 2024].
- [5] 3 WEST Building Energy Consultants Inc., „The Carbon Cost of Construction Materials,” [Online]. Available: <https://3westbec.com/the-carbon-cost-of-construction-materials/>. [Geopend 27 september 2023].
- [6] E. Hemelaar, J. Mak en G. Donze, „Zo bouwen we binnen ons CO2-budget,” *Duurzaam Gebouwd*, 15 april 2023.
- [7] E. Codde, „CO2-uitstoot van gebouwen gaat de verkeerde kant op,” [Online]. Available: <https://www.profacility.be/news-view.asp?ID=79393>. [Geopend 23 oktober 2023].
- [8] RICS, „Whole life carbon assessment (WLCA) for the built environment,” [Online]. Available: <https://www.rics.org/profession-standards/rics-standards-and-guidance/sector-standards/construction-standards/whole-life-carbon-assessment>. [Geopend 23 oktober 2023].
- [9] Klimaat.be, „Het broeikaseffect... een natuurlijk verschijnsel,” [Online]. Available: <https://klimaat.be/klimaatverandering/oorzaken/broeikaseffect>. [Geopend 15 oktober 2023].
- [10] K. Mulvaney, „What is a carbon footprint—and how to measure yours,” *National Geographic*, 24 juni 2022. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/what-is-a-carbon-footprint-how-to-measure-yours>. [Geopend 23 oktober 2023].
- [11] InfoMil, „Broeikasgassen,” [Online]. Available: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/lucht/ozon-en-f-gassen/broeikasgassen-0/>. [Geopend 20 december 2023].
- [12] Klimaat.be, „De Overeenkomst van Parijs,” [Online]. Available: <https://klimaat.be/klimaatbeleid/internationaal/overeenkomst-van-parijs>. [Geopend 20 december 2023].
- [13] RPSgroup, „Embodied carbon: What it is and how to tackle it,” [Online]. Available: <https://www.rpsgroup.com/services/environment/sustainability-and-climate-resilience/what-is-embodied-carbon/>. [Geopend 15 oktober 2023].

[14] Ecobouwers, „Wat is embodied carbon? En hoe hou je die laag?,” [Online]. Available: <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/wat-embodied-carbon-en-hoe-hou-je-die-laag>. [Geopend 23 oktober 2023].

[15] RICS, „Whole life carbon assessment for the built environment,” RICS, Londen, 2017.

[16] OneClick LCA, [Online]. Available: <https://oneclicklca.com/software/design-construction>. [Geopend 15 februari 2024].

[17] Passiefhuismarkt, „Opbouw (prefab) houtskeletbouw wand in 9 stappen [met afbeeldingen],” [Online]. Available: <https://passiefhuismarkt.nl/houtskeletbouw/opbouw-wand/>. [Geopend 20 april 2024].

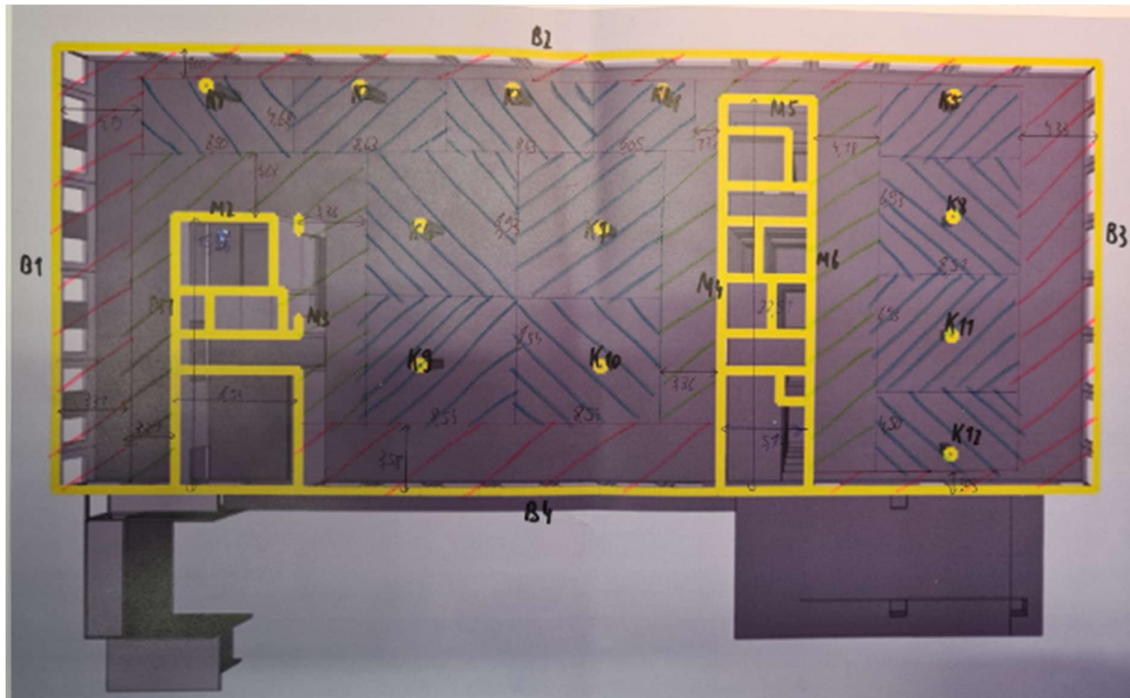
[18] Rockwool, „Houten scheidingswand,” [Online]. Available: <https://www.rockwool.com/be-nl/toepassingen/binnenmuurisolatie/scheidingswand/houten-scheidingswand/>. [Geopend 20 april 2024].

Bijlagen

Bijlagenlijst

Bijlage A: Lastendaling betonnen gebouw vijf verdiepingen.....	67
Bijlage B: Ontwerp houten elementen gebouw 5 verdiepingen	69
Bijlage C: Ontwerp gebouw van twee verdiepingen.....	77
Bijlage D: Ontwerp gebouw van acht verdiepingen	83

Bijlage A: Lastendaling betonnen gebouw vijf verdiepingen



Figuur A1: Benamingen muren/ kolommen/ balken

Tabel A1: last per element per verdieping in UGT

Naam muur/kolom	Dragende oppervlakte (m ²)	Last verdiep 4 (kN)	Last verdiep 3 (kN)	Last verdiep 2 (kN)	Last verdiep 1 (kN)	Last gelijkvloers (kN)
B1	88.05	1729.00	1725.73	4778.85	6105.66	7432.48
B2	60.04	1280.02	3226.45	4902.71	6578.96	8255.22
B3	99.85	1960.79	3882.80	5355.47	6828.15	8300.82
B4	147.63	2899.09	6433.76	9304.10	12174.44	15044.78
M1	93.65	1838.96	3892.25	5524.13	7156.01	8787.90
M2	49.84	978.65	2010.17	2817.42	3624.67	4431.92
M3	94.61	1857.93	3925.07	5931.21	7207.85	8849.24
M4	106.09	2083.34	4632.37	6703.99	8775.61	10847.23
M5	18.55	364.34	866.42	1285.02	1703.61	2122.21
M6	141.20	2772.73	5825.20	8242.30	10659.40	13076.49
K1	39.78	781.18	1393.18	1826.17	2259.16	2692.14
K2	40.39	793.12	1413.85	1852.83	2291.80	2730.78
K3	40.39	793.12	1413.85	1852.83	2291.80	2730.78
K4	28.31	556.01	1003.58	1323.73	1643.88	1964.03
K5	38.04	747.00	1334.04	1749.91	2165.77	2581.63
K6	67.72	1329.89	2342.61	3050.58	3758.55	4466.52
K7	67.72	1329.89	2342.61	3050.58	3758.55	4466.52

K8	58.97	1158.10	2045.37	2667.25	3289.13	3911.01
K9	64.39	1264.49	2229.44	2904.63	3579.83	4255.02
K10	64.39	1264.49	2229.44	2904.63	3579.83	4255.02
K11	58.97	1158.10	2045.37	2667.25	3289.13	3911.01
K12	38.30	752.02	1342.72	1761.09	2179.47	2597.84
Totaal	1506.88	29692.27	57556.28	82457	104901	127711

Tabel A2: Afmetingen elementen

Totaal gebouw	Buitenmuren (m³)	Kolommen (m³)	Binnenmuren (m³)	Vloerplaat (m³)
	468	66.6	655.65	2290
Fundering	Dikte (m)	Oppervlakte (m²)	Volume (m³)	
	0.70	1506	1054	

Bijlage B: Ontwerp houten elementen gebouw 5 verdiepingen

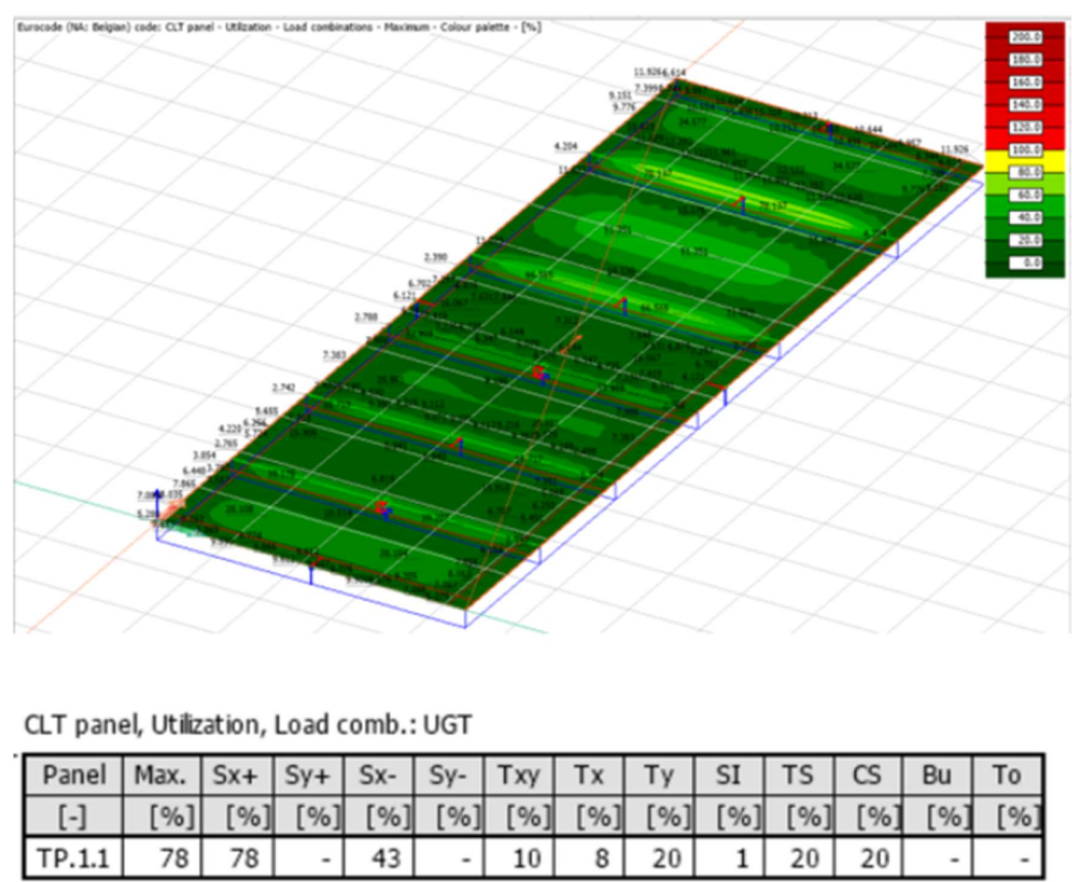
Ontwerp vloerplaat:

Onderstaande figuur geeft deze vloerplaat weer, de grootste overspanning in deze vloerplaat bedraagt 5,72 m. Er zijn extra balken toegevoegd om deze overspanning te beperken. Deze balken worden aangeduid in onderstaande figuur met groene streeplijnen.



Figuur B1: Zwaarst belaste vloerplaat hybride gebouw

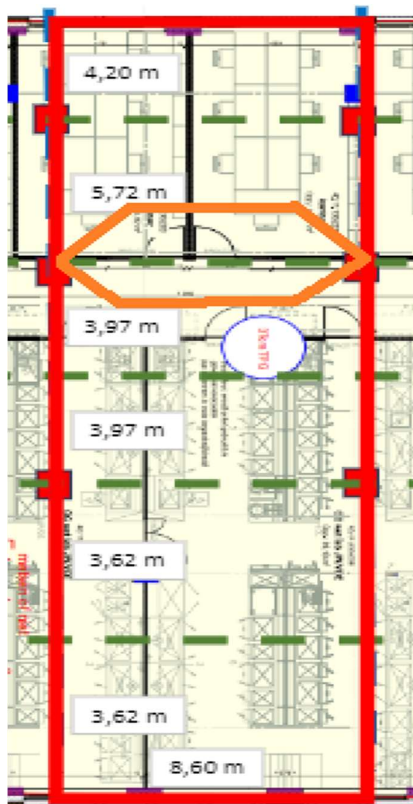
Het maximale gebruikpercentage bedraagt 78%, zoals zichtbaar in onderstaande figuur.



Figuur B2: Overzicht gebruikpercentage vloerplaat

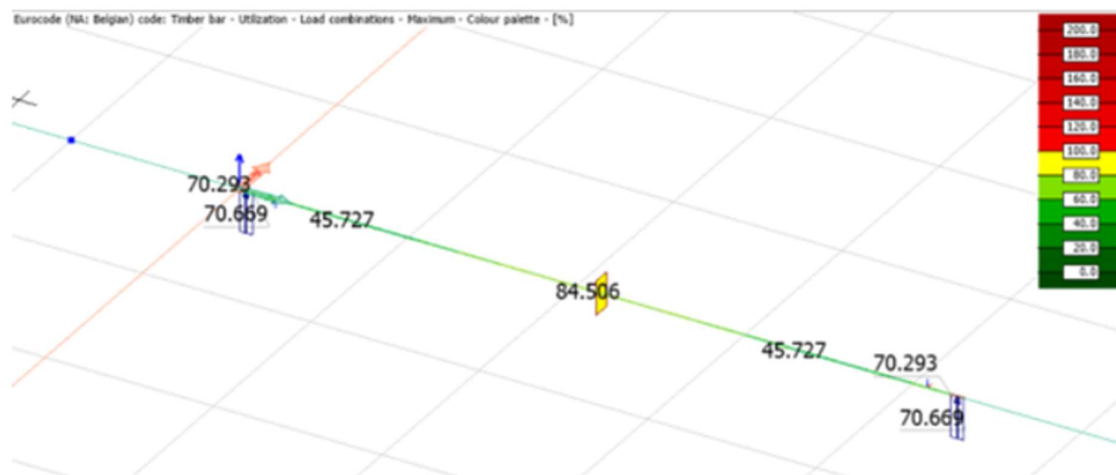
Ontwerp balken

Onderstaande figuur duidt het vloeroppervlak aan, dat de zwaarst belaste balk draagt.



