

CLT-woongebouw in aanbouw.

Woongebouwen van kruislaaghout: duurzaam en fire resilient?

Kruislaaghout (Cross Laminated Timber: CLT) wint aan populariteit omdat hout in de basis een duurzaam bouwmateriaal is. Daarnaast kunnen houten draag- en scheidingsconstructies volgens de bouwregelgeving zonder bescherming voldoende brandwerend zijn. Dat kan door in de dimensionering rekening te houden met de inbranddiepte die in het hout optreedt gedurende de tijdsduur dat de constructie brandwerend moet zijn. Als de gereduceerde doorsnede na die tijdsduur nog voldoende is om in het belastinggeval 'brand' voldoende sterkte en thermische weerstand te bieden, kan het betreffende houten constructiedeel als voldoende brandwerend worden beschouwd. Echter, die brