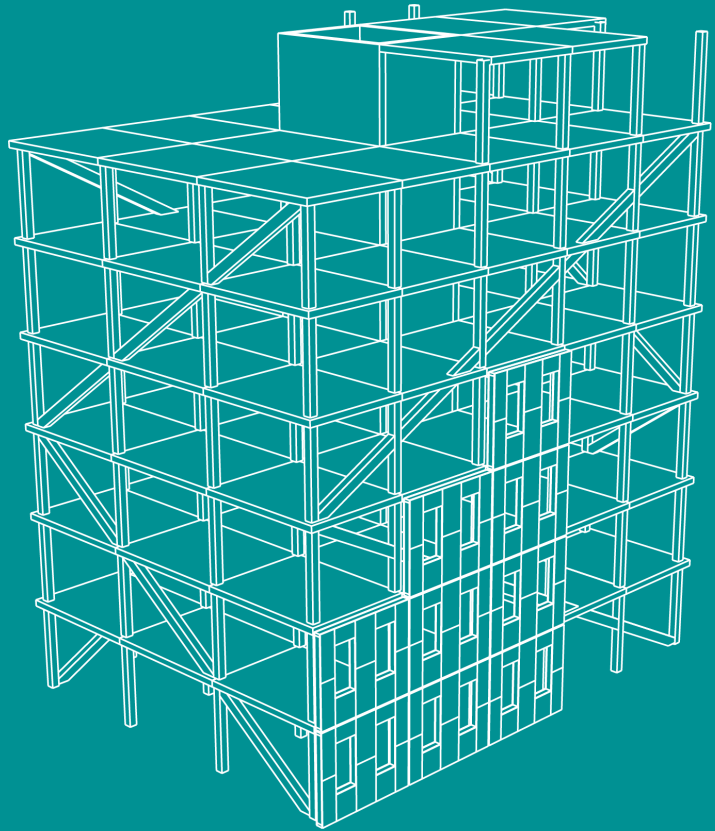




T2.3

Lage-emissie en geïndustrialiseerde bouwsystemen voor hoogbouw

Deelrapport van het project

Geïndustrialiseerde Modulaire en Lage-Emissie Hoogbouw in de G4

Dit is een deelrapport van het project Geïndustrialiseerde Modulaire en Lage-Emissie Hoogbouw in de G4, dat werd gecoördineerd door AMS Institute en werd gefinancierd door het Onderzoeksprogramma Emissieloos Bouwen. Dit rapport bevat de resultaten van T2.3 Bouwsystemen. Het onderzoek werd uitgevoerd binnen de ReStruct Group van het departement Architectural Engineering & Technology van TU Delft

Publicatiedatum: 26 februari 2024

Auteur: Dr. Stijn Brancart

Onderzoekers: Dr. Stijn Brancart, Lara Neuhaus en Elena Macedo Dauzacker



Inhoudstafel

1	Inleiding.....	4
2	Marktanalyse	5
2.1	Lage-emissie bouwmaterialen en producten	5
2.2	Lage-emissie en geïndustrialiseerde hoogbouw	5
3	Parametrische studie.....	9
3.1	Selectie bouwsystemen	10
3.2	Materiaalintensiteit van verschillende bouwsystemen	12
3.3	Materiaalintensiteit voor verschillende gridmaten	17
3.4	Conclusies	21
4	Bouwsysteem	22
4.1	Constructie	24
4.2	Gevel	24
4.3	Vloer	25
	Conclusies.....	27
	Bijlagen	29
	Bijlage 1: overzicht met verzamelde bouwproducten	29
	Bijlage 2: inschatting materiaalhoeveelheden	31

1 Inleiding

Het gebruik van biobased bouwmaterialen zit in de lift. Letterlijk, want ook voor hoogbouw is steeds meer mogelijk. Zeker in de categorie 30 tot 70 meter kan je hoge ambities waarmaken. En dat heeft positieve gevolgen. Gezien de hoogbouwplannen van de G4 zijn hier grote milieuwinsten te maken, die bij uitbreiding een bijdrage leveren aan de klimaatambities van heel Nederland. Zeker in combinatie met modulariteit en bouwindustrialisatie zijn er sterke kansen om op een verantwoorde manier aan de stijgende woonneed tegemoet te komen.

Voor biobased bouwen bestaat nog wat koudwatervrees. Dat is zeker het geval wanneer het over hoogbouw gaat. Vaak zijn er vragen over de technische haalbaarheid. Is hout voldoende sterk om in de hoogte te bouwen? En wat met de brandveiligheid van natuurlijke vezelisolatie? Dat zijn terechte vragen, waar ondertussen heel wat kennis en informatie over voorhanden is. Zeker voor hoogbouw tot 70 meter liggen oplossingen binnen handbereik. En dat betekent al heel wat voor de G4 en voor Nederland. Ook de financiële haalbaarheid speelt een belangrijke rol. Geïndustrialiseerde bouwsystemen kunnen daarvoor een oplossing bieden. Zeker bij hoogbouw is de bouwtijd bepalend voor het budget en de praktische haalbaarheid in de context van dichtbebouwde steden als de G4.

Dit rapport bevat de resultaten van *T2.3 Bouwsystemen* van het project *Geïndustrialiseerde modulaire en lage-emissie hoogbouw in de G4*. Die taak ging in op de geïndustrialiseerde en modulaire bouwsystemen die lage-emissie hoogbouw mogelijk kunnen maken, met als doel meer inzicht te geven in de mogelijkheden van vandaag en de nabije toekomst, en een inschatting te maken van materiaalhoeveelheden en keuzes. Dat laatste leverde input op voor andere taken binnen het project, zoals de *Impactanalyse* (WP1) en de *Selectie en vermeerdering van grondstoffen* (WP2).

Het onderzoek dat in dit rapport wordt gepresenteerd bestaat uit drie delen. (I) Aan de hand van een studie van bestaande systemen voor geïndustrialiseerd en modulaair bouwen, lage-emissie bouwen en houten constructies in hout, maakt het een beknopte analyse van de huidige staat van de markt. (II) Op basis daarvan stelt het project enkele op hout gebaseerde hoogbouwssystemen voorop die via een parametrische studie verder werden onderzocht. Die studie vergelijkt de materiaalintensiteit van de verschillende bouwsystemen en bekijkt de impact van het constructieve grid. De inzichten die daaruit volgen helpen bij het maken van onderbouwde keuzes op het vlak van efficiënt en verantwoord gebruik van grondstoffen, in dit geval hout. (III) Gebaseerd op de resultaten van de parametrische studie, schuift het project twee bouwsystemen naar voren die potentieel hebben voor lage-emissie en geïndustrialiseerde hoogbouw. Het rapport geeft voorbeelden van mogelijke elementopbouwen en stelt enkele punten voor verdere ontwikkeling vast.

2 Marktanalyse

Vandaag komen steeds meer toepassingen op de markt om lage-emissie, geïndustrialiseerd en in de hoogte te bouwen. Deze studie start met een korte analyse van huidige innovaties en toepassingen op de markt: lage-emissie bouwmaterialen en producten, en bouwsystemen voor geïndustrialiseerde hoogbouw in hout.

2.1 Lage-emissie bouwmaterialen en producten

Op het vlak van bouwmaterialen is er steeds meer aandacht voor biobased en lokale materialen. Zeker voor isolatiematerialen zijn er veel opties. Vezelmaterialen zoals hennep, vlas en stro bieden mogelijkheden, bijvoorbeeld door ze in te blazen. Ze bieden ook perspectieven voor het ontwikkelen van toepassingen op basis van andere vezelgewassen, zoals olifantsgras en lisdodde, die vandaag nog niet of nauwelijks in de bouwsector worden ingezet. Daarnaast kan lage-emissie isolatie ook op basis van gerecycleerde grondstoffen, denk bijvoorbeeld aan katoen door het recyclen van gebruikte jeans. Een uitdaging bij deze isolatiematerialen is hun beperkte brandwerendheid. Daarom moeten ze worden toegepast in combinatie met beter presterende plaatmaterialen. Ook daar is een opmars van biobased opties ingezet, zowel voor binnen- als buitenafwerking. Verschillende biocomposieten komen op de markt die beter brandeigenschappen hebben, vaak wel als gevolg van het toevoegen van additieven die zelf een grotere of soms zelfs schadelijke ecologische impact hebben. Materialen als leem kunnen een goede impact hebben op de brandveiligheid, akoestiek en thermische inertie. Leem is echter minder voorkomend in Nederland en wordt daarom nog niet op grote schaal toegepast. Een uitgebreid overzicht van de bestudeerde bouwproducten in deze studie is terug te vinden in bijlage 1.

2.2 Lage-emissie en geïndustrialiseerde hoogbouw

In het kader van de Nederlandse wooncrisis komen steeds meer modulaire woonmodules op de markt. Die gebruiken vaker biobased materialen. Figuur 1 toont drie modulaire houten bouwsystemen: HoutKern Bouwmethode¹, Daiwa House Modular Europe² en Finch Buildings³. Allen zijn ontwikkeld en op de markt in Nederland. Binnen een breed scala aan modulaire woningen die worden toegepast voor laagbouw, tonen deze drie potentieel voor toepassing in middelhoge tot zelfs hoogbouw.

¹ <https://www.noorderenggroep.eu/modulaire-houtkern-module/>

² <https://www.daiwahousemodular.eu>

³ <https://finchbuildings.com/en/>



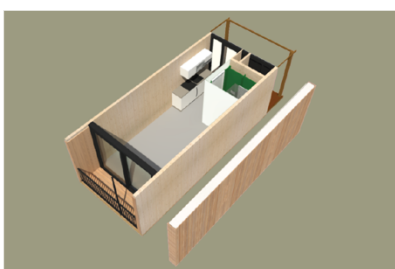
HoutKern Bouwmethode
Noordereng Groep, DP6 & Oosterhoff



Daiwa House
Daiwa House Modular Europe



Finch Buildings
Finch Buildings



Figuur 1 | Verschillende modulaire systemen maken al gebruik van biobased materialen, zoals: de HoutKern Bouwmethode, Daiwa House Modular Europe en Finch Building (afbeeldingen zijn eigendom van de producenten).

Binnen de modulaire woningbouw zien we verschillende types aan modules opkomen die nuttig kunnen zijn voor deze studie:

- **Houten frames** met (gelamineerde) houten balken en kolommen zorgen voor lichtgewicht modules. In de HoutKern Bouwmethode worden ze met innovatieve stalen knooppunten aan elkaar bevestigd. Die bevestigingen zijn van groot belang om de structurele integriteit van het gebouw als geheel te waarborgen. In dit geval worden ook stalen trekstaven toegevoegd om de stabiliteit van de modules en van de gehele constructie te verzekeren.
- In andere gevallen worden **HSB-elementen** toegevoegd aan frames uit hout of staal. In die elementen kunnen biobased isolatiematerialen worden toegepast, mogelijk zelfs worden ingeblazen. De HSB-elementen kunnen de stabiliteit van de modules zelf waarborgen, maar zijn niet voldoende om de stabiliteit op gebouwniveau te verzekeren in het geval van hoogbouw.
- Voor hoogbouw worden modules wel eens geschakeld rond een **centrale kern**. De verbindingen tussen de modules onderling moeten verzekeren dat horizontale belastingen zoals wind door kunnen stromen naar die kern. Die kan in principe uit hout (CLT) worden opgebouwd, maar meestal is dat beton (zie bijvoorbeeld ook Daiwa House).
- Veel modules maken gebruik van CLT-wanden. De **schijfwerking** zorgt dan voor stabiliteit van de modules zelf en kan bij een goede verbinding ook schijfwerking voor de gehele constructie creëren.

Figuur 2 toont drie houten hoogbouwprojecten die verschillende bouwsystemen toepassen en op een verschillende manier omgaan met industrialisatie: Brock Commons Tallwood House⁴, CARL⁵ en Urban Woods⁶. Ze tonen verschillende mogelijke evoluties:

- Brock Commons Tallwood House maakt gebruik van een **elementenmethode** met gelamineerde kolommen, CLT-vloerelementen en geprefabriceerde geveldelen. Betonnen kernen zorgen voor stabiliteit. De 18 bouwlagen konden op 70 dagen opgebouwd worden.
- CARL maakt eveneens gebruik van een betonnen kern. In dit geval zijn ook de **geprefabriceerde geveldelen** (HSB) dragend. De constructie werd laag per laag opgebouwd door geprefabriceerde houten vloerdelen de gevels, binnenwanden en de centrale kern op te leggen.
- Urban Woods streeft naar **materiaalefficiënte hoogbouw** in hout door een lichte constructie van houten kolommen, balken en vloeren aan te vullen met windverbanden langsheen de gevels. Zo wordt de stabiliteit gegarandeerd.

Deze voorbeelden tonen dat twee groepen beginnen te ontstaan: verregaande modulariteit via geprefabriceerde bouwmodules en het optimaliseren van het bouwproces via elementenbouw. Beide methodes tonen potentieel voor lage-emissie hoogbouw. Waar elementenbouw steeds meer doorgang vindt bij houten hoogbouw, blijft de toepassing van bouwmodules voornamelijk beperkt tot laagbouw.

⁴ <https://www.actonostroy.ca/work/education/ubc-brock-commons-tallwood-house>

⁵ <https://carl.arlinger.de>

⁶ <https://www.theurbanwoods.com/nl/>



Brock Commons Tallwood House, Vancouver
Acton Ostry Architects



CARL, Pforzheim
Arlinger, Züblin Timber, Peter W. Schmidt



Urban Woods
Urban Woods

Figuur 2 | Houten hoogbouw kan op verschillende manieren worden geïndustrialiseerd, zoals bij: Brock Commons Tallwood House, CARL en Urban Woods.

3 Parametrische studie

In gebouwen is de draagconstructie doorgaans verantwoordelijk voor het grootste deel van de massa. Gemiddeld draagt ze daardoor voor zo'n 60% bij aan de totale embodied CO₂ van een gebouw⁷. Dat is zeker het geval voor hoogbouw, waar de hoge windbelastingen en de gevoeligheid voor dynamische verschijnselen zoals trillingen de massa vaak verder doen toenemen⁸. Hoewel het gebruik van hout de ecologische impact van een gebouwconstructie kan verlichten, noopt de afhankelijkheid van gelimiteerde houtproductie buiten Nederland tot een zuiniger en meer efficiënt materiaalgebruik. Deze studie vergelijkt daarom de materiaalintensiteit van verschillende houtbouwsystemen afhankelijk van de gebouwhoogte en het constructieve grid. De resultaten tonen welke systemen houten hoogbouw kunnen realiseren met een beperkte hoeveelheid aan hout, en geven meer inzicht in de materiaalintensiteit met betrekking tot houten hoogbouwsystemen in het algemeen.

Over het parametrische model

Deze studie maakt gebruik van een parametrisch model in Grasshopper⁹, een graphical scripting interface die werkt als plug-in voor de 3D tekensoftware Rhinoceros 3D¹⁰. De structurele analyse werd uitgevoerd met de FEA plug-in Karamba3D¹¹. De materiaaleigenschappen voor de houten constructie-elementen werden ingevoerd via de plug-in Beaver¹². Op de constructie werken het eigengewicht, een veranderlijke belasting (voor wooneenheden) en de windbelasting zoals voorgeschreven door Eurocode 1¹³. De simulatie gaat uit van gelamineerd hout, GLT en CLT, met een sterkteklasse van GL24h. Het model is zodanig opgebouwd dat de hoeveelheid bouwlagen, de gridmaat (en dus overspanningslengte van de vloeren) en de oppervlakte van de basis gevarieerd kunnen worden. Alle bouwlagen hebben dezelfde afmetingen en gridmaat.

Het model gebruikt de ingebouwde optimalisatiecomponent van Karamba3D om de minimale houtbehoefte voor elke variant te berekenen. Gezien de parametrische en conceptuele aard van deze studie, zijn de resultaten van het model voornamelijk geschikt voor het vergelijken van de materiaalbehoefte van verschillende houtbouwsystemen voor bepaalde gebouwhoogtes en gridmaten. Ze kunnen zo nuttig zijn om keuzes tijdens de aanbesteding of vroege ontwerpfase te motiveren. Ze geven geen gedetailleerd inzicht in de werking van de geselecteerde bouwsystemen.

⁷ LETI (2020). LETI Embodied Carbon Primer. <https://www.leti.london/ecp>

⁸ Gan, V. J., Chan, C. M., Tse, K. T., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2017). A comparative analysis of embodied carbon in high-rise buildings regarding different design parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 663-675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.156>

⁹ <https://www.grasshopper3d.com/>

¹⁰ <https://www.rhino3d.com/>

¹¹ <https://karamba3d.com/>

¹² <https://www.beaverparametric.com/>

¹³ NEN-EN 1991: Eurocode 1, Belastingen op constructies

3.1 Selectie bouwsystemen

Error! Reference source not found. toont de 10 bouwsystemen die werden opgenomen in deze studie. Ze verschillen in het type constructie-elementen (lineaire elementen, schijven) en de manier waarop de stabiliteit wordt gewaarborgd (schijvenbouw, diagonaalwerking, ingeklemde verbindingen). Enkele varianten zijn hybride oplossingen: combinaties van hout met beton of staal. De studie onderscheidt de volgende houtbouwsystemen:

KOLOM EN BALK

- **Kolom en balk – momentvast:** een lichte constructie met gelamineerde kolommen en balken die stabiel is door momentvaste verbindingen en schijfwerking in de vloerplaten. Deze methode heeft tot nadeel dat hoge spanningen kunnen ontstaan in de verbindingen.
- **Kolom en balk – windverbanden:** een lichte constructie met gelamineerde kolommen en balken die stabiel is door windverbanden in de gevel en schijfwerking in de vloerplaten. Deze methode maakt een open plan mogelijk, maar voegt daarentegen constructie-elementen toe in de gevel.

SCHIJVEN

- **Schijven – CLT:** een constructie met dragende wanden die via schijfwerking en in combinatie met stijve vloerplaten de stabiliteit garanderen. Deze methode kan openheid in de gevel creëren, maar in mindere mate in het plan.

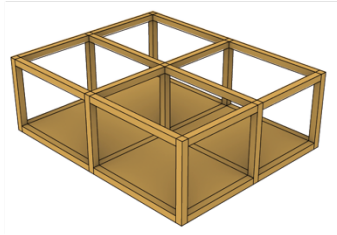
CENTRALE KERN

- **Kern – CLT:** een constructie rondom een centrale kern uit houten schijven, doorgaans aangevuld met kolommen in het plan en de gevel. De kern en vloerplaten zorgen voor stabiliteit.
- **Kern – windverbanden:** een constructie rondom een centrale kern die is opgebouwd met houten windverbanden, doorgaans aangevuld met kolommen in het plan en de gevel. De kern en vloerplaten zorgen voor stabiliteit.
- **Kern – staal:** een hybride constructie rondom een centrale kern die is opgebouwd met stalen windverbanden, doorgaans aangevuld met kolommen in het plan en de gevel. De kern en vloerplaten zorgen voor stabiliteit.
- **Kern – beton:** een hybride constructie rondom een centrale kern die is opgebouwd uit betonnen schijven, doorgaans aangevuld met kolommen in het plan en de gevel. De kern en vloerplaten zorgen voor stabiliteit.

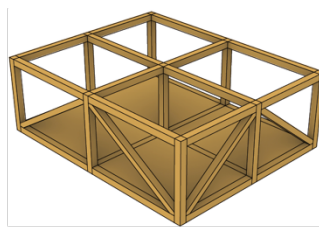
MODULES

- **Modules – schijven:** een systeem van geprefabriceerde bouwmodules die zijn opgebouwd met houten schijven (CLT). De schakeling van schijven en vloerdelen zorgt voor een stabiele constructie.
- **Modules – kolom en balk:** een systeem van geprefabriceerde bouwmodules die zijn opgebouwd met kolommen en balken. De stabiliteit wordt gegarandeerd door de onderlinge verbindingen tussen de modules.
- **Modules – schijven en betonnen kern:** een systeem van geprefabriceerde bouwmodules die zijn opgebouwd met houten schijven (CLT) rondom een betonnen kern. Die kern waarborgt de stabiliteit.

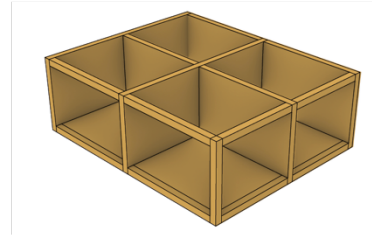
kolom en balk
vormvast



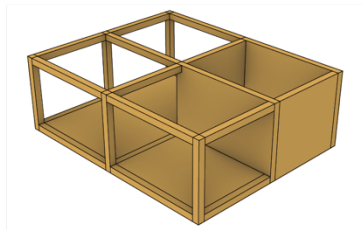
kolom en balk
windverbanden



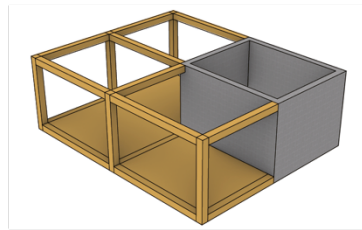
schijven
CLT



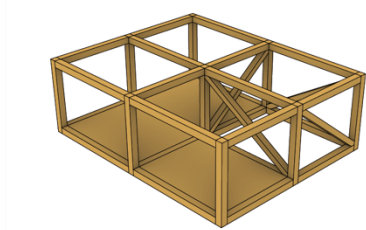
kern
CLT



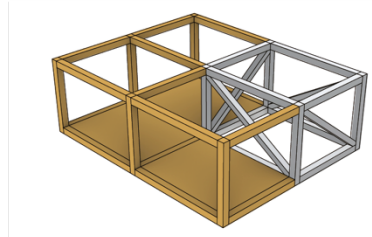
kern
beton



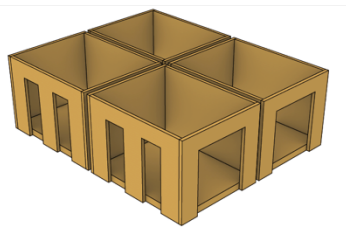
kern
windverbanden



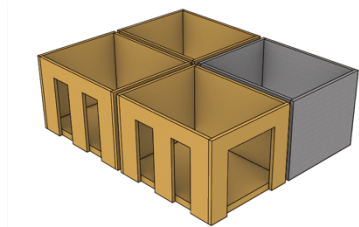
kern
staal



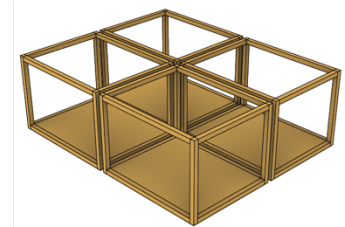
modules
schijven CLT



modules
schijven CLT & beton



modules
kolom en balk vormvast



Figuur 3 | De studie beschouwt tien bouwsystemen in vier categorieën: kolom en balk, schijven, kern en modules.

3.2 Materiaalintensiteit van verschillende bouwsystemen

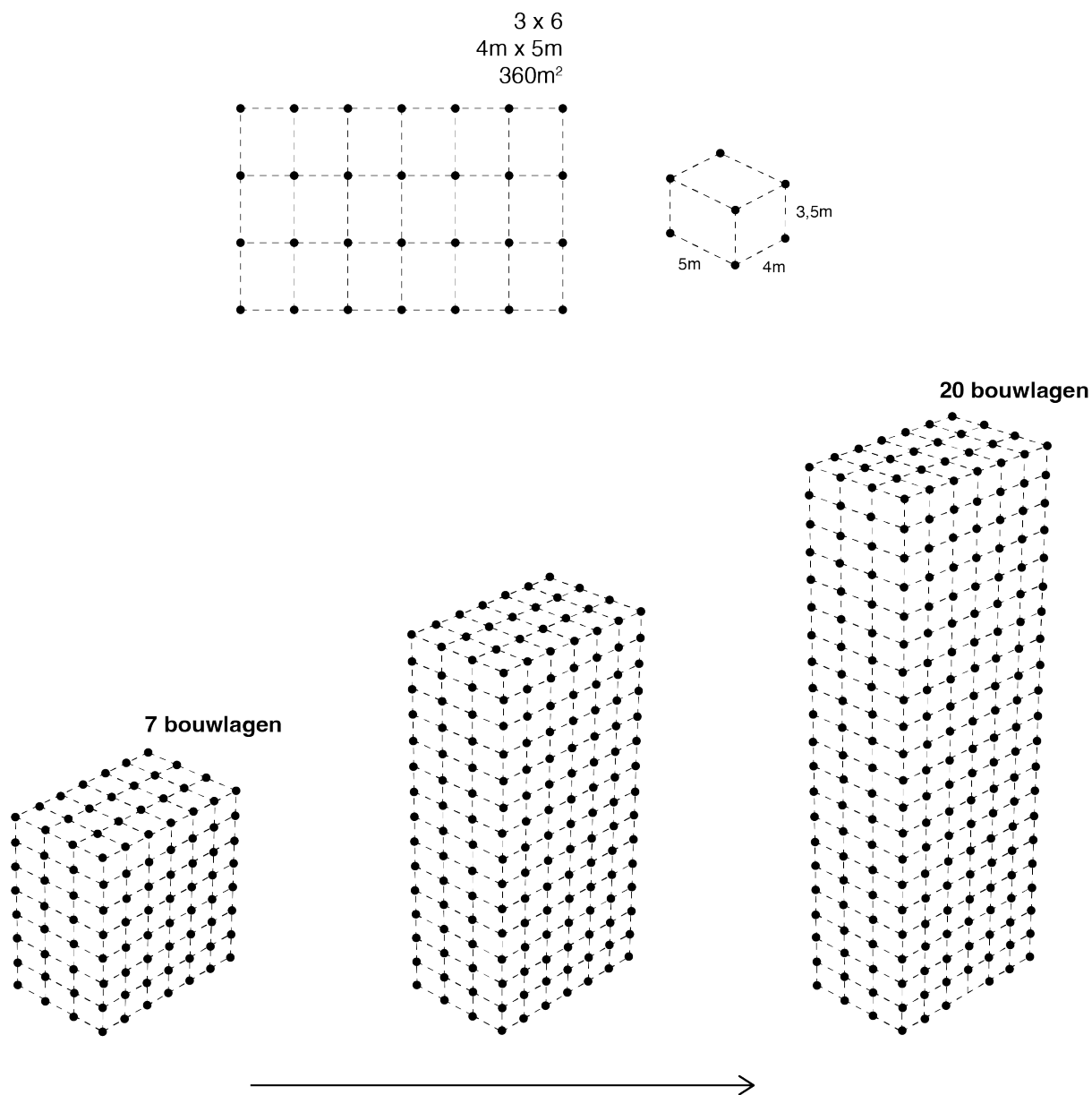
Als eerste vergelijken we de benodigde volumes materiaal voor de tien geselecteerde bouwsystemen. Figuur 4 toont de parameters van de studie. Alle systemen worden toegepast op een grid van 3 bij 6 cellen. De celgrootte is 4m bij 5m en de hoogte per bouwlaag 3,5m. Elke cel heeft zo een oppervlakte van 20m^2 en een volume van 70m^3 . Elke bouwlaag heeft een oppervlakte van 360m^2 , goed voor gemiddeld vier wooneenheden. Het aantal bouwlagen varieert stapsgewijs van 7 tot 20.

Figuur 5 toont het volume aan hout dat minimaal nodig is voor elk bouwsysteem, per bouwlaag en in functie van het aantal bouwlagen. Die resultaten worden opgesplitst in drie categorieën: kolom-balk en schijven in Figuur 6, kern in Figuur 7 en modules in Figuur 8. We kunnen op basis daarvan een aantal observaties maken:

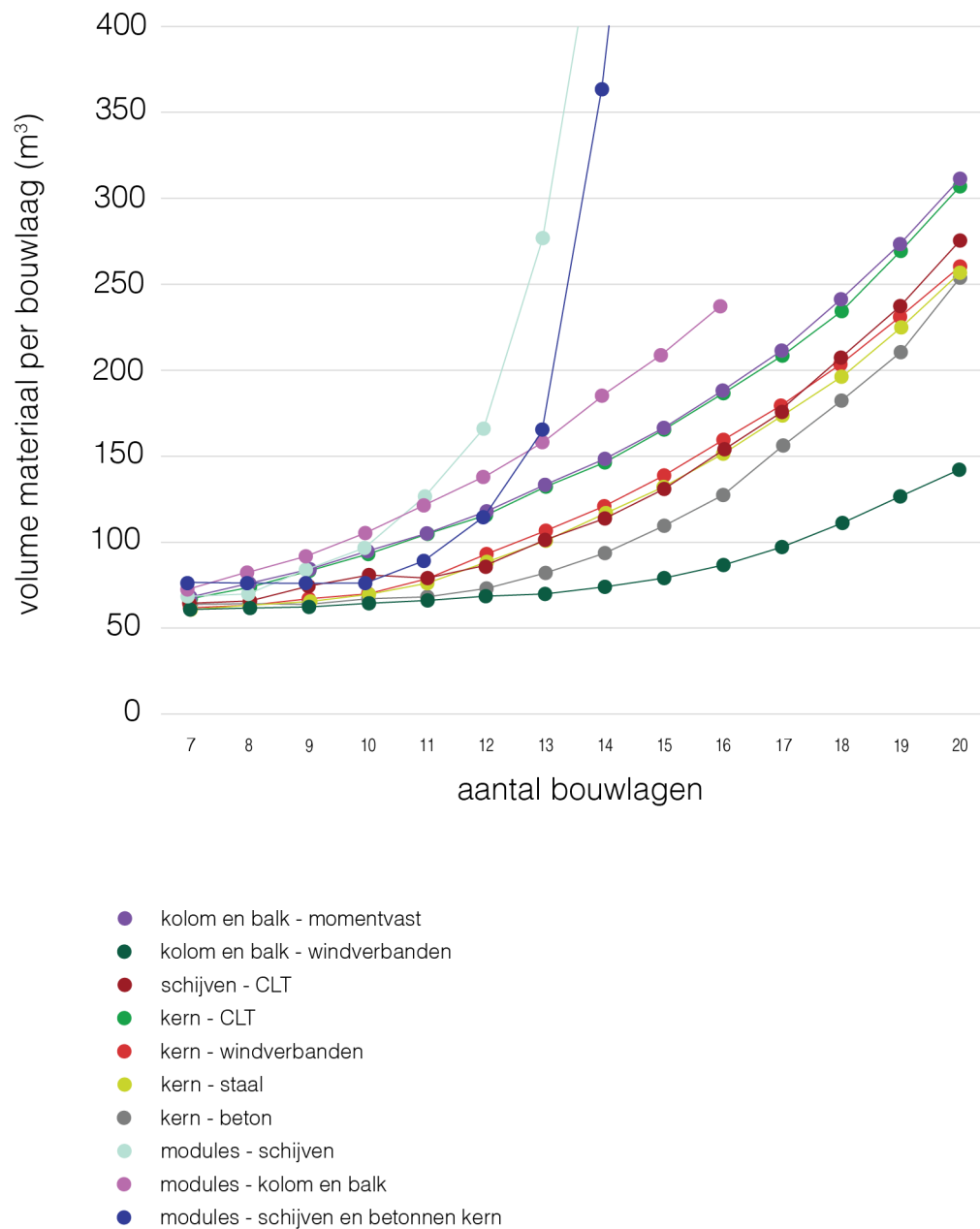
Het systeem met **kolommen, balken en windverbanden** is veruit het minst materiaalintensief voor grotere hoogtes. Door horizontale belastingen af te dragen via diagonalen in de gevel, wordt de volledige breedte van het gebouw benut. Dit bijvoorbeeld in tegenstelling tot het gebruik van een centrale kern. Het systeem met windverbanden werkt zo ook rotaties effectief tegen. Het presteert beduidend beter dan kolommen en balken die momentvast worden verbonden. De momenten in de verbindingen zorgen immers voor grote spanning. Dat vereist zeker bij grotere hoogtes veel materiaal. Het systeem met kolommen, balken en windverbanden vereist voor 20 bouwlagen ook maar de helft van het materiaalvolume in vergelijking met een systeem van CLT schijven. Het is wel belangrijk daarbij rekening te houden met het feit dat schijven ook voor akoestische redenen kunnen worden toegepast.