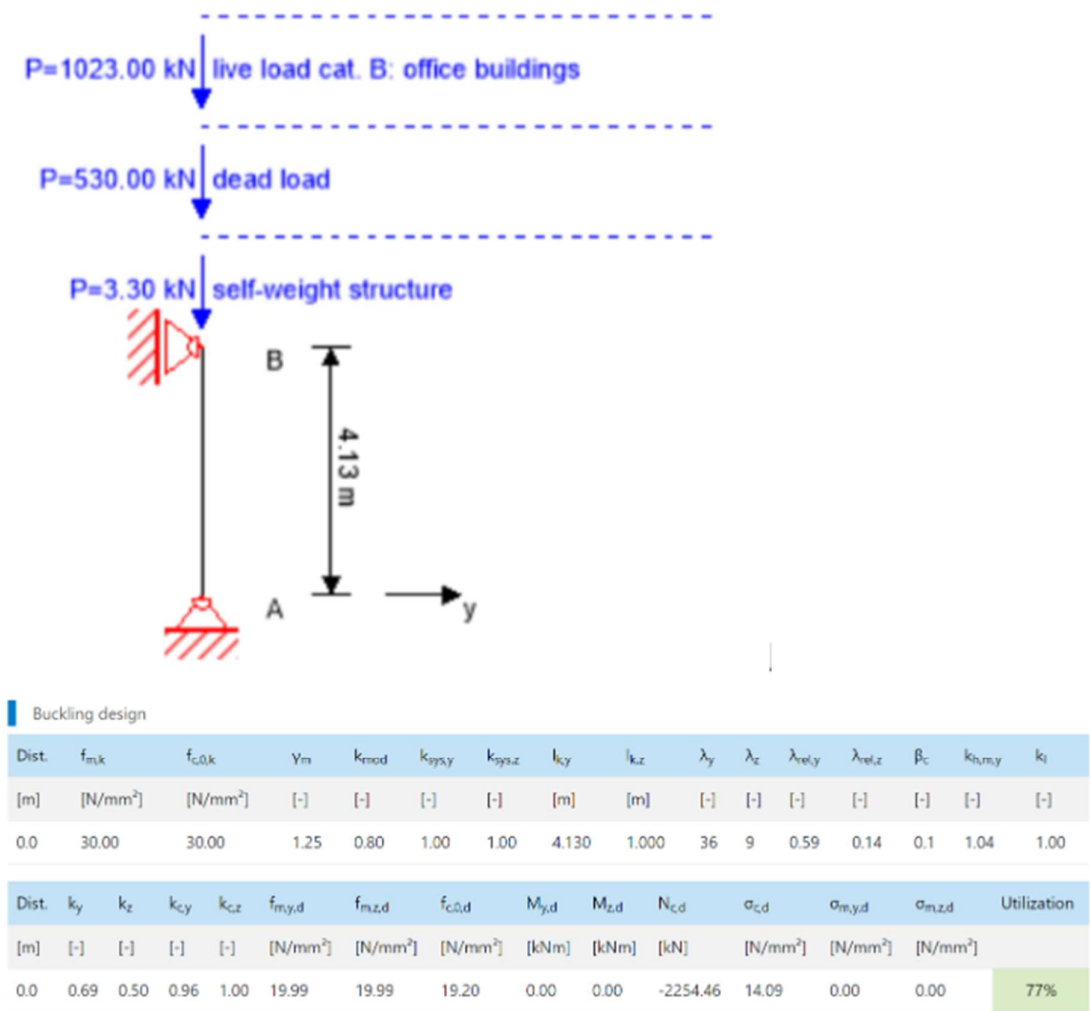
Figuur B3: Aanduiding dragend oppervlak zwaarst belaste balk B34

Figuur B4 geeft het gebruikspercentage van de zwaarst belaste balk weer. Er treedt een maximaal gebruikspercentage in het midden van de balk op van 85%.



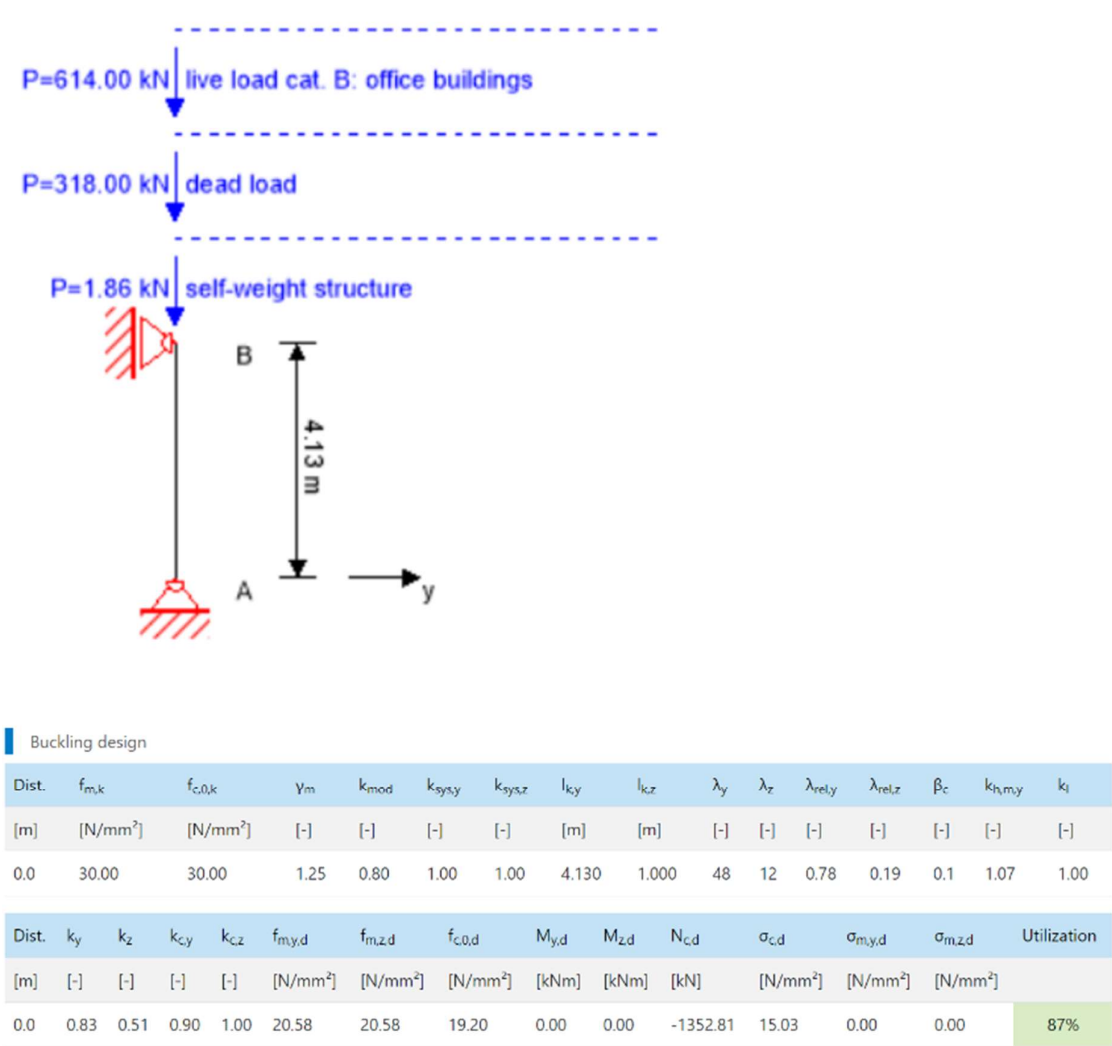
Figuur B4: Gebruikspercentage balk GL36h 215x405

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van kolomtype A weer, dit bedraagt 77%.



Figuur B6: Gebruikspercentage kolomtype A

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van kolomtype B weer, dit bedraagt 87%.



Figuur B7: Gebruikspercentage kolomtype B

Hoeveelheid materialen:

Tabel B2: Hoeveelheid (hout) materialen vloerplaat, kolommen en balken

	opp/verdiep (m ²)	Totale opp (m ²)	Totaal volume (m ³)
CLT 120 L5S vloerplaat	1473.50	7367.50	884.10
GL30h Kolommen	Volume (m ³)	Aantal	Totaal volume per type (m ³)
Type A	0.661	36	23.79
Type B	0.372	54	20.07
Randkolom	0.506	160	80.95
		Tot volume GL30h (m ³)	124.81
GL36h 215x405 balk	Doorsnede (m ²)	lengte (m)	Volume (m ³)
	0.087	2625	228.57

Tabel B3: Hoeveelheid materialen gevel- en binnenwanden (houten gebouw)

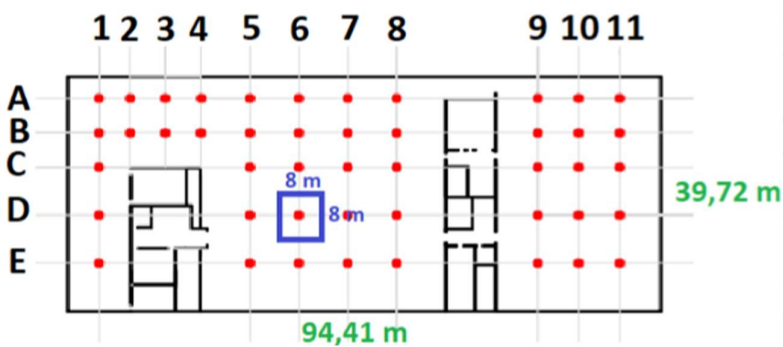
Gevelwanden				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	51,44
OSB-platen	0,015	/	2578	38,67
Houtvezelisolatie	0,14	/	2578	360,92
Houtvezelplaat	0,015	/	2578	38,67
Vuren (balkjes spouw)	/	7987,5	0,0009	7,2
Gevelbekleding (cedar wood)	0,02	/	2340	46,8
Gipsplaat (binnenbekleding)	0,015	/	2340	35,1
Binnenwanden				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	26,8
OSB-platen	0,015		4840	72,6
Houtvezelisolatie	0,07		2420	169,4
Gipsplaat	0,015		4840	72,6

Bijlage C: Ontwerp gebouw van twee verdiepingen

Betonnen gebouw

Tabel C1: Lasten betonnen gebouw UGT (2 verdiepingen)

	Totaal gewicht (kN)	Opp (m ²)	Lengte (m)	Last (kN/m ²)	Last (kN/m)
Dak	43232	3750.00	/	11.53	/
Vloer	27338	3750.00	/	7.29	/
kolom	774.4	/	/	/	/



Figuur C1: Grondplan met aanduiding kritische kolom

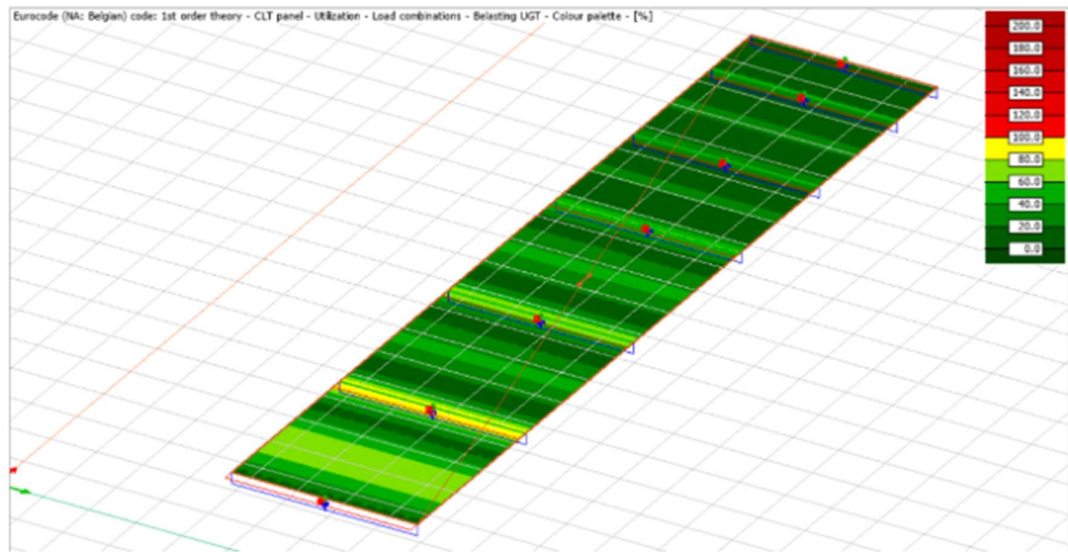
Tabel C2: Hoeveelheden en afmetingen elementen

Opp muur (m ²)	Opp muur excl. openingen (m ²)	Opp raamopeningen (m ²)	Window to wall ratio		
766.17	409.1	357.07	0.47		
Aantal verdiepen	Breedte (m)	Lengte (m)	Vloeroppervlakte (m ²)	Opmerkingen:	
2	39.72	94.41	7500	Verhouding lengte/breedte = 2,4 zoals oorspronkelijk model	
					alle muren x factor 1,58
Afmetingen buitenmuur	Hoogte (m)	Totale lengte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)	Opmerkingen:
		9	536.52	2578	464
					Totale lengte buitenmuren bedraagt 537 m (dikte = 0.18 m)
Afmetingen binnenmuur	Hoogte (m)	Totale lengte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)	Opmerkingen:
		4.13	721	2977	655
					Per verdiep dient er 361 m binnenmuur voorzien te worden (dikte 0.22 m)
Afmetingen vloerplaat	Dikte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)		Opmerkingen:
		0.37	7500	2775	Totale volume vloerplaat bedraagt 3885 m ³
Afmetingen funderingsplaat	Dikte (m)	Oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)		
		0.70	3750	2625	
Kolommen	Breedte (m)	Diepte (m)	lengte (m)	Aantal	Volume (m ³)
		0.25	0.25	4.13	120
					31.0

Hybride en houten gebouw

Ontwerp vloerplaat:

Een vloerplaat van CLT 190 L5s voldoet volgens onderstaande figuur.



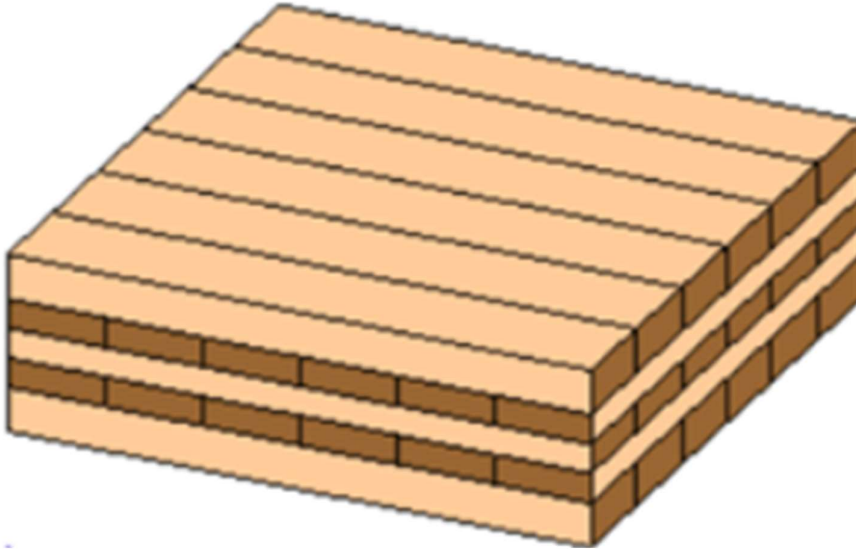
CLT panel, Utilization, Load comb.: Belasting UGT

Panel	Max.	Sx+	Sy+	Sx-	Sy-	Txy	Tx	Ty	SI	TS	CS	Bu	To
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
TP.1.1	101	101	-	57	-	0	11	26	1	26	26	-	-

Figuur C2: Overzicht gebruikspercentage vloerplaat

CLT 190 L5s is een CLT-plaat die bestaat uit vijf lagen met een totale dikte van 190 mm. Figuur C2 geeft de opbouw van een CLT 190 L5s plaat weer.

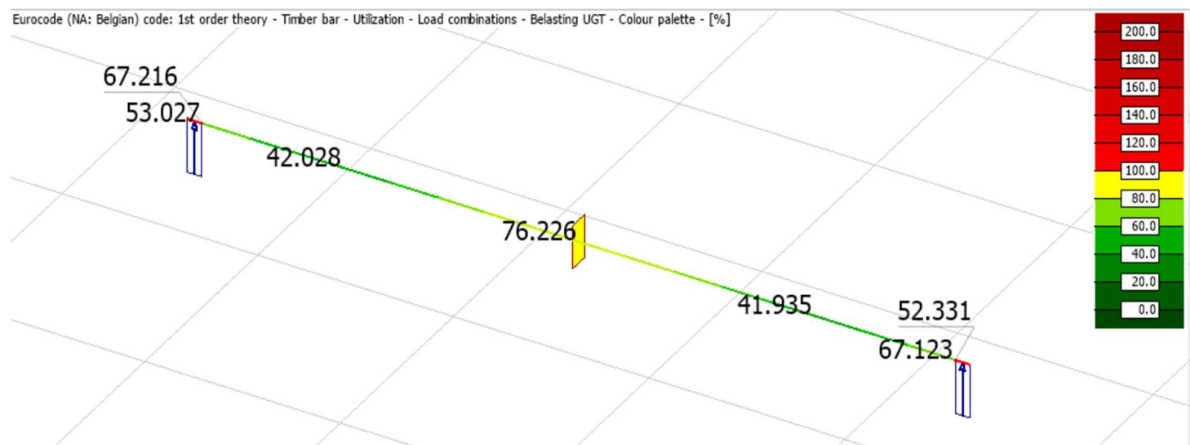
De vezelrichting van bovenliggende lagen zijn steeds loodrecht t.o.v. elkaar. Het hout waaruit de verschillende lagen bestaat is C24-hout. De middelste laag is 30 mm in tegenstelling tot de vier andere lagen die 40 mm dik zijn. Het eigengewicht van deze vloerplaat bedraagt 0,80 kN/m².



Figuur C3: Opbouw CLT 190 L5s

Ontwerp balken:

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van balk GL36h 215x405 weer, dit bedraagt 76%.

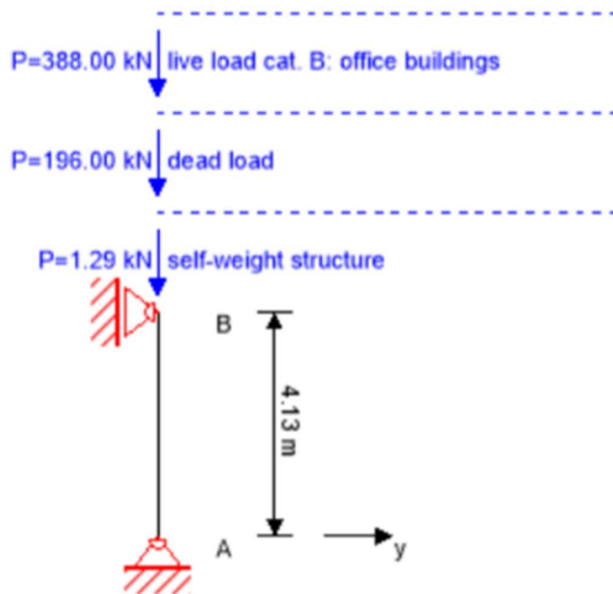


Figuur C4: Gebruikspercentage balk GL36h 215x405

Tabel C3: Lasten op kolommen

[illegible]

Onderstaande figuur geeft het gebruikpercentage van de randkolom weer, dit bedraagt 87%.

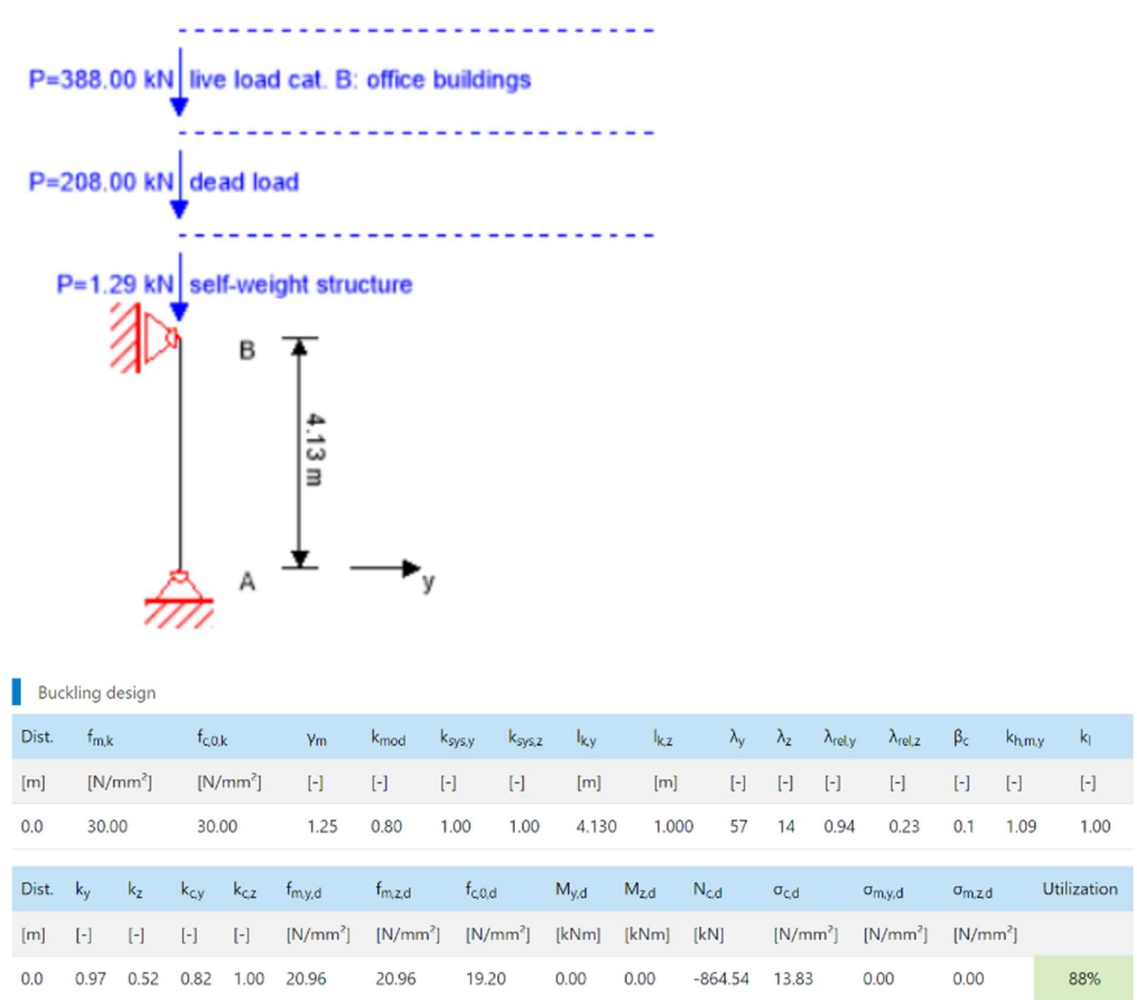


Buckling design															
Dist.	$f_{m,k}$	$f_{c,0,k}$	γ_m	k_{mod}	$k_{sys,y}$	$k_{sys,z}$	l_{ky}	l_{kz}	λ_y	λ_z	$\lambda_{rel,y}$	$\lambda_{rel,z}$	β_c	$k_{h,m,y}$	k_i
[m]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.0	30.00	30.00	1.25	0.80	1.00	1.00	4.130	1.000	57	14	0.94	0.23	0.1	1.09	1.00

Dist.	k_y	k_z	k_{cy}	k_{cz}	$f_{m,y,d}$	$f_{m,z,d}$	$f_{c,0,d}$	$M_{y,d}$	$M_{z,d}$	$N_{c,d}$	$\sigma_{c,d}$	$\sigma_{m,y,d}$	$\sigma_{m,z,d}$	Utilization
[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0.0	0.97	0.52	0.82	1.00	20.96	20.96	19.20	0.00	0.00	-848.34	13.57	0.00	0.00	87%

Figuur C5: Gebruiksperscentage randkolom (twee verdiepingen)

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van de middenkolommen weer, dit bedraagt 88%.



Figuur C6: Gebruikspercentage middenkolom (twee verdiepingen)

Hoeveelheid materialen:

Tabel C4: Hoeveelheid (hout) materialen vloerplaat, kolommen en balken

	opp/verdiep (m ²)	Totale opp (m ²)	Totaal volume (m ³)
CLT 190 L5S vloerplaat	3749.97	7499.93	1424.99
GL30h Kolommen	Volume (m ³)	Aantal	Totaal volume per type (m ³)
Type A	0.258	92	23.75
Randkolom	0.258	84	21.68
		Tot volume GL30h (m ³)	45.43
GL36h 215x405 balk	Doorsnede (m ²)	lengte (m)	Volume (m ³)
	0.087	3457.44	301.06

Tabel C5: Hoeveelheid materialen gevel- en binnenwanden (houten gebouw)

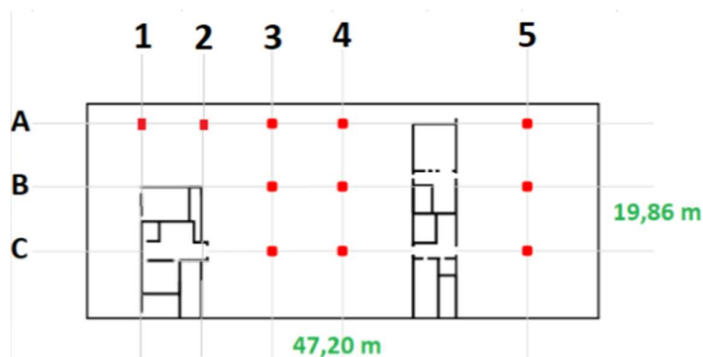
<i>Gevelwanden</i>				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	25.7
OSB-platen	0.015	/	1289	19.3
Houtvezelisolatie	0.14	/	1289	180.5
Houtvezelplaat	0.015	/	1289	19.3
Vuren (balkjes spouw)	/	/	0.0009	3.3
Gevelbekleding (cedar wood)	0.02	/	1289	25.8
Gipsplaat (binnenbekleding)	0.015	/	1289	19.3
<i>Binnenwanden</i>				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	13.4
OSB-platen	0.015		2977	44.7
Houtvezelisolatie	0.07		1488.5	104.2
Gipsplaat	0.015		2977	44.7

Bijlage D: Ontwerp gebouw van acht verdiepingen

Betonnen gebouw

Tabel D1: Lasten betonnen gebouw UGT (8 verdiepingen)

	Totaal gewicht (kN)	Opp (m ²)	Lengte (m)	Last (kN/m ²)	Last (kN/m)
Dak	10814	938.00	/	11.53	/
Vloer	6838	938.00	/	7.29	/
kolom	692.81	/	/	/	/



Figuur D1: Grondplan met aanduiding kritische kolom

Tabel D2: Hoeveelheden en afmetingen elementen

Opp muur (m ²)	Opp muur excl. openingen (m ²)	Opp raamopening (m ²)	Window to wall ratio		
766.17	409.1	357.07	0.47		
Aantal verdiepen	Breedte (m)	Lengte (m)	Vloeroppervlakte (m ²)	Opmerkingen:	
8	19.86	47.2	7499	Verhouding lengte/breedte = 2,4 zoals oorspronkelijk model	
				alle muren x factor 0,79	
Afmetingen buitenmuur	Hoogte (m)	Totale lengte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)	Opmerkingen:
	4.5	1072.96	2578	464	Totale lengte buitenmuren bedraagt 1073 m (134*8) (dikte = 0,18 m)
Afmetingen binnenmuur	Hoogte (m)	Totale lengte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)	Opmerkingen:
	4.13	721	2977	655	Per verdiep dient er 90 m binnenmuur voorzien te worden (dikte 0,22 m)
Afmetingen vloerplaat	Dikte (m)	Totale opp (m ²)	Totale volume (m ³)		Opmerkingen:
	0.37	7499	2775		Totale volume vloerplaat bedraagt 2775 m ³
Afmetingen funderingsplaat	Dikte (m)	Oppervlakte (m ²)	Volume (m ³)		
	0.70	937	656		
Kolommen	Breedte (m)	Diepte (m)	lengte (m)	Aantal	Volume (m ³)
	0.25	0.25	4.13	44	11.4
	0.3	0.3	4.13	44	16.4
				Totaal volume (m ³)	27.7

Ontwerp Kolommen:

Drukbelasting:

Bovenste 4 verdiepingen:

$$\sigma_{optredend} = \frac{3457 \cdot 10^3}{350 \cdot 350} = 28,22 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{max} = 30 \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK} \quad (3)$$

Onderste 4 verdiepingen:

$$\sigma_{optredend} = \frac{6419 \cdot 10^3}{500 \cdot 500} = 25,68 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{max} = 30 \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK} \quad (4)$$

Knik:

Bovenste 4 verdiepingen:

$$N_{\text{Euler}} = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{L_0^2} = \frac{33000 \cdot \frac{350^4}{12} \cdot \pi^2}{4130^2} = 23878 \text{ kN} > 17285 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad (5)$$

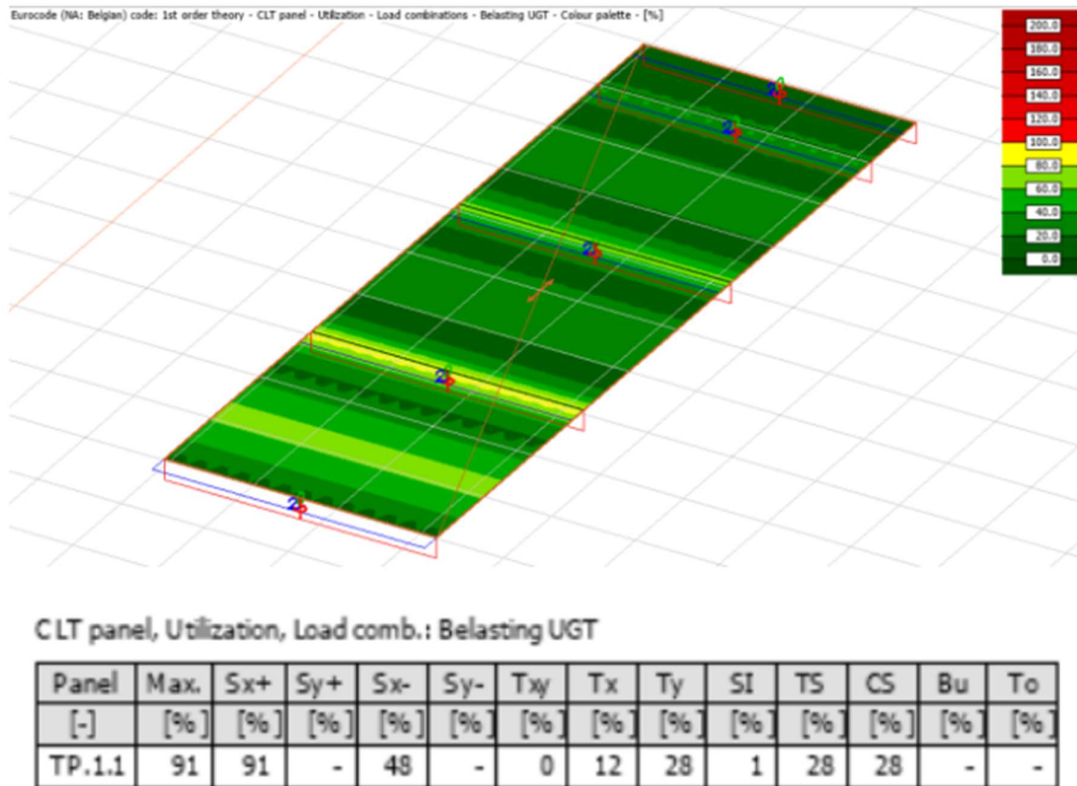
Onderste 4 verdiepingen:

$$N_{\text{Euler}} = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{L_0^2} = \frac{33000 \cdot \frac{500^4}{12} \cdot \pi^2}{4130^2} = 99451,7 \text{ kN} > 32095 \text{ kN} \quad \text{OK} \quad (6)$$

Hybride en houten gebouw:

Ontwerp vloerplaat:

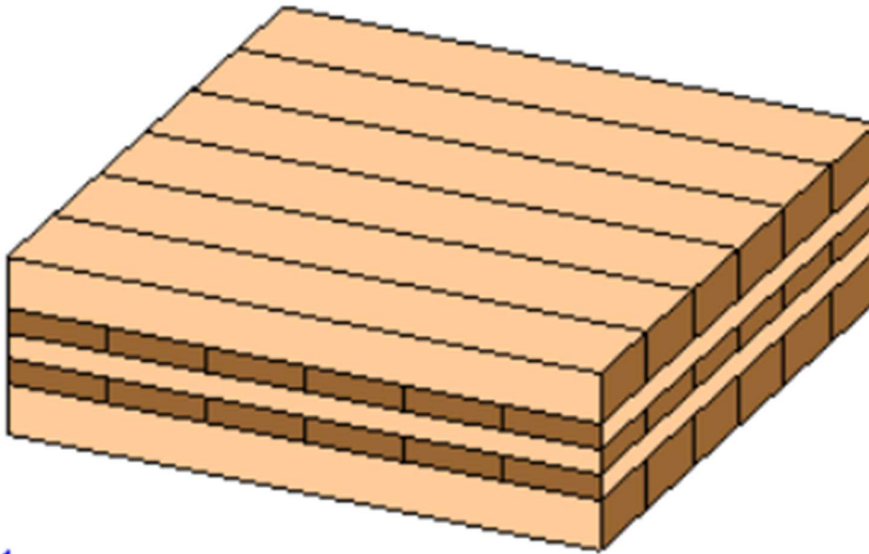
Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van de vloerplaat weer, dit bedraagt 91%.



Figuur D1: Overzicht gebruikspercentage vloerplaat

CLT 140 L5s is een CLT-plaat die bestaat uit vijf lagen met een totale dikte van 140 mm. Figuur D2 geeft de opbouw van een CLT 140 L5s plaat weer.

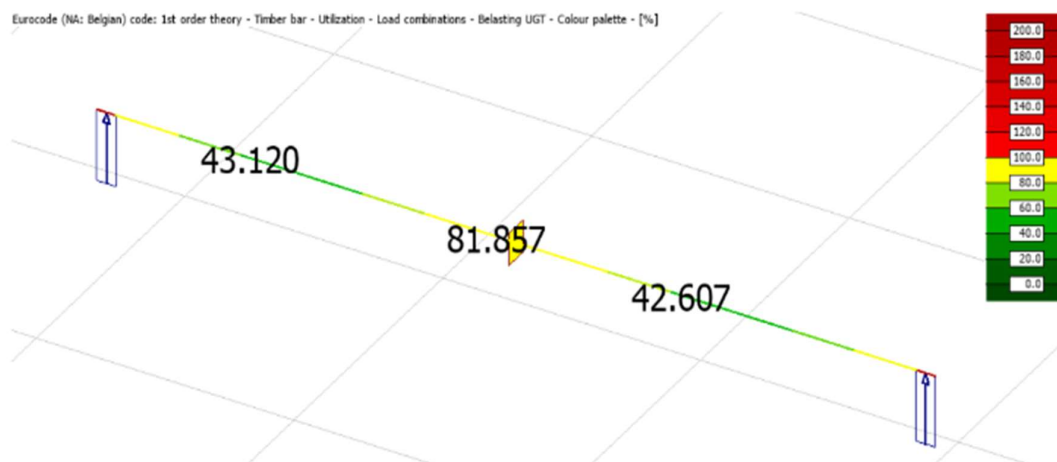
De vezelrichting van bovenliggende lagen zijn steeds loodrecht t.o.v. elkaar. Het hout waaruit de verschillende lagen bestaat is C24-hout. De middelste drie laag zijn 20 mm en de twee buitenste lagen zijn 40 mm dik zijn. Het eigengewicht van deze vloerplaat bedraagt 0,59 kN/m².



Figuur D2: Opbouw CLT 140 L5s

Ontwerp balken:

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van balk GL36h 190x225 weer, dit bedraagt 81,9%.



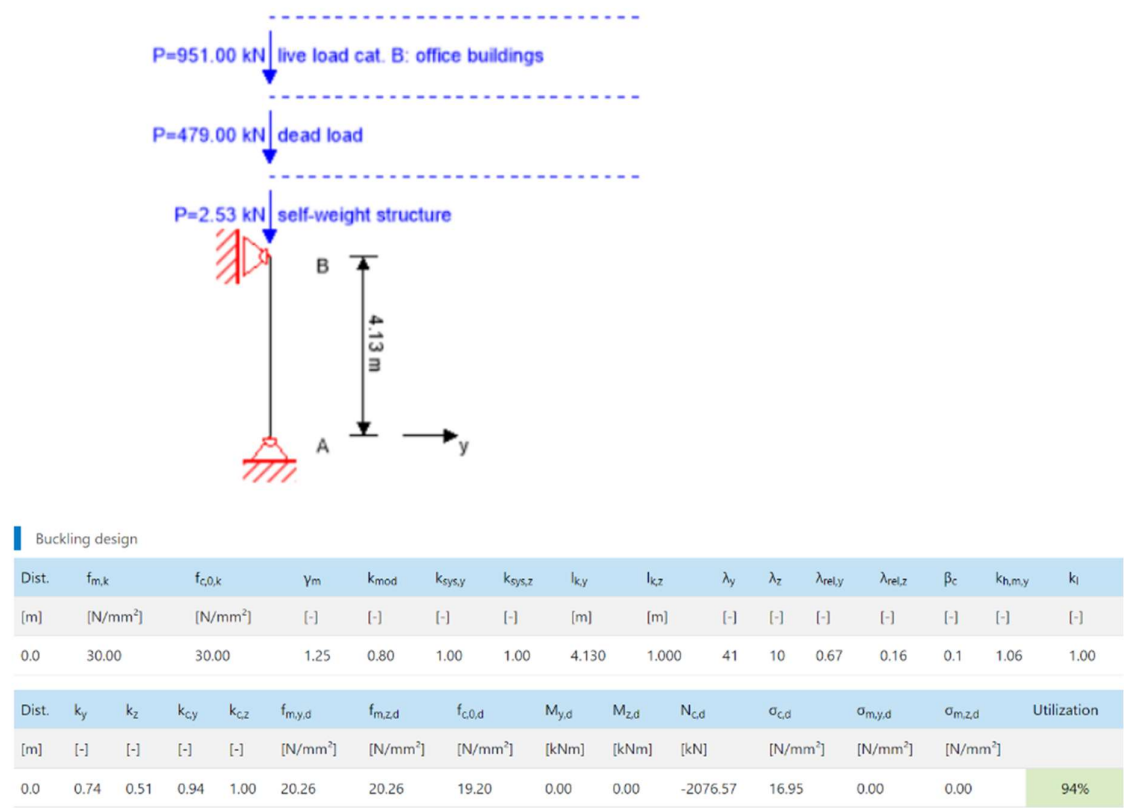
Figuur D3: Gebruikspercentage balk GL36h 190x225

Ontwerp kolommen:

Tabel D3: Lasten op kolommen

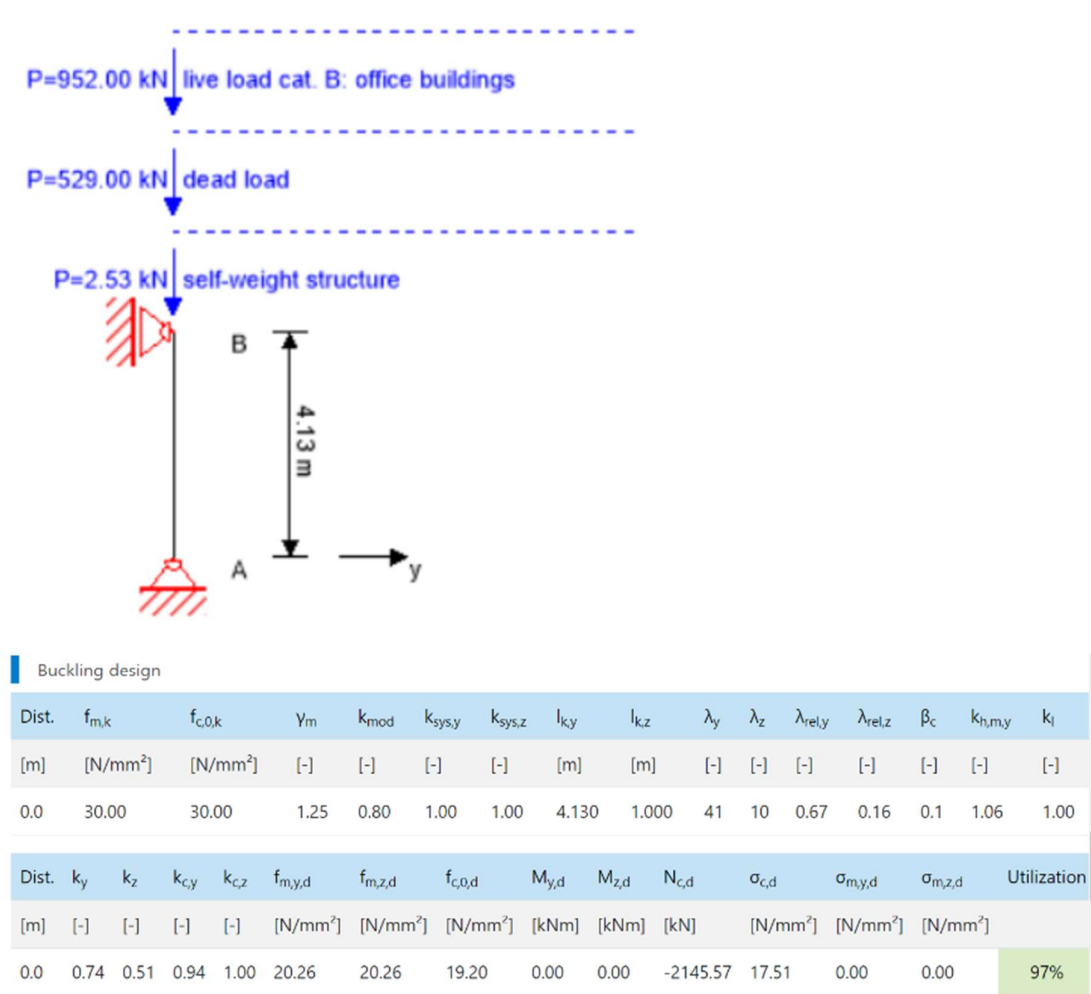
[illegible]

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van de randkolommen weer, dit bedraagt 94%.



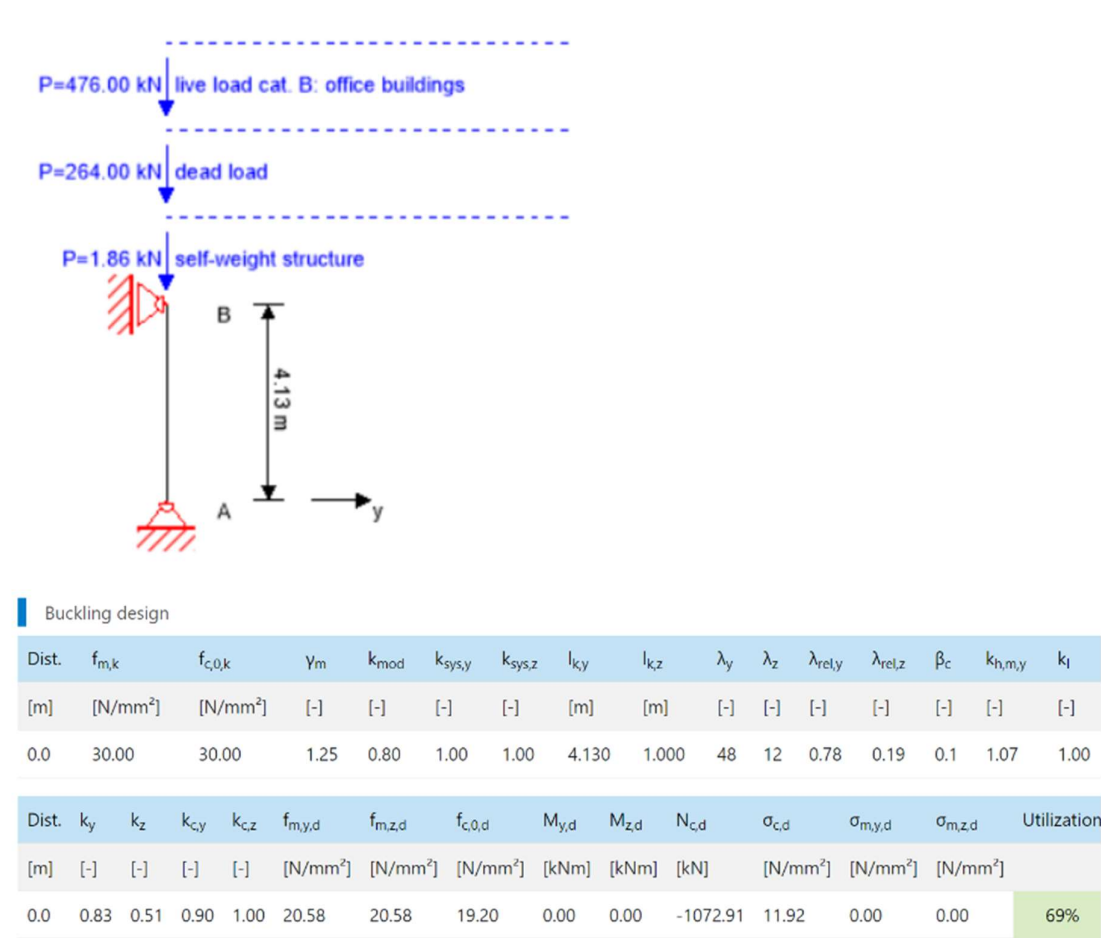
Figuur D4: Gebruikspercentage randkolom (acht verdiepingen)

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van kolomtype A weer, dit bedraagt 97%.



Figuur D5: Gebruikspercentage kolommen type A (acht verdiepingen)

Onderstaande figuur geeft het gebruikspercentage van kolomtype B weer, dit bedraagt 69%.



Figuur D6: Gebruikspercentage kolommen type B (acht verdiepingen)

Hoeveelheid materialen:

Tabel D4: Hoeveelheid (hout) materialen vloerplaat, kolommen en balken

	opp/verdiep (m ²)	Totale opp (m ²)	Totaal volume (m ³)
CLT 140 L5S vloerplaat	937.39	7499.14	1049.88
GL30h Kolommen	Volume (m³)	Aantal	Totaal volume per type (m³)
Type A	0.506	44	22.26
Type B	0.258	44	11.36
Randkolom	0.506	192	97.14
		Tot volume GL30h (m³)	130.76
GL36h 190X 225 balk	Doorsnede (m²)	lengte (m)	Volume (m³)
	0.041	4132.96	168.83

Tabel D5: Hoeveelheid materialen gevel- en binnenwanden (houten gebouw)

Gevelwanden				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m²)	Volume (m³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	51.4
OSB-platen	0.015	/	2578	38.7
Houtvezelisolatie	0.14	/	2578	360.9
Houtvezelplaat	0.015	/	2578	38.7
Vuren (balkjes spouw)	/	/	0.0009	14.4
Gevelbekleding (cedar wood)	0.02	/	2578	51.6
Gipsplaat (binnenbekleding)	0.015	/	2578	38.7
Binnenwanden				
Materiaal	Dikte (m)	Lengte (m)	oppervlakte (m²)	Volume (m³)
Vuren (raamwerk)	/	/	/	26.8
OSB-platen	0.015		2977	44.7
Houtvezelisolatie	0.07		1488.5	104.2
Gipsplaat	0.015		2977	44.7