

GELUIDISOLATIEPRESTATIES PREFAB-HOUTEN MODULES VOOR WONINGBOUW

GELUIDMETINGEN HOUTKERN-MODULES (CIRCLEWOOD)

Hout als constructiemateriaal wordt steeds populairder vanwege de duurzaamheid en gewicht in vergelijking met staal en beton in de bouw. Prefabricage van houten modules verbetert de bouwefficiëntie en veiligheid, verhoogt de bouwsnelheid en geeft milieuvoordelen, waarbij hoogbouw steeds meer financieel haalbaar wordt. Om deze redenen worden houten prefab modules beschouwd als een mogelijke duurzame oplossing voor de vraag naar woningen in Nederland. Om te worden toegepast in woongebouwen moeten modulaire houten constructies echter voldoen aan de eisen die worden gesteld in het Bouwbesluit (2012), waaronder die met betrekking tot de lucht- en contactgeluidisolatie.



dr. G. (Giacomo) Vairretti,
ABT BV, Delft



A.A. (Alfons) Hartman,
abtWassenaar B.V.,
Groningen



ir. R. (Rudi) Roijackers,
Lüning b.v. / Quake innovation b.v., Velp

In dit artikel bespreken we de resultaten van twee akoestische meetcampagnes gericht op het evalueren van de geluidisolatieprestaties van zo'n houten prefab module: houtkern-module van Circlewood. De eerste metingen werden uitgevoerd in 2021 voor de houtkern-modules die ontwikkeld zijn voor het Energie Hotel in Ede.

Vervolgens zijn in 2023 in samenwerking met TNO opnieuw geluidmetingen uitgevoerd, om de gemaakte keuzes in vloer- en wandconstructies nader te beoordelen en te toetsen aan de geldende eisen uit het Bouwbesluit (2012).

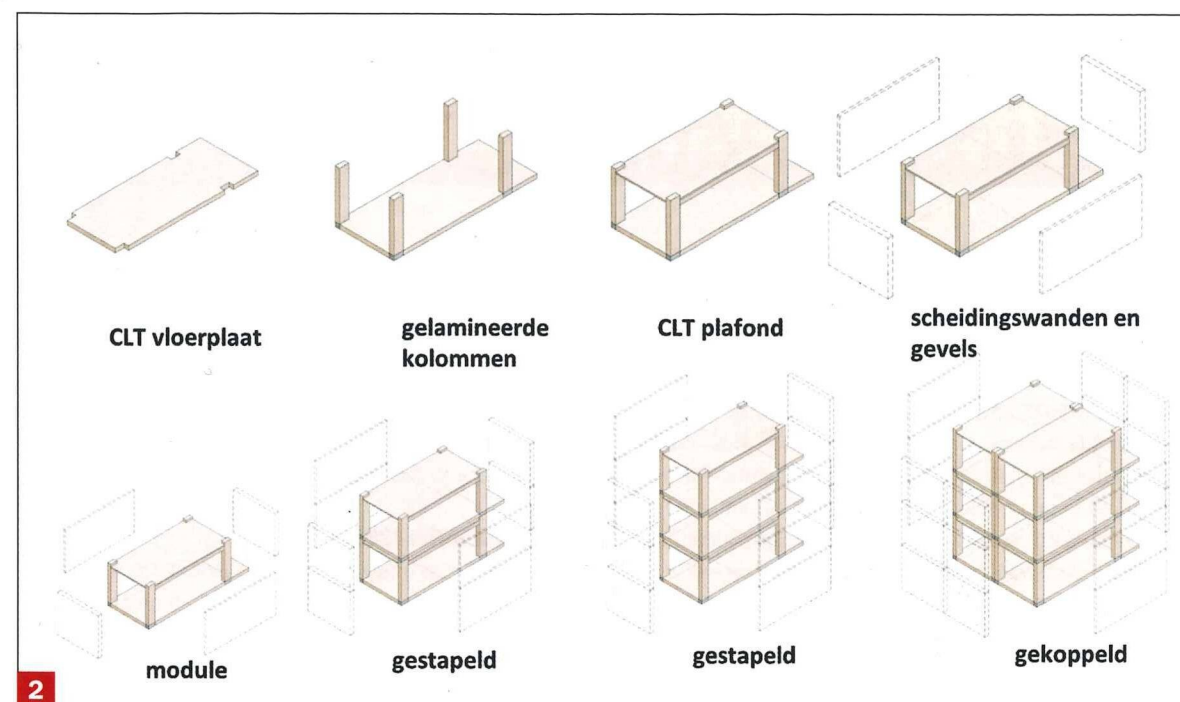
INLEIDING

Hout als constructiemateriaal is de laatste jaren steeds populairder geworden, zowel voor woningen als voor utiliteitsbouw [1]. Hout is een duurzaam bouw materiaal, lichter dan beton, wat de productie, het transport en de constructie vergemakkelijkt. De mogelijkheid om modules te prefabriceren is de sleutel om de bouw van woningen en utiliteitsgebouwen te versnellen, door meer efficiëntie in het bouwproces. Belangrijke aspecten zijn het gemak en de snelheid van montage ter plaatse, de