Systemen met een **kern** presteren gelijkaardig aan elkaar en vereisen allen meer materiaal dan het systeem met windverbanden. Het gebruik van een kern uit CLT leidt tot hoger materiaalgebruik, zeker voor grotere hoogtes. Dat wil natuurlijk niet zeggen dat de ecologische impact automatisch hoger is. De hoge wanddikte van de kern legt wel beslag op de bruikbare vloeroppervlakte. Voor grotere hoogtes kan het dus nuttig zijn een hybride systeem te kiezen of een ander systeem dan de centrale kern toe te passen.

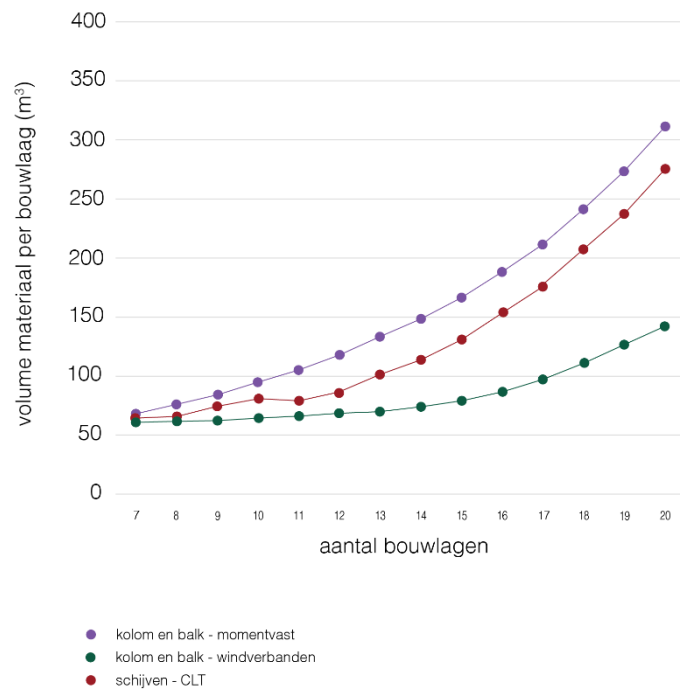
De **modulaire systemen** komen niet goed uit deze studie. Gezien de ontdebelling die doorgaans ontstaat gebruiken deze systemen al snel meer materiaal. De grootste uitdaging is echter de schakeling van de modules. Die moet ervoor zorgen dat het gebouw als geheel de horizontale belastingen, zoals wind, kan afdragen. Dat is zeker bij hoogbouw van cruciaal belang. Als parametrische studie bevat deze vergelijking te weinig detail om duidelijke uitspraken over de verbindingen te doen. Wel toont ze aan dat meer onderzoek naar deze verbindingen nodig is. Ook combinaties met collectieve stabiliteitssystemen, zoals een centrale kern of een rooster van diagonalen langsheen de gevel, verdienen verder onderzoek. Een module met kolommen en balken kan het volume aan hout verlagen, maar moet dan wel worden gecombineerd met bijvoorbeeld windverbanden. Een goede overdracht van de horizontale belastingen tussen de modules onderling is dan van belang.



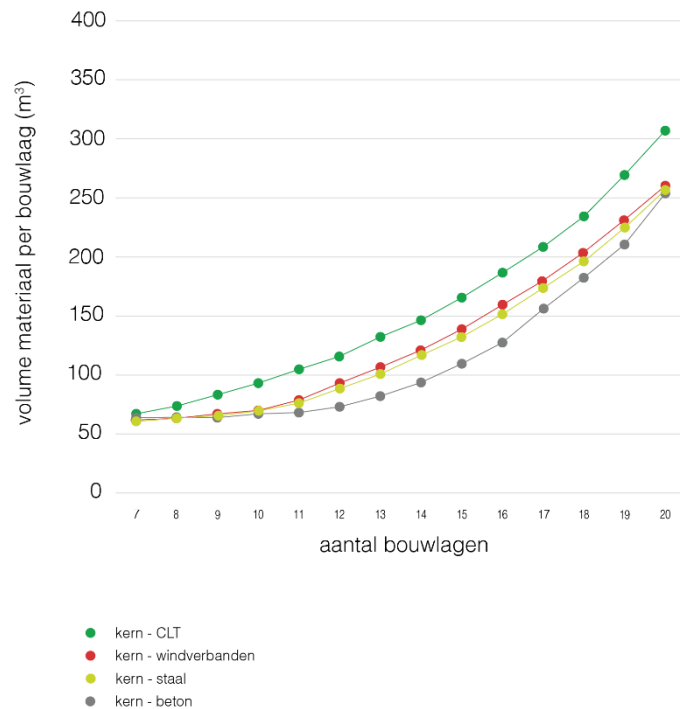
Figuur 4 | De bouwsystemen werden toegepast op een grid van 3 bij 6 cellen van 4m bij 4m. De hoogte van elke bouwlaag is 3,5m. In de studie varieert het aantal bouwlagen van 7 tot 20.



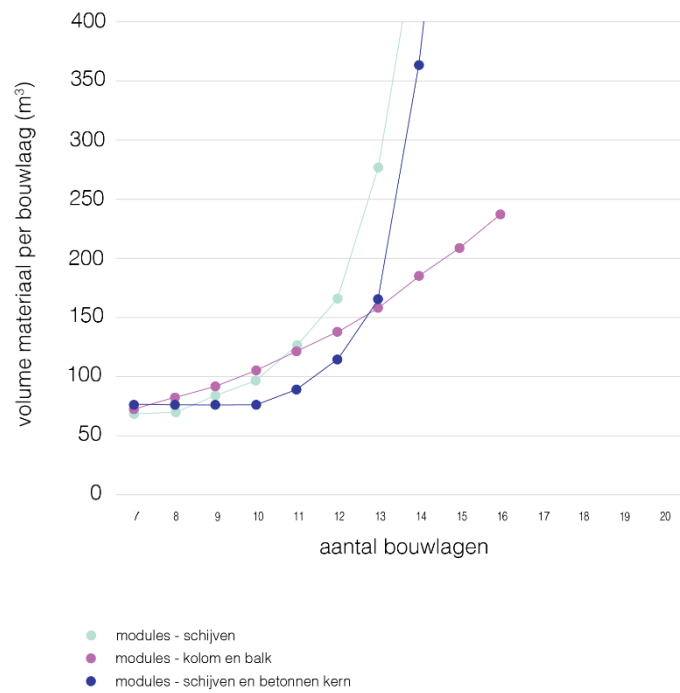
Figuur 5 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor tien verschillende constructiesystemen



Figuur 6 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor bouwsystemen met kolom en balk, en met schijven



Figuur 7 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor bouwsystemen met een centrale kern in hout, staal of beton



Figuur 8 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor modulebouw met houten kolommen en balken, schijven of houten schijven in combinatie met een betonnen kern

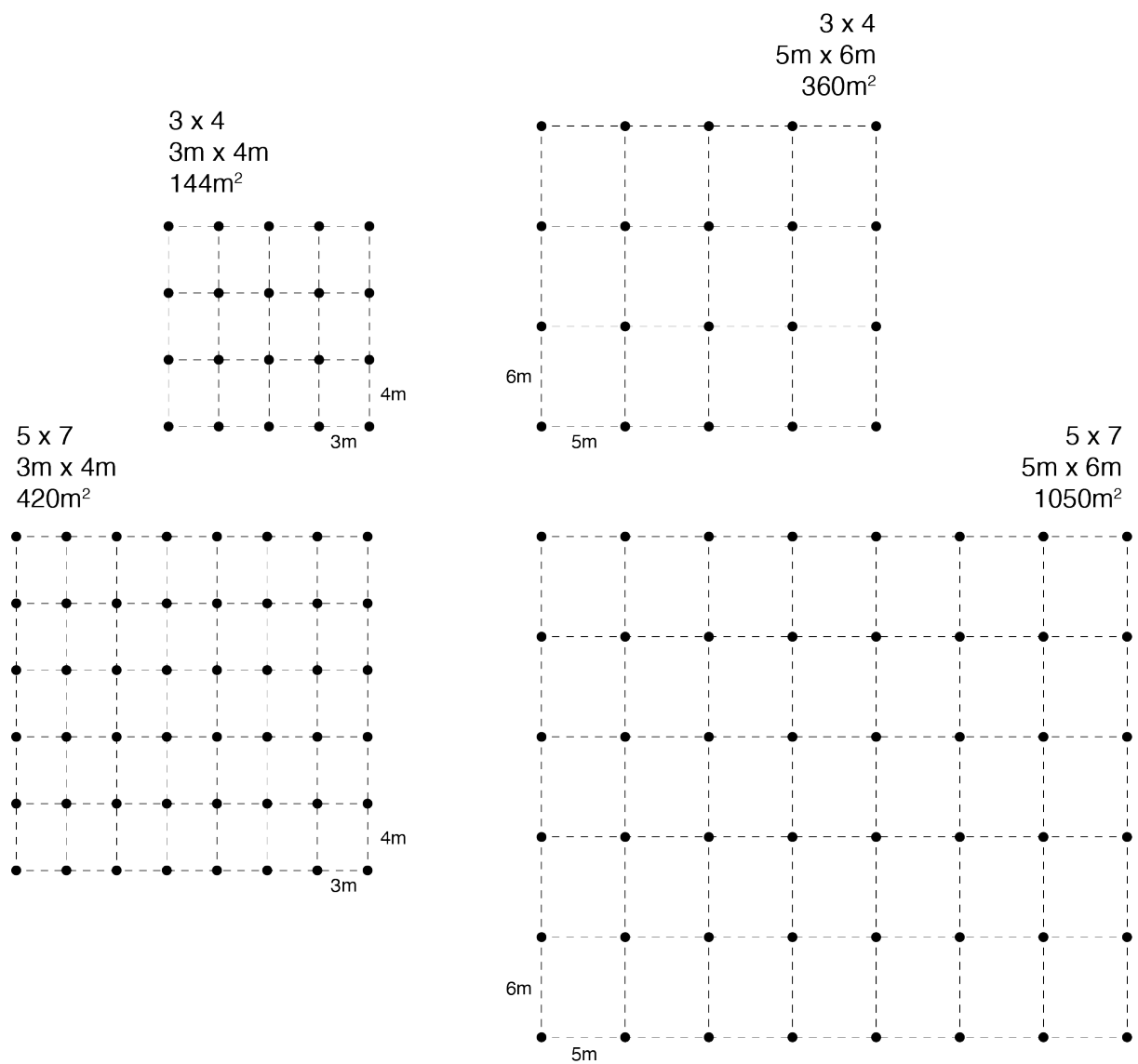
3.3 Materiaalintensiteit voor verschillende gridmaten

Naast de gebouwhoogte hebben ook de afmetingen van de basis en de maten van het constructieve grid een impact op het materiaalgebruik. Deze studie vergeleek daarom de materiaalintensiteit van twee houtbouwsystemen voor verschillende grids. Op basis van de vergelijking van bouwsystemen (zie 3.2), focust dit deel van de studie op kolom en balksystemen met windverbanden en op modulaire systemen met kolommen en balken. Daarbij varieert de gebouwhoogte tussen 2, 6, 12 en 18 bouwlagen. De vergelijking gaat uit van vier configuraties wat betreft het grid en de gridmaten, zoals ook te zien in Figuur 9:

- **Grid 1:** een schakeling van 3 bij 4 cellen van 3 meter bij 4 meter met een bruto vloeroppervlakte van 144m^2
- **Grid 2:** een schakeling van 5 bij 7 cellen van 3 meter bij 4 meter met een bruto vloeroppervlakte van 420m^2
- **Grid 3:** een schakeling van 3 bij 4 cellen van 5 meter bij 6 meter met een bruto vloeroppervlakte van 360m^2
- **Grid 4:** een schakeling van 3 bij 4 cellen van 3 meter bij 4 meter met een bruto vloeroppervlakte van 1050m^2

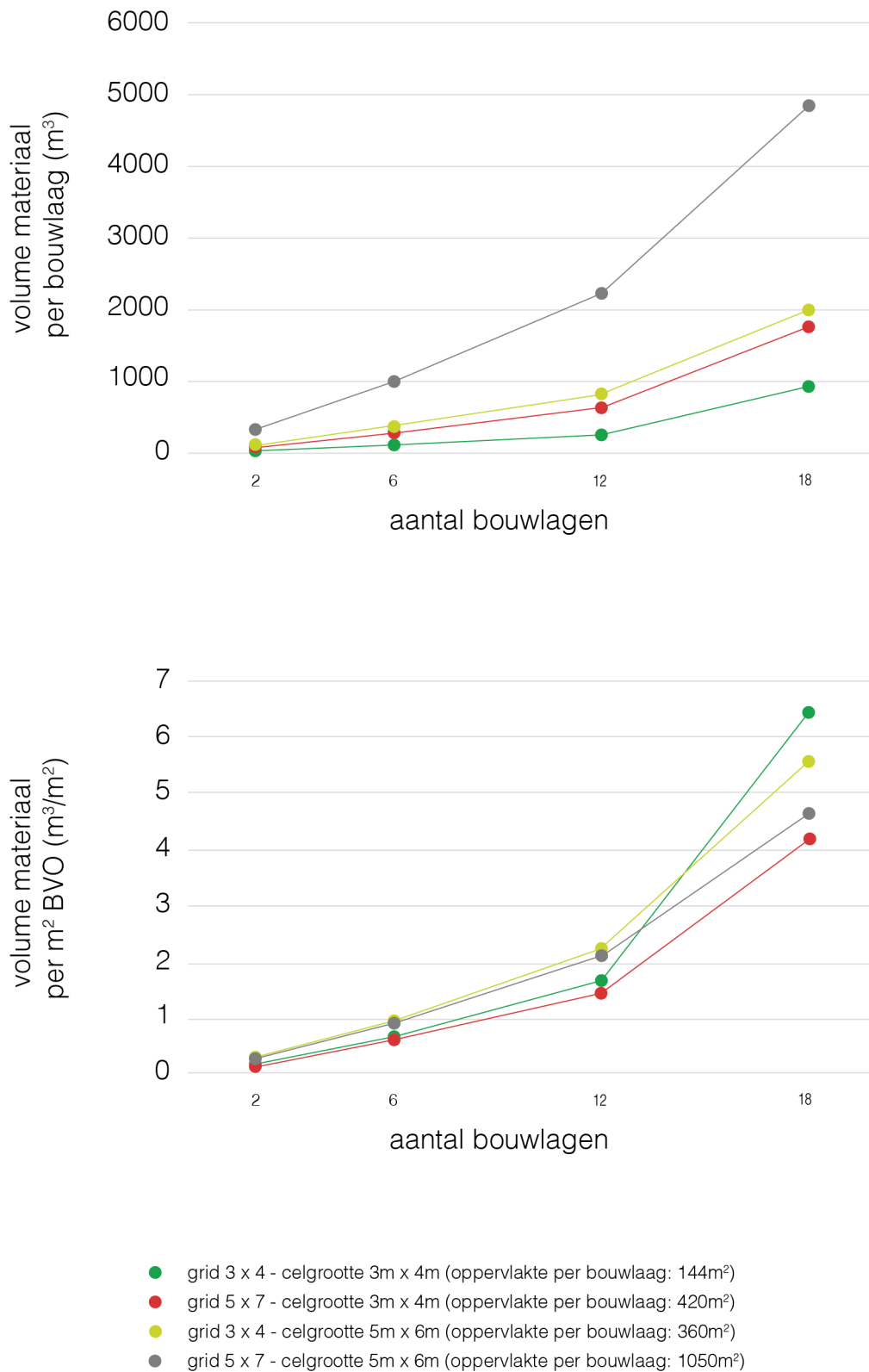
Door deze grids te vergelijken, kunnen we de invloed van zowel de grootte van de basis van het gebouw als van de overspanningslengtes evalueren. Figuur 10 toont de resultaten voor het systeem met windverbanden, Figuur 11 voor de modules met kolommen en balken. De volumes materialen worden telkens weergegeven per bouwlaag (bovenste grafiek) en per vierkante meter vloeroppervlakte (onderste grafiek), gezien de oppervlakte van de bouwlaag varieert voor elke variant. Op basis van de resultaten kunnen we enkele observaties maken:

Grotere overspanningen (door grotere gridmaten) leiden zoals te verwachten tot hoger materiaalgebruik. Vooral bij kleinere gebouwhoogtes speelt dit een belangrijke rol. Tot 12 bouwlagen presteren de grids met cellen van 3m bij 4m immers beter. Bij grotere hoogtes blijkt het **vergroten van de basis** (door grotere en/of een groter aantal gridcellen) een grotere impact te hebben. Bij 18 bouwlagen presteren de systemen met de grootste vloeroppervlakte per bouwlaag immers het best. Uiteraard is het belangrijk op te merken dat het vergroten van de basis (en dus lengte en breedte van het gebouw) een sterke invloed heeft op andere ontwerpaspecten, zoals daglicht en ruimtegebruik. Ook het aanpassen van de gridmaten heeft een invloed op het ruimtegebruik. Voor woongebouwen is een beperkte overspanningslengte echter vaak geen probleem. Ook voor de bouwindustrialisatie kan het nuttig zijn met kleinere, vervoerbare elementen te werken.



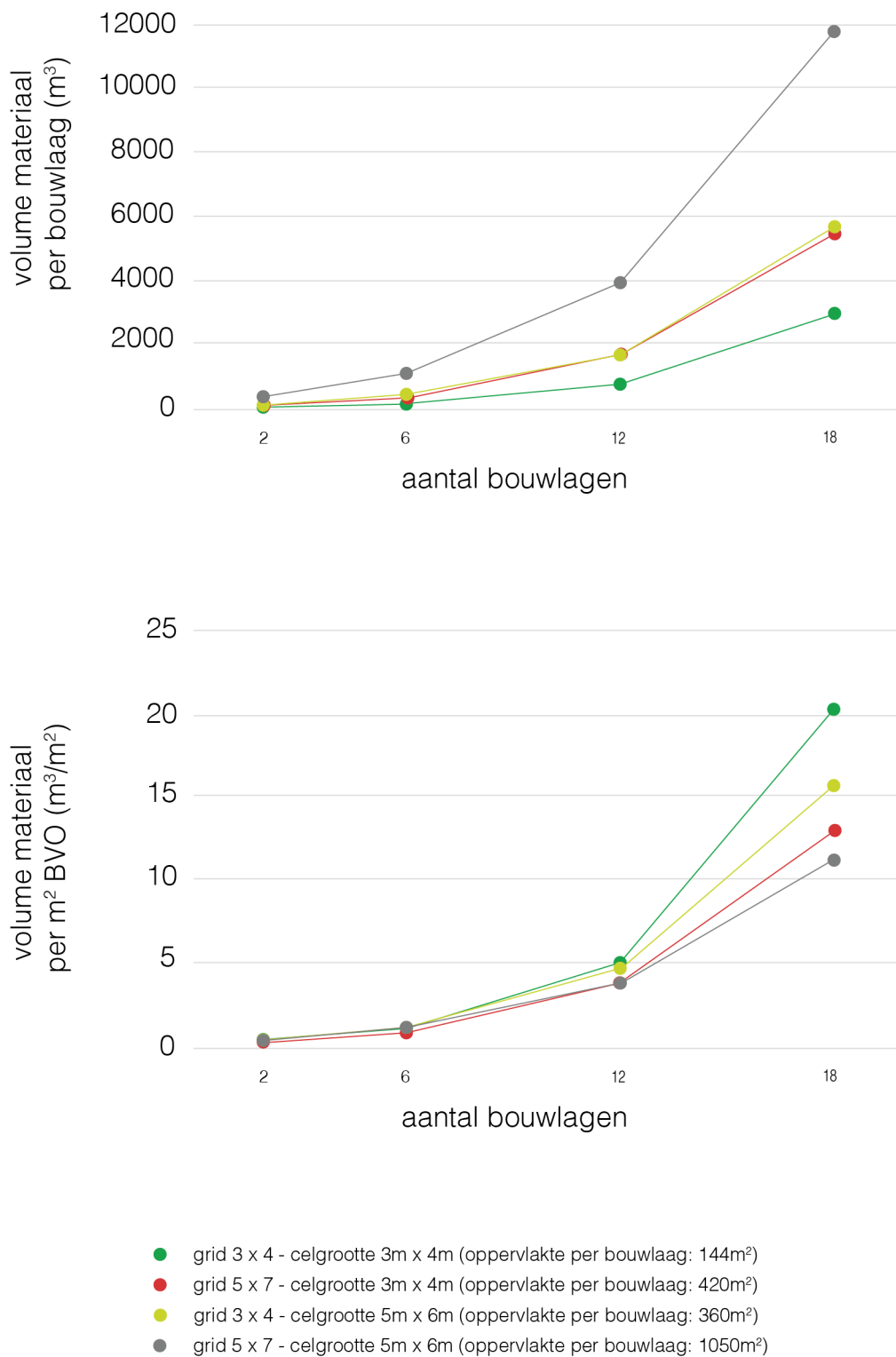
Figuur 9 | De studie beschouwt vier verschillende constructieve grids: schakelingen van 3 bij 4 en 5 bij 7 cellen van 3m bij 4m en 5m bij 6m.

Windverbanden



Figuur 10 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie met windverbanden per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor veranderende gridmaten

Modules - balk en kolom



Figuur 11 | Het volume aan bouw materiaal voor de hoofddraagconstructie met windverbanden per bouwlaag in functie van het aantal bouwlagen voor veranderende gridmaten

3.4 Conclusies

De parametrische studie toont dat de keuze van het bouwsysteem en de afmetingen van zowel het gebouw als het structurele grid een verregaande impact hebben op het totale materiaalgebruik in de constructie. Aangezien die verantwoordelijk is voor het grootste deel van het totale volume en zeker de totale massa aan materialen, is het voor emissieloos bouwen erg belangrijk hier rekening mee te houden. Zeker voor grotere gebouwhoogtes worden de verschillen tussen de bouwsystemen significant. Dit komt door de hoge belastingen (accumulatie van verticale belastingen en hoge windbelastingen) die op deze constructies werken. Constructies op basis van houten kolommen en balken komen het best uit deze vergelijking, in combinatie met windverbanden in de gevel. Een goed stabiliteitssysteem is erg belangrijk. Modulaire systemen kunnen leiden tot extra materiaalgebruik. Combinaties van individuele modules met gedeelde stabiliteitssystemen (zoals kernen of windverbanden langsheen de gevels) kunnen potentieel dat materiaalgebruik verminderen.

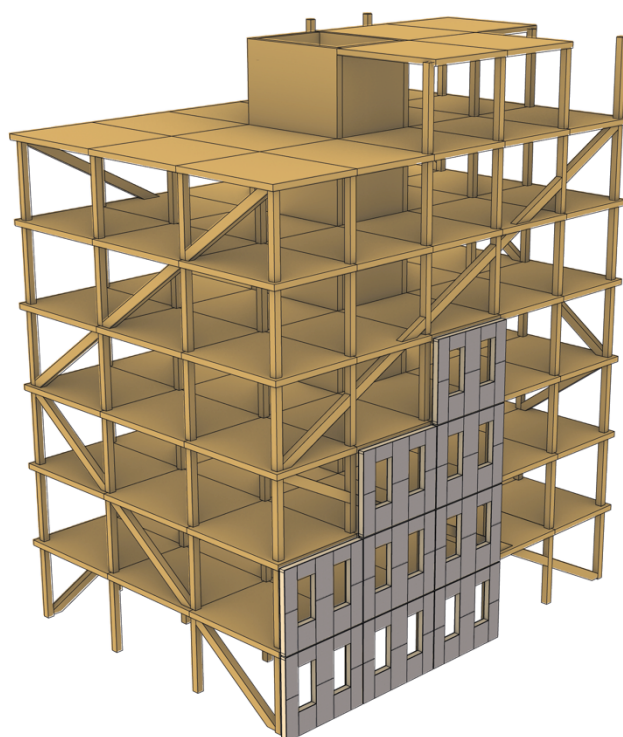
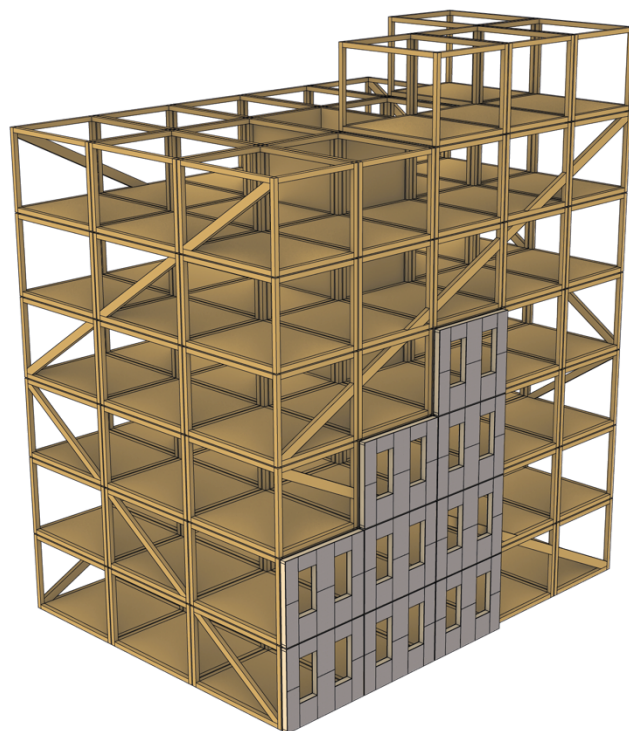
Op basis van deze studie kunnen we ook de vraag naar hoogbouw kritisch benaderen. Het is duidelijk dat met de gebouwhoogte een exponentiële stijging van de benodigde volumes aan materialen plaatsvindt. De gebouwhoogte beperken is dus een goede manier om materiaalgebruik en bijgevolg ook ecologische impact te verminderen.

4 Bouwstelsysteem

Gebaseerd op resultaten van de parameterstudie (hoofdstuk 3) stelt Figuur 12 twee mogelijke bouwstelsystemen voor geïndustrialiseerde lage-emissie hoogbouw voor: op basis van bouwmodules met kolommen en balken (boven) en op basis van kolommen en vloerdelen (onder). Beide houtbouwstelsystemen kunnen worden afgewerkt met geprefabriceerde HSB-geveldelen. In het geval van het modulaire systeem kunnen die ook op voorhand in de kaders geplaatst worden. De stelsystemen hebben enkele specifieke eigenschappen:

- Beide stelsystemen maken gebruik van diagonalen in de gevels die als windverbanden voor het gehele gebouw fungeren. Bij de modules is het belangrijk dat de verbindingen de doorstroom van krachten voldoende garanderen zodat al horizontale belastingen efficiënt kunnen worden afgedragen.
- Het stabiliteitssysteem kan worden aangevuld met een centrale kern of centrale kernen. Die zijn in veel gevallen ook gewenst omwille van akoestiek en brandveiligheid. Tot bepaalde hoogtes moet het mogelijk zijn dit met hout (CLT) uit te voeren. Voor het hogere segment aan hoogbouw (waar dit project minder op is gericht) kan het interessant zijn om toch een betonnen kern toe te voegen.
- Een belangrijke uitdaging voor stelsystemen als deze is akoestiek. Door de lichte constructie is het belangrijk op andere manieren massa of damping toe te voegen.
- Ook voor de brandveiligheid zullen materialen moeten worden toegevoegd. De geveldelen spelen daarbij een belangrijke rol, zie verder. Ook intern zullen brandwerende materialen moeten worden toegevoegd om compartimentering mogelijk te maken.
- Beide stelsystemen kunnen steigerloos worden opgebouwd.
- Beide stelsystemen genieten van een hoge mate van aanpasbaarheid. Door de constructie te optimaliseren, ontstaat veel vrijheid in het plan. Via modulaire, niet-dragende wanden kan de constructie opgevuld en ook weer aangepast worden. Er zijn veel modulaire wandstelsystemen op de markt die in dergelijke stelsystemen kunnen worden toegepast. Aanpasbaarheid van de constructie zelf, is in principe mogelijk door demontabele verbindingen. In de praktijk zal dit niet vanzelfsprekend zijn, tenzij in combinatie met demontage van het gebouw.

Voor de constructie, gevelelementen en vloeren zijn verschillende opbouwen mogelijk. Paragrafen 4.1 tot 4.3 geven een overzicht van mogelijk materialisaties, op basis van de verzamelde producten in bijlage 1. Deze studie beperkt zich voorlopig tot deze drie bouwelementen, aangezien ze grote materiaalvolumes nodig hebben en zo grote bijdrage leveren aan de ecologische impact van het gebouw. Hoeveelheden van benodigde materialen voor de geveldelen worden samengevat in bijlage 2. Deze studie beperkt zich tot het gebruik van bouwmaterialen en doet geen uitspraak over bouwtechnieken.



Figuur 12 | Twee voorstellen voor geïndustrialiseerde lage-emissie hoogbouwssystemen: op basis van een systeem met geprefabriceerde 3D modules en op basis van een systeem met elementenbouw (kolommen en vloeren).

4.1 Constructie

De constructie is bij beide systemen volledig opgebouwd uit hout. Voor deze systemen worden doorgaans geïmporteerde houtsoorten gebruikt, naaldhout zoals douglas of vuren. De elementen zullen in de meeste gevallen gelamineerd hout zijn: CLT en glulam. Gezien de negatieve gevolgen en kwetsbaarheid van monoculturele houtproductie, komt er echter meer aandacht voor het gebruik van een gevarieerder gamma aan houtsoorten, ook loofhout. Door de hoge sterkte, biedt naaldhout mogelijkheden voor meer efficiënt materiaalgebruik en elegantere verbindingen. De keerzijde is dat het trager groeit, meer afval veroorzaakt tijdens het productieproces en dat huidige productiefaciliteiten doorgaans niet aan het gebruik ervan zijn aangepast¹⁴.