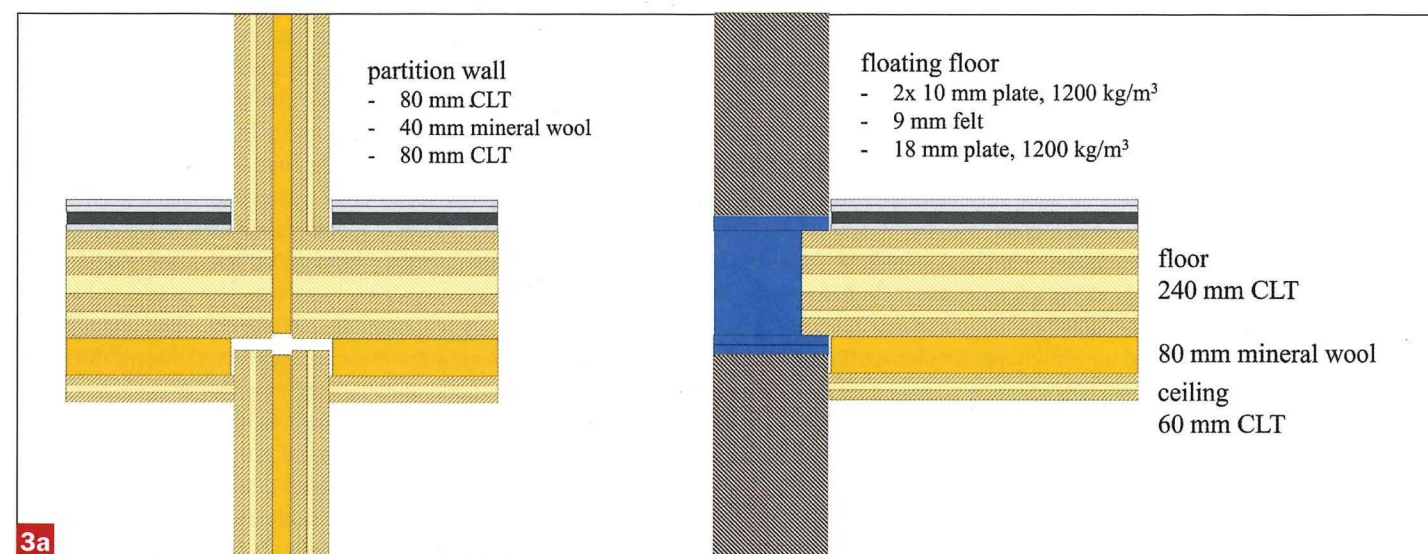
mogelijkheid om de modules te demonteren en opnieuw te gebruiken of te recyclen en de vermindering van emissie in het milieu [2, 3, 4]. Hierbij wordt zowel gebruikgemaakt van CLT (Cross Laminated Timber), als van andere producten zoals LVL (laminated veneer lumber) of HSB (Houtskeletbouw). Het gebruik van prefab houten modules wordt ook gezien als een duurzame en kosteneffectieve benadering van de toenemende vraag naar woningen [2, 3, 4]. De Nederlandse overheid heeft als doel om tussen nu en 2030 900.000 nieuwe woningen te realiseren [5]. Daarnaast moet de CO₂-uitstoot in hetzelfde jaar met 49% verminderd zijn [6]. De houtkern-modules van Circlewood kunnen daarbij een belangrijke rol spelen. Het uitgangspunt daarbij is dat de houtkern-modules onder andere voldoen aan de eisen voor de lucht- en contactgeluidisolatie uit het Bouwbesluit (2012, Afdeling 3.4. Vanaf 2024 Besluit Bouwwerken Leefomgeving, paragraaf 4.3.4). Daarbij is prefabricage een voordeel, omdat variaties in onder andere het te verwachten akoestisch comfort aanzienlijk consistentier kunnen zijn in vergelijking met productie ter plaatse. Mede omdat prefabricage wordt uitgevoerd in een gecontroleerde omgeving [7].



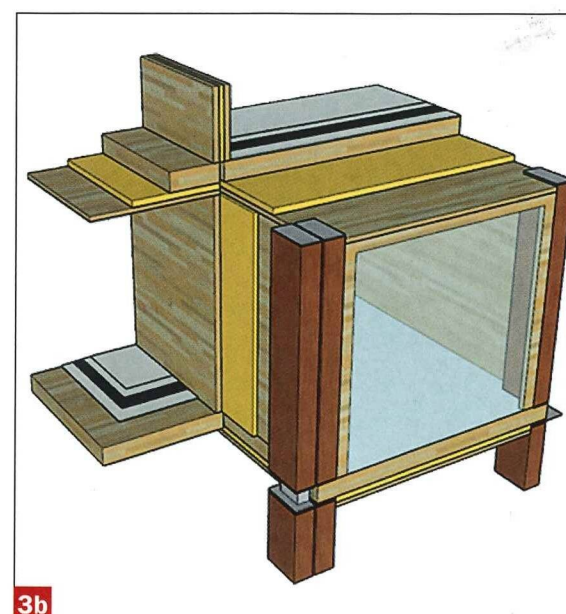
Houtkern-modules (Circlewood) in verticale (links) en horizontale opstelling (rechts) – 1^e geluidmetingen (2021)



Schematische weergave opbouw modules



Schematische weergaven van de vloer-, plafond en wandopbouw



3D-weergave van de CLT-module

Zowel in de woningbouw als in de utiliteitsbouw worden al prefab houten modules toegepast. De komende jaren zullen steeds meer hoogbouw gebouwen hun intrede doen. Eén daarvan is het Energie Hotel, een 15 verdiepingen hoog energiezuinig en circulair gebouw dat wordt ontwikkeld in Ede, langs de A12, bestaande uit prefab CLT-modules die zijn gemonteerd rond een stalen centrale kern.

In basis bestaat elke houtkern-module uit een CLT-vloerplaat met daarin stalen schoenen en daarop gelamineerde houten kolommen. Vervolgens wordt op de kolommen een CLT-plafondplaat aangebracht. Hierdoor ontstaat een volledig dragende constructie wanneer de modules op elkaar worden gestapeld. In verticale richting worden de modules met elkaar verbonden door de stalen schoenen. In horizontale richting zorgt een aanvullende koppelplaat voor de verbinding. Dit systeem creëert een dubbele scheidingsconstructie waarbij, zowel in horizontale richting (wand-wand) als in verticale richting (vloer-plafond)

Tabel 1: Gemeten lucht- en contactgeluidisolatie (verticaal en horizontaal)

Sit.	Beschrijving	$D_{nT,A,k}$ [dB] eis Bouwbesluit	$D_{nT,A,k}$ [dB] gemeten	$L_{nT,A}$ [dB] eis Bouwbesluit	$L_{nT,A}$ [dB] gemeten
1	Houtkern-modules verticaal	≥ 52	49	≤ 54	54
2	Houtkern-modules horizontaal	≥ 52	42	≤ 54	55

de stalen verbinding de enige akoestische koppeling vormt. In figuur 2 is een schematische weergave van de opbouw van de modules weergegeven.

De uitgebreide lucht- en contactgeluidisolatiemetingen, volgens NEN 5077:2019, waren uitgevoerd om te beoordelen wat het te verwachten akoestisch comfort was, uitgaande van een hotelfunctie. De metingen waren ook uitgevoerd om te beoordelen welke mogelijk aanvullende maatregelen aan de vloer, plafond, scheidingswanden en isolatiemateriaal nodig waren om de modules geschikt te maken als woonfunctie.

De recente metingen in 2023 zijn uitgevoerd, om de gemaakte keuzes in vloer- en wandconstructies verder in detail akoestisch te beoordelen.

BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING (2021)

De geluidisolatiemetingen zijn in 2021 uitgevoerd in de fabrieksfaciliteiten van Heko Spanten B.V. in Ede in samenwerking met de Noordereng Groep. Voor de test zijn twee prototype CLT-modules gebruikt. De modules bestonden uit 240 mm CLT-vloer, met daarop 18 mm Fermacell, 9 mm vilt en 2x 10 mm Fermacell, een plafond van 60 mm CLT, waarbij tussen vloer en plafond 80 mm minerale wol is aangebracht. De kolommen op de stalen knopen hadden een afmeting van 260 x 500 mm. De gevel bestond uit een 90 mm houten kozijn met gelaagd glas 6/6/1 mm. De kozijnen waren onafhankelijk bevestigd aan de houten kolommen. De niet dragende binnenwanden bestonden uit 80 mm CLT-elementen op een spouw van 40 mm. De spouw is gevuld met 30 mm minerale wol. Alle zichtbare naden bij de aansluitingen tussen de wanden en de overige bouwelementen waren lucht- en kierdicht uitgevoerd. In figuur 3a is de opbouw schema-

tisch weergegeven. Een 3D-weergave van de module wordt getoond in figuur 3b.

De twee houtkern-modules zijn zowel verticaal als horizontaal getest, zoals weergegeven in figuur 1. In figuur 4 is een detail weergegeven van de stalen schoen en de stalen verbindingsplaten. Deze platen verbinden de houtkern-modules in horizontale richting voor stabiliteit.

MEETRESULTATEN (2021)

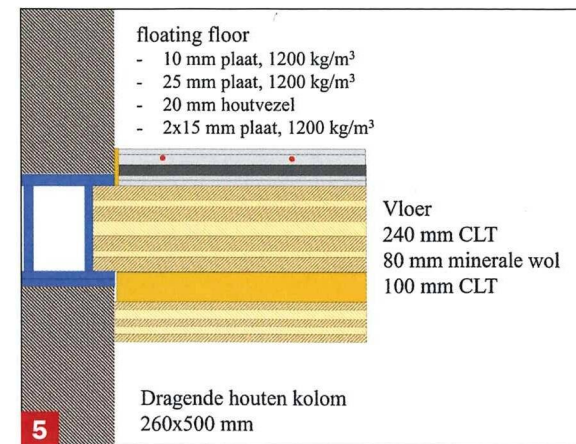
De metingen zijn uitgevoerd in tertsbanden in overeenstemming met NEN 5077:2019. De resultaten van de metingen zijn getoetst aan de geluideisen uit het Bouwbesluit (2012). De luchtgeluidisolatie (karakteristiek luchtgeluidniveauverschil $D_{nT,A,k}$) is beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. Voor de contactgeluidisolatie (gewogen contactgeluidniveau $L_{nT,A}$) zijn de waarden ook beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. In tabel 1 zijn de belangrijkste meetresultaten van de metingen weergegeven.

Uit de metingen volgt dat de houtkern-modules al een redelijke goede lucht- en contactgeluidisolatie hebben, maar dat de waarden, met name de luchtgeluidisolatie nog niet aansluiten bij de eisen uit het Bouwbesluit (2012).

De lage waarde van de luchtgeluidisolatie wordt mede veroorzaakt door de lichte opbouw van de scheidingswanden. Uit geluid- en trillingsmetingen bleek een relatieve lage bijdrage van flankerend geluid van de stalen schoenen en kolommen, zowel in horizontale als in verticale richting, mede veroorzaakt door het gewicht van de stalen schoen en houten kolom. Uit de metingen volgde ook, dat het vervangen van het vilt als verende laag door



Detail stalen schoen met daarop de houten kolom en verbindingsplaat



Schematische weergave van de vloeropbouw

minerale wol een verdere verbetering van de contactgeluidisolatie opleverde.

De houtkern-modules uit deze eerste test kunnen al wel worden toegepast in tijdelijke woningbouw. Voor tijdelijke woningbouw (maximaal 15 jaar) zijn de geluideisen minder streng (-10 dB lager). Naar verwachting zal de geluidisolatie in met name de horizontale richting verder verbeteren omdat onder andere wanden worden voorzien van extra beplating vanwege eisen voor brandveiligheid. Maar we zijn verdergegaan in de ontwikkeling, om te komen tot een goede oplossing voor reguliere woningbouw.

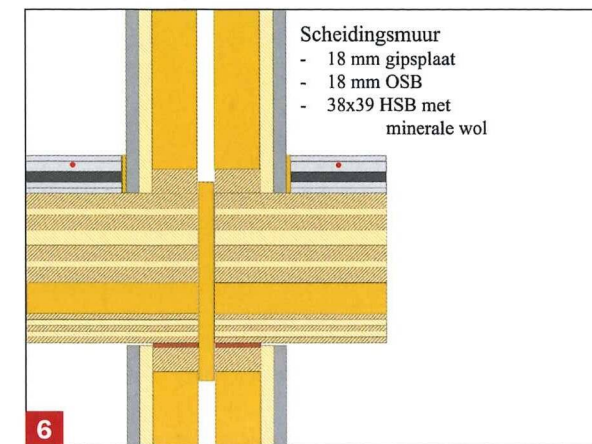
VERDERE ONTWIKKELING

Zoals al eerder aangegeven, was een verdere ontwikkeling van de houtkernmodules gewenst om deze te laten voldoen aan de lucht- en contactgeluideisen uit het Bouwbesluit. Bij de verdere ontwikkeling is ook gekeken hoe, met name ten aanzien van contactgeluid, de geluidisolatie in de lage frequenties kon worden verbeterd.

Dit heeft geresulteerd in een aantal verbeteringen. De modules bestaan nog steeds uit een 240 mm CLT-vloer, maar nu met daarop 30 mm Fermacell, 20 mm houtvezelplaat als verende laag in combinatie met 30 mm cellenbetonkorrels. Verder een plafond van 80 mm CLT, waarbij tussen vloer en plafond 80 mm minerale wol is aangebracht, zie onderstaand figuur 5. Voor de niet-dragende binnenwanden hebben we twee varianten beoordeeld: - 100 mm CLT-elementen op een spouw van 80 mm. De spouw is gevuld met 80 mm minerale wol. - HSB-elementen van 90 mm dik, waarbij tussen de stijlen 100 mm minerale wol is aangebracht. De wanden zijn



Impressie van de meetopstelling (wanden CLT)



Schematische weergave van de opbouw van de scheidingswanden

afgewerkt met 18 mm OSB en 18 mm Fermacell. De spouw tussen de HSB-elementen is ca. 20-30 mm. In figuur 6 is een schematische opbouw weergegeven.

BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING (2023)

De meetopstelling bestond uit twee gestapelde appartementen. In praktijkuitvoering bestaan appartementen uit twee modules. In de meetopstelling zijn deze twee modules uit elkaar gehaald en ruggelings tegen elkaar gezet zodat in horizontale richting de juiste wandconfiguratie kon worden gemeten. De vloer- en wandconstructies waren uitgevoerd zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. De wanden van de modules op de begane grond zijn uitgevoerd in CLT. Op de verdieping zijn de wanden uitgevoerd in HSB. De andere zijden van de modules zijn dichtgezet met beplating. Voor de meetopstelling bestonden de gevels van de modules uit 90 mm houten kozijnen met gelaagd glas 6/6/1. In onderstaande afbeeldingen is een impressie gegeven van de meetopstelling.

MEETRESULTATEN (2023)

De geluidmetingen voor de nieuwe configuraties zijn uitgevoerd in samenwerking met TNO en de Noordereng Groep. Ook nu mochten we gebruik maken van de fabrieksfaciliteiten van Heko Spanten B.V. in Ede.

De metingen zijn uitgevoerd zoals eerder omschreven in hoofdstuk 3. De resultaten van de metingen zijn getoetst aan de geluideisen uit het Bouwbesluit (2012). De luchtgeluidisolatie (karakteristiek luchtgeluidniveauverschil $D_{nT,A,k}$) zijn beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. Voor de contactgeluidisolatie (gewogen contactgeluidniveau $L_{nT,A}$) zijn de waarden beoordeeld voor het bereik 100 Hz – 3,15 kHz en voor 50 Hz – 31,5 kHz. De



Impressie van de meetopstelling (wanden HSB)

Tabel 1: Gemeten lucht- en contactgeluidisolatie (verticaal en horizontaal)

Sit.	Beschrijving	$D_{nT,A,K}$ [dB] eis Bouwbesluit	$D_{nT,A,K}$ [dB] gemeten	$L_{nT,A}$ [dB] eis Bouwbesluit	$L_{nT,A}$ [dB] gemeten
1	Houtkern-modules verticaal	≥ 52	49	≤ 54	54
2	Houtkern-modules horizontaal	≥ 52	42	≤ 54	55

de stalen verbinding de enige akoestische koppeling vormt. In figuur 2 is een schematische weergave van de opbouw van de modules weergegeven.

De uitgebreide lucht- en contactgeluidisolatiemetingen, volgens NEN 5077:2019, waren uitgevoerd om te beoordelen wat het te verwachten akoestisch comfort was, uitgaande van een hotelfunctie. De metingen waren ook uitgevoerd om te beoordelen welke mogelijk aanvullende maatregelen aan de vloer, plafond, scheidingswanden en isolatiemateriaal nodig waren om de modules geschikt te maken als woonfunctie.

De recente metingen in 2023 zijn uitgevoerd, om de gemaakte keuzes in vloer- en wandconstructies verder in detail akoestisch te beoordelen.

BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING (2021)

De geluidisolatiemetingen zijn in 2021 uitgevoerd in de fabrieksfaciliteiten van Heko Spanten B.V. in Ede in samenwerking met de Noordereng Groep. Voor de test zijn twee prototype CLT-modules gebruikt. De modules bestonden uit 240 mm CLT-vloer, met daarop 18 mm Fermacell, 9 mm vilt en 2x 10 mm Fermacell, een plafond van 60 mm CLT, waarbij tussen vloer en plafond 80 mm minerale wol is aangebracht. De kolommen op de stalen knopen hadden een afmeting van 260 x 500 mm. De gevel bestond uit een 90 mm houten kozijn met gelaagd glas 6/6/1 mm. De kozijnen waren onafhankelijk bevestigd aan de houten kolommen. De niet dragende binnenwanden bestonden uit 80 mm CLT-elementen op een spouw van 40 mm. De spouw is gevuld met 30 mm minerale wol. Alle zichtbare naden bij de aansluitingen tussen de wanden en de overige bouwelementen waren lucht- en kierdicht uitgevoerd. In figuur 3a is de opbouw schema-

tisch weergegeven. Een 3D-weergave van de module wordt getoond in figuur 3b.

De twee houtkern-modules zijn zowel verticaal als horizontaal getest, zoals weergegeven in figuur 1. In figuur 4 is een detail weergegeven van de stalen schoen en de stalen verbindingsplaten. Deze platen verbinden de houtkern-modules in horizontale richting voor stabiliteit.

MEETRESULTATEN (2021)

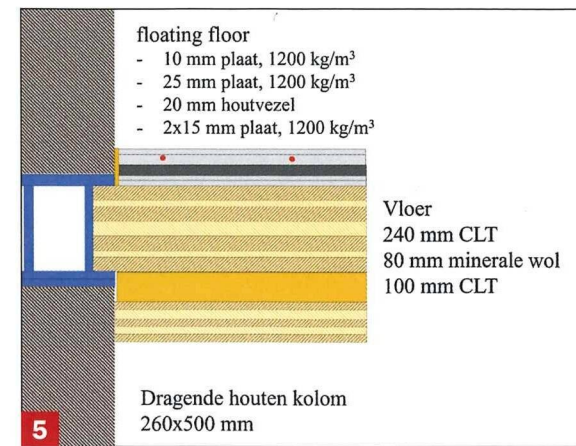
De metingen zijn uitgevoerd in tertsbanden in overeenstemming met NEN 5077:2019. De resultaten van de metingen zijn getoetst aan de geluideisen uit het Bouwbesluit (2012). De luchtgeluidisolatie (karakteristiek luchtgeluidniveauverschil $D_{nT,A,K}$) is beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. Voor de contactgeluidisolatie (gewogen contactgeluidniveau $L_{nT,A}$) zijn de waarden ook beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. In tabel 1 zijn de belangrijkste meetresultaten van de metingen weergegeven.

Uit de metingen volgt dat de houtkern-modules al een redelijke goede lucht- en contactgeluidisolatie hebben, maar dat de waarden, met name de luchtgeluidisolatie nog niet aansluiten bij de eisen uit het Bouwbesluit (2012).

De lage waarde van de luchtgeluidisolatie wordt mede veroorzaakt door de lichte opbouw van de scheidingswanden. Uit geluid- en trillingsmetingen bleek een relatieve lage bijdrage van flankerend geluid van de stalen schoenen en kolommen, zowel in horizontale als in verticale richting, mede veroorzaakt door het gewicht van de stalen schoen en houten kolom. Uit de metingen volgde ook, dat het vervangen van het vilt als verende laag door



Detail stalen schoen met daarop de houten kolom en verbindingsplaat



Schematische weergave van de vloeropbouw

minerale wol een verdere verbetering van de contactgeluidisolatie opleverde.

De houtkern-modules uit deze eerste test kunnen al wel worden toegepast in tijdelijke woningbouw. Voor tijdelijke woningbouw (maximaal 15 jaar) zijn de geluideisen minder streng (-10 dB lager). Naar verwachting zal de geluidisolatie in met name de horizontale richting verder verbeteren omdat onder andere wanden worden voorzien van extra beplating vanwege eisen voor brandveiligheid. Maar we zijn verdergegaan in de ontwikkeling, om te komen tot een goede oplossing voor reguliere woningbouw.

VERDERE ONTWIKKELING

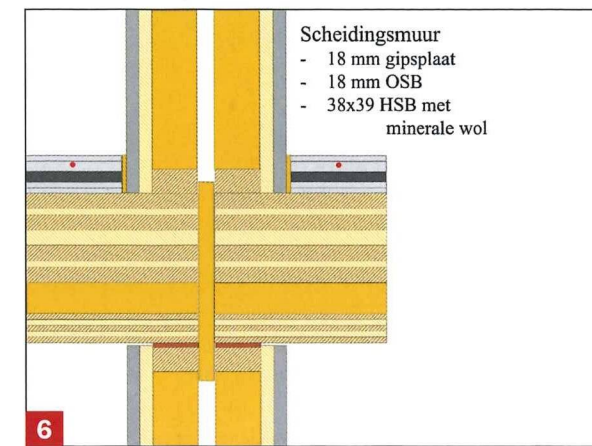
Zoals al eerder aangegeven, was een verdere ontwikkeling van de houtkernmodules gewenst om deze te laten voldoen aan de lucht- en contactgeluideisen uit het Bouwbesluit. Bij de verdere ontwikkeling is ook gekeken hoe, met name ten aanzien van contactgeluid, de geluidisolatie in de lage frequenties kon worden verbeterd.

Dit heeft geresulteerd in een aantal verbeteringen. De modules bestaan nog steeds uit een 240 mm CLT-vloer, maar nu met daarop 30 mm Fermacell, 20 mm houtvezelplaat als verende laag in combinatie met 30 mm cellenbetonkorrels. Verder een plafond van 80 mm CLT, waarbij tussen vloer en plafond 80 mm minerale wol is aangebracht, zie onderstaand figuur 5. Voor de niet-dragende binnenwanden hebben we twee varianten beoordeeld:

- 100 mm CLT-elementen op een spouw van 80 mm. De spouw is gevuld met 80 mm minerale wol.
- HSB-elementen van 90 mm dik, waarbij tussen de stijlen 100 mm minerale wol is aangebracht. De wanden zijn



Impressie van de meetopstelling (wanden CLT)



Schematische weergave van de opbouw van de scheidingswanden

afgewerkt met 18 mm OSB en 18 mm Fermacell. De spouw tussen de HSB-elementen is ca. 20-30 mm. In figuur 6 is een schematische opbouw weergegeven.

BESCHRIJVING VAN DE MEETOPSTELLING (2023)

De meetopstelling bestond uit twee gestapelde appartementen. In praktijkuitvoering bestaan appartementen uit twee modules. In de meetopstelling zijn deze twee modules uit elkaar gehaald en ruggelings tegen elkaar gezet zodat in horizontale richting de juiste wandconfiguratie kon worden gemeten. De vloer- en wandconstructies waren uitgevoerd zoals beschreven in het vorige hoofdstuk. De wanden van de modules op de begane grond zijn uitgevoerd in CLT. Op de verdieping zijn de wanden uitgevoerd in HSB. De andere zijden van de modules zijn dichtgezet met beplating. Voor de meetopstelling bestonden de gevels van de modules uit 90 mm houten kozijnen met gelaagd glas 6/6/1. In onderstaande afbeeldingen is een impressie gegeven van de meetopstelling.

MEETRESULTATEN (2023)

De geluidmetingen voor de nieuwe configuraties zijn uitgevoerd in samenwerking met TNO en de Noordereng Groep. Ook nu mochten we gebruik maken van de fabrieksfaciliteiten van Heko Spanten B.V. in Ede.

De metingen zijn uitgevoerd zoals eerder omschreven in hoofdstuk 3. De resultaten van de metingen zijn getoetst aan de geluideisen uit het Bouwbesluit (2012). De luchtgeluidisolatie (karakteristiek luchtgeluidniveauverschil $D_{nT,A,K}$) zijn beoordeeld voor het standaardbereik 100 Hz – 3,15 kHz. Voor de contactgeluidisolatie (gewogen contactgeluidniveau $L_{nT,A}$) zijn de waarden beoordeeld voor het bereik 100 Hz – 3,15 kHz en voor 50 Hz – 31,5 kHz. De



Impressie van de meetopstelling (wanden HSB)



9 Impressie van de meetopstelling (wanden HSB)



10 Impressie van de stalen schoenen

Tabel 2: Gemeten lucht- en contactgeluidisolatie (verticaal en horizontaal)

Sit.	Beschrijving	$D_{nT,A;k}$ [dB] eis Bouwbesluit	$D_{nT,A;k}$ [dB] gemeten	$L_{nT,A}$ [dB] eis Bouwbesluit	$L_{nT,A}$ [dB] gemeten
1	Houtkern-modules verticaal	≥ 52	53	≤ 54	46 (4)
2	Houtkern-modules horizontaal (CLT)	≥ 52	55	≤ 54	37 (5)
3	Houtkern-modules horizontaal (HSB)	≥ 52	52	≤ 54	37 (5)

correctieterm is tussen haakje weergegeven. In tabel 2 zijn de belangrijkste meetresultaten van de metingen weergegeven.

Uit de metingen volgt dat de houtkern-modules voldoen aan lucht- en contactgeluidisolatie-eisen uit het Bouwbesluit (2012). Ook de contactgeluidisolatie, rekening houdend met de lagere frequenties, is goed.

De lucht- en contactgeluidisolatiewaarden zullen naar verwachting in de praktijk nog beter uitpakken, omdat tijdens de metingen omloopgeluid via de buitenzijde van de units aanwezig was als gevolg van de lichte beplating van de omhulling. Ook naden en kieren speelden een rol. Ook nu volgde uit geluid- en trillingsmetingen een relatieve lage bijdrage van flankerend geluid in zowel horizontale als verticale richting van de stalen schoenen en kolommen.

Tijdens de metingen en verplaatsingen van de modules is ook waardevolle informatie verkregen ten aanzien van bijvoorbeeld naden en kieren, alsmede aanwezige aansluitingen van wanden op kolommen en aansluitingen van kozijnen. Waardoor de prefabricage van de units nog verder kan worden geoptimaliseerd. Zo is nu gekozen om de wanden uit te voeren met een aanslag, waardoor een goede lucht- en kierdichte aansluiting wordt gerealiseerd tussen wanden, vloer en plafond die ook goed standhoudt bij het verplaatsen van de units.

CONCLUSIES

De prefab houtkern-modules (Circlewood) hebben zich de afgelopen jaren ontwikkeld van een prefab module voor een hotel tot een volwaardige unit geschikt voor zowel woningbouw als utiliteitsbouw. De units kunnen voldoen aan de geluidisolatie-eisen uit het Bouwbesluit en hebben ook ten aanzien van de contactgeluidisolatie in de lagere frequenties een goede geluidisolatie. Inmiddels zijn er verschillende projecten in behandeling, waaronder woningbouw, waarin de houtkern-modules zullen worden toegepast. De units kunnen in verschillende configuraties worden toegepast. De beperkte koppeling van de units zorgt binnen alle configuraties voor een goede geluidiso-

latie. Het toepassen van de prefab houtkern-module is daarom een duurzame en kosteneffectieve oplossing [2, 3, 4] voor de grote vraag naar woningen.

Dankbetuigingen

De auteurs danken Heko Spanten B.V. (Ede, Nederland) voor het maken van de houtkern-modules en voor de assistentie tijdens de meetcampagne, Noordereng Groep voor de ondersteuning en TNO ten tijde van de uitvoering van de metingen in 2023 en alle andere partners in de ontwikkeling: DWA, Ferros, Lomas, Hedgehog, BBN, Quake en Lüning. ■

BRONNEN

- [1] A. Di Bella and M. Mitrovic, "Acoustic characteristics of cross-laminated timber systems," *Sustainability* 12.14, p. 5612, 2020
- [2] S. Lehmann, "Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 6, pp. 57-67, 2013
- [3] W. Ferdous, Y. Bai, T. D. Ngo, A. Manalo and P. Mendis, "New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings—A state-of-the-art review," *Engineering Structures* 183, pp. 883-893, 2019
- [4] A. Dodoo, L. Gustavsson and S. Roger, "Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems," *Energy and Buildings* 82, pp. 194-210, 2014
- [5] Rijksoverheid, "Staat van de woningmarkt 2020," 15 06 2020. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/06/15/staat-van-de-woningmarkt-2020>
- [6] Rijksoverheid, "Kabinet kiest voor verantwoorde inzet biograndstoffen," 16 10 2020. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/10/16/kabinet-kiest-voor-verantwoorde-inzet-biograndstoffen>
- [7] R. Öqvist, F. Ljunggren and A. Ågren, "On the uncertainty of building acoustic measurements—Case study of a cross-laminated timber construction," *Applied Acoustics* 73.9, pp. 904-912, 2012