4.2 Gevel

Tabel 1 toont mogelijke materialen en producten voor de opbouw van geprefabriceerde gevelpanelen op basis van een HSB constructie, opgesplitst in buitenafwerking, isolatie en binnenafwerking. De isolatie kan via matten in het HSB-elementen worden geplaatst of kan worden ingeblazen. De binnen- en buitenafwerking spelen een belangrijke rol bij de brandveiligheid, waaraan strenge eisen zijn verbonden voor hoogbouw. De brandveiligheid moet hier op het niveau van het volledige bouwelement worden geëvalueerd. Biobased isolatiematerialen scoren op productniveau immers slecht op dit vlak. Een goede afwerking, bijvoorbeeld met een dubbele laag gipsvezelplaat, kan hieraan tegemoetkomen. Ook een onderbreking tussen de gevelelementen onderling kan de brandveiligheid verhogen. Dat kan bijvoorbeeld met een cementplaat. Hoewel de ecologische impact daarvan hoger is, is de totale benodigde hoeveelheid ervan beperkt. Op dit moment zijn slechts weinig biobased producten op de markt die geschikt en veilig zijn voor de buitenafwerking van de gevel. Hier kan het lonen ook naar gerecycleerde of hergebruikte materialen te kijken.

Gevelmodule	
Buitenafwerking	
Materiaal	Product(en)
Hout	Zwarthout MOSO Bamboe X-treme
Biocomposiet	Nabasco biocomposiet gevelpanelen Cirqlar made of Resysta Kerloc Duplicor DBP SIDING NEOLIFE
Gerecycleerd plastic	Pretty Pastic KLP gevelpanelen
Baksteen	Franck

¹⁴ Merz et al. (2021). Building with hardwood.

WasteBasedBricks	
Isolatie	
Materiaal	Product(en)
Kalkhennep	IsoHemp CaNaDry
Hennep	Biofib'Chanvre
Cellulose	EverUse iQ3-cellulose Isocell
Vlas	Isovlas
Kurk	RecYcork Isokurk
Stro	Ecococon EXIE fibres
Houtwol	Pavaflex Plus
Gras	Gramitherm
Gerecycleerd katoen	Métisse Pavatextil P
Mycelium	MycoComposite insulation panel
Binnenafwerking	
Materiaal	Product(en)
Gipskartonplaat	Gyproc
Leemplaat	Lemix leemplaat
Biocomposiet	Circular Matters paneel ECOBoard Standard Mogu Pluma Compostboard ECOR-1 BioM
Leemverf	Tierrafino Leemverf Ecotec Leemverf

Tabel 1 | Mogelijke samenstellingen van geprefabriceerde HSB elementen voor de gevel: materialen en bestaande producten voor de binnen- en buitenafwerking en de isolatie.

4.3 Vloer

Tabel 2 toont mogelijke materialen en producten voor de opbouw van de vloeren. Dit voor de vloerafwerking, de constructie en de plafondaafwerking. De vloerconstructie bestaat veelal uit CLT, maar kan ook met geprefabriceerde kanaalplaten worden voorzien. Die moeten telkens tussen balken worden geplaatst. Voor de afwerkingslagen bestaan enkele biobased varianten zoals biocomposieten, maar ook leem of hout. Gezien de houten constructielaag, is het belangrijk bij de vloeropbouw specifieke aandacht te besteden aan akoestiek.

Vloer	
Vloerafwerking	
Materiaal	Product(en)
Hout	No Waste Floor
Linoleum	Marmoleum Click
Biocomposiet	Walking on Coffee
	Mogu Floor Tiles
Gerecycleerd plastic	Connected Ethos
Constructie	
Materiaal	Product(en)
Hout	LIGNO floor
	Kerto-Ripa
	CLT plaat
Plafondafwerking	
Materiaal	Product(en)
Gipskartonplaat	Gyproc
Leemplaat	Lemix leemplaat
Biocomposiet	Circular Matters paneel
	ECOBoard Standard
	Mogu Pluma
	Compostboard
	ECOR-1
	BioM
Leemverf	Tierrafino Leemverf
	Ecotec Leemverf

Tabel 2 | Mogelijke samenstellingen vloeropbouwen: materialen en bestaande producten voor de vloerafwerking, constructie en plafondafwerking.

Conclusies

Als je in de hoogte bouwt, ontstaan extra uitdagingen voor de draagconstructie. Toch is dat ook met hout mogelijk. Afhankelijk van de hoogte is het belangrijk een gepast systeem te kiezen, zeker voor de stabiliteit. Dankzij gelamineerd hout zoals CLT en glulam, zagen we de voorbije jaren heel wat mooie voorbeelden gerealiseerd worden, vaak in combinatie met beton of staal. Zulke hybride oplossingen laten alvast toe stevig op CO₂ te besparen. Tot op zekere hoogte kan je natuurlijk ook met een zuivere houtconstructie aan de slag. Onze studie vergelijkt de behoefte aan hout van verschillende constructietypes in functie van de gebouwhoogte, die oploopt tot 20 bouwlagen. In de eerste plaats gaat het daarbij om enkele zuivere houtconstructies, met een CLT-kern, CLT-schijvenbouw, geprefabriceerde CLT-volumes en een kolom- en balkensysteem met windverbanden in de gevel. Daarnaast bekeken we ook enkele hybride oplossingen, met een betonnen kern of stalen windverbanden. Zoals te verwachten toont de studie een stijgende houtbehoefte met toename van de gebouwhoogte. Dit is in het bijzonder het geval voor massieve constructies met CLT-kern of schijvenbouw en bouwmodules. Die systemen gaan minder efficiënt om met hout en op grote hoogte levert dit excessief materiaalgebruik op. Een hybride oplossing is hierbij gangbaar en levert inderdaad een lagere materiaalbehoefte op. Toch is het ook mogelijk met een kolom- en balkensysteem te werken, volledig in hout. In dit systeem is het belangrijk de akoestische prestatie vanaf de start goed te ontwikkelen, om te compenseren voor het gebrek aan massa.

Bouwindustrialisatie is een handig middel om op een snelle en gecontroleerde manier aan de stijgende woonneed tegemoet te komen. Zeker voor hoogbouw zijn er kansen om op deze manier het bouwproces te versnellen en de kosten te drukken. Vandaag gaan al heel wat modulebouwers aan de slag met biobased materialen. Een houten module kan uit CLT-wanden bestaan, maar ook met een lichtere skeletconstructie kan je prefab modules bouwen. Voor hoogbouw ligt hier nog heel wat potentieel. De meeste gecommercialiseerde bouwsystemen gaan vandaag maar tot vijf of zes bouwlagen. Om ook hoogbouw met geprefabriceerde bouwvolumes mogelijk te maken, is het belangrijk om naast de constructie van de modules ook de werking van het gebouw als geheel te beschouwen. Zo is het mogelijk om bouwmodules rond een kern te schakelen, die zorgt voor voldoende stabiliteit.

Naast het gebruik van bouwvolumes is het natuurlijk mogelijk om ook met 2D elementen het bouwproces te industrialiseren en versnellen. Dat kan bijvoorbeeld door met geprefabriceerde kolommen en balken of kolommen en vloeren de constructie op te bouwen en daar geprefabriceerde gevelmodules aan te bevestigen. Die gevelmodules kunnen worden opgebouwd uit een lichte HSB-constructie, opgevuld met biobased isolatie. Dit systeem is doorgaans meer materiaal-efficiënt en kan gemakkelijker bij grotere hoogtes worden toegepast. Er liggen waardevolle kansen in het onderzoeken of deze kolom- en balk- of kolom- en vloersystemen ook in driedimensionale prefab modules ontwikkeld kunnen worden.

Voor de opbouw van de verschillende gebouwelementen bestaan al heel wat lage-emissie en biobased bouwproducten. De strenge eisen die gelden bij hoogbouw, vragen daarbij wel om weloverwogen keuzes om ook voldoende comfort en veiligheid te garanderen. Denk daarbij aan akoestiek, onderhoudsgemak en brandveiligheid. Wat betreft brandveiligheid is het belangrijk om producten in hun context te plaatsen. We stellen immers eisen aan een volledig bouwelement, zoals het volledige gevelpakket. Hoewel natuurlijke isolatiematerialen brandbaar zijn, kan je ze goed beschermen door gepaste gevel- en binnenafwerking toe te passen. Daarvoor zijn steeds meer biobased materialen voorhanden, maar ook meer conventionele materialen, zoals gipsplaat, kunnen helpen. Voor hoogbouw is het immers niet gemakkelijk om een 100% biobased gevelpakket te ontwikkelen dat ook aan de strenge brandeisen voldoet. We kunnen zeker uitkijken naar de verdere ontwikkeling van biocomposieten met sterke brandwerendheid. Ondertussen zijn natuurlijk ook andere lage-emissie materialen voorhanden, bijvoorbeeld hergebruikte of gerecycleerde materialen.

Bijlagen

Bijlage 1: overzicht met verzamelde bouwproducten

Om de opbouw van het bouwsysteem en de impactstudie in WP1 te informeren, verzamelde deze taak veelbelovende bouwproducten die vandaag al op de markt zijn. De producten werden geselecteerd op basis van hun potentiële bijdrage aan lage-emissie bouw. Veel van de producten zijn biobased, maar ook hergebruik en recyclage werden meegenomen in dit overzicht. Tabel 3 en Tabel 4 tonen de bouwproducten in verschillende categorieën: binnenwand, constructie, gevelafwerking, gevelpaneel, isolatie, module, schrijnwerk, vloerafwerking, vloerplaat, wandafwerking. De gegevens werden verzameld op basis van een brede online zoekopdracht en door bestaande databases te raadplegen, zoals decirculairebouwcatalogus.nl, circubuild.be, biobasedbouwen.nl en c-bouwers.be.

Product	Producent	Categorie	Materiaal
MODS	MODS	Binnenwand	Hout
MycoComposite block	GROWN bio	Binnenwand	Mycelium
Faay HV84 - BinnenklimaatWand	Faay	Binnenwand	Vlas en hout
Faay VP70 - Scheidingswand	Faay	Binnenwand	Vlasscheven, gipskarton
JUUNOO	JUUNOO	Binnenwand	Metaal
Knauf Hybride Circulaire Wandsysteem	Knauf	Binnenwand	Gipskarton (recuperatie)
Brickette	BC Materials	Constructie	Leem
Kastar	BC Materials	Constructie	Leem
Tierrafino Stampleem	Tierrafino	Constructie	Leem
Systimber	Systimber	Constructie	Hout: CLT
Blokiwood	Tymber Buildings	Constructie	Hout: OSB, houtvezelisolatie
Steko	Steko Holz-Bausysteme AG	Constructie	Hout
Brikawood	Brikawood	Constructie	Hout
CLT BBS	Binderholz	Constructie	Hout: CLT
The CREE System	Cree Buildings	Constructie	Hout
Kruislaaghout	Laminated Timber Solutions	Constructie	Hout: CLT
SI-MODULAR frame	Stellinnovation GmbH	Constructie	Hout
LIGNO Wall	LIGNOTREND	Constructie	Hout: CLT
LIGNATUR element	LIGNATUR	Constructie	Hout
Structurez	WOODinc	Constructie	Hout
Knoopwerk	Knoopwerk	Constructie	Hout
Circulairstaal	Circulairstaal	Constructie	Staal
Donorstaal	Donorstaal	Constructie	Staal
Gerecycleerd beton	Urban Mine	Constructie	Beton
HoutKern Bouwmethode	Circlewood	Constructie	Hout
Nabasco biocomposiet gevelpanelen	Nabasco (NPSP)	Gevelafwerking	Biocomposiet
Cirqlar made of Resysta	Cirqlar Construct	Gevelafwerking	Biocomposiet
Kerloc	Martens Keramiek	Gevelafwerking	Restmateriaal uit land-, tuin- en bosbouw
Pretty Plastic	Pretty Plastic	Gevelafwerking	Gerecycleerd PVC
Rockpanel	ROCKWOOL	Gevelafwerking	Basalt
WasteBasedBricks	Stone Cycling	Gevelafwerking	Gerecycleerd industrieel afval en klei
Recuperatiegevelstenen	Franck	Gevelafwerking	Klei
KLP gevelpanelen	Lankhorst Engineered Products	Gevelafwerking	Gerecycleerd kunststof
DBP SIDING	Innodeen	Gevelafwerking	Houtvezel en gerecycleerd PP
NEOLIFE	LJ Solutions	Gevelafwerking	Houtcomposiet
Zwarthout	Zwarthout	Gevelafwerking	Hout
Bamboo X-treme	MOSO	Gevelafwerking	Bamboe
Duplicor	Holland Composites	Gevelpaneel	Biocomposiet
Prefab kalkhennepbouw	Dunagro	Gevelpaneel	Kalkhennep

Tabel 3 | Verzamelde bouwproducten: binnenwand, constructie, gevelafwerking en gevelpaneel

Product	Producent	Categorie	Materiaal
Schelpen	Ecoschelp	Isolatie	Schelpen
Hennepblokken	IsoHemp	Isolatie	Kalkhennep
EverUse Circulaire Isolatieplaat	EverUse	Isolatie	Cellulose
EcoCocon	EcoCocon	Isolatie	Stro (in houten frame)
RecYcork	De Vlaspit	Isolatie	Kurk
Bouwstrobalen	Woonder	Isolatie	Stro
Kalkhennep	Woonder	Isolatie	Kalkhennep
EXIE Fibres	EXIE	Isolatie	Stro
CaNaDry	EXIE	Isolatie	Kalkhennep
Pavaflex Plus	Soprema	Isolatie	Houtwol
Gramitherm	Gramitherm	Isolatie	Gras
Métisse	Le Relais	Isolatie	Gerecycleerd katoen
Pavatextil P	Soprema	Isolatie	Gerecycleerd katoen
Biofib'Chanvre	Biofib	Isolatie	Hennep
iQ3-cellulose	Isoproc	Isolatie	Cellulose
Isocell	Isocell	Isolatie	Cellulose
Pan-terre	Acoustix	Isolatie	Cellulose
BAUX Acoustic Pulp	Baux	Isolatie	Biocomposiet
Vlasplaten	Isovlas	Isolatie	Vlas
BIO- EPS	Biofoam	Isolatie	Biocomposiet
Biobased EPS- parels	Kostonnoord	Isolatie	Biocomposiet
MycoComposite insulation panel	GROWN bio	Isolatie	Mycelium
Isokurk	Pro Suber	Isolatie	Kurk
Multimax 30	Isover	Isolatie	Gerecycleerd glaswol
Finch	Finch Building	Module	Hout (CLT) + gevelafwerking van hout, aluminium of baksteen
Daiwa House Modular Europe	Daiwa House Modular Europe	Module	Staal, hout, beton
LLEX	Hahbo	Module	Hout
Skilpod	Skilpod	Module	Hout
Woon- en werkmodules	Tymer Buildings	Module	Hout
Wecube	Wecube	Module	Hout
De Meeuw	De Meeuw	Module	Verschillende
PLEKvoor	Solid Home Group	Module	Hout
ModuleHome	ModuleHome	Module	Hout
isoMAX Circu-therm	GSF Glasfgroep	Schrijnwerk	Glas (gerecupereerd)
Walking on Coffee	Touch of Nature	Vloerafwerking	Biocomposiet
Marmoleum Click	Forbo	Vloerafwerking	Linoleum
Connected Ethos	Interface	Vloerafwerking	Gerecycleerd nylon
Mogu Floor Tiles	Mogu	Vloerafwerking	Biocomposiet (mycelium)
No Waste Floor	Herso	Vloerafwerking	Hout (deels gerecycleerd)
LIGNO Floor	LIGNOTREND	Vloerplaat	Hout: CLT
LIGNO Roof	LIGNOTREND	Vloerplaat	Hout: CLT
Kerto-Ripa kanaalplaat	Metsä Wood	Vloerplaat	Hout
Brusseleir	BC Materials	Wandafwerking	Leem
Tierrafino Base	Tierrafino	Wandafwerking	Leem
ECOBoard Standard	ECOBOARD International	Wandafwerking	Stro (en andere bio-vezels)
Clicwall	Unilin	Wandafwerking	MDF
Gipskartonplaten	Gyproc	Wandafwerking	Gipskarton
Tierrafino Leemverf	Tierrafino	Wandafwerking	Leem
Ecotec Leemverf	Ecotec	Wandafwerking	Leem
Circular Matters paneel	Circular Matters	Wandafwerking	Biocomposiet
Lemix leemplaat	Lemix	Wandafwerking	Leem
Mogu Pluma	Mogu	Wandafwerking	Biocomposiet (mycelium)
Compostboard	Rik Makes	Wandafwerking	Biocomposiet
ECOR-1	ECOR	Wandafwerking	Cellulose (reststromen)
BioM	Van Hier	Wandafwerking	Natuurlijke reststromen en vezels

Tabel 4 | Verzamelde bouwproducten: isolatie, module, schrijnwerk, vloerafwerking, vloerplaat en wandafwerking

Bijlage 2: inschatting materiaalhoeveelheden

Houten draagconstructie

Deze gegevens geven de materiaalhoeveelheden voor hout weer voor de constructie van gebouwen afhankelijk van het aantal bouwlagen. Dit gebeurt voor een selectie van geschikte of veelvoorkomende constructie types of bouwsystemen. De gegeven waarden zijn afgeleid uit de parametrische studie (via software Grasshopper - Karamba) en gelden voor de gegeven gebouw- en materiaaleigenschappen. Die zijn representatief voor hoogbouw in Nederland.

De materiaalvolumes leiden tot volumes per wooneenheid aan de hand van de gemiddelde woonoppervlakte in Nederland.

Tabel 5 toont de volumes hout voor de verschillende bouwsystemen en hoogtes. Tabel 6 toont de variabelen die werden gebruikt in de studie. De gemiddelde woonoppervlakte werd ontleend aan de data van het Bureau voor Statistiek.

Aantal bouwlagen	Bouwsysteem	Volume per bouwlaag (m ³)	Woonheden per laag	Volume per eenheid (m ³)
5	Kolom en balk	59	4	14,75
	Massiefbouw (CLT)	72	4	18
10	Kolom en balk	64	4	16
	Massiefbouw (CLT)	94	4	23,5
	Kern (hybride-beton)	71	4	17,75
	Kern (CLT)	94	4	23,5
	Kern (CLT)	94	4	23,5
15	Kolom en balk	80	4	20
	Massiefbouw (CLT)	302	4	75,5
	Kern (hybride-beton)	110	4	27,5
	Kern (CLT)	167	4	41,75

Tabel 5 | Volume hout per wooneenheid voor veelvoorkomende of veelbelovende bouwsystemen, afhankelijk van het aantal bouwlagen.

Gebouweigenschappen	
Lengte (m)	24
Breedte (m)	15
Oppervlakte gebouwlaag (m ²)	360
Gemiddelde woonopp. (m ²)	87
Wooneenheden per laag	4
Materiaaleigenschappen	
Type	Gelamineerd hout
Sterkteklasse	GL24c
Dichtheid	500-650 kg/m ³

Tabel 6 | Variabelen van de studie

Gevelmodules

Deze gegevens leveren de materiaalhoeveelheden voor biobased isolatie, houtvezelplaat (of eigenwaardig plaatmateriaal) en gezaagd hout voor een prefab HSB gevelement van een gebouw met de gegeven afmetingen. Op basis van een gemiddelde woningoppervlakte, komt daar een volume per wooneenheid uit voort.

Het gevelement dient enkel zelfdragend te zijn, de stabiliteit van het gebouw wordt door de constructie zelf gegarandeerd.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van het isolatiemateriaal en de Rc-waarde (eis) zijn voor deze studie vastgelegd op 0,038 en 6 respectievelijk. Dit op basis van referentiewaarden en studies binnen andere taken van het onderzoeksproject.

Tabel 5 toont de volumes aan materiaal voor de gevelementen. Tabel 6 toont de variabelen die werden gebruikt in de studie. De gemiddelde woonoppervlakte werd ontleend aan de data van het Bureau voor Statistiek.

Materiaal	Volume per meter (m ³)	Volume per bouwlaag (m ³)	Volume per wooneenheid (m ³)
Biobased isolatie	0,90	42,07	10,52
Houtvezelplaat	0,07	3,20	0,80
Hout (prefab HSB gevelement)	0,16	7,66	1,91

Tabel 7 | Volume aan isolatie, hout en plaatmateriaal per wooneenheid voor geprefabriceerde HSB gevelementen.

Gebouweigenschappen	
Lengte (m)	24
Breedte (m)	15
Oppervlakte gebouwlaag (m ²)	360
Gemiddelde woonopp. (m ²)	87
Wooneenheden per laag	4
Hoogte gebouwlaag (m)	3,8
Geveloppervlakte per bouwlaag (m ²)	296,4
Percentage gesloten geveloppervlak	0,6
Gesloten geveloppervlakte per bouwlaag (m ²)	177,84
Isolatie	
Warmtegeleidingscoëfficiënt λ (W/mK) - isolatie	0,038
Warmtegeleidingscoëfficiënt λ (W/mK) - plaat	0,35
Dikte plaat (m)	0,018
Warmtegeleidingscoëfficiënt λ (W/mK) - gipskarton	0,4
Dikte gipskarton (m)	0,0125
R _{si} (m ² K/W)	0,13
R _{se} (m ² K/W)	0,04
R _c (m ² K/W)	6
Dikte isolatie (m)	0,24
Materiaaleigenschappen hout	
Type	gezaagd hout
Dikte (m)	0,038
Doorsnede (m ²)	0,0090

Tabel 8 | Variabelen van de studie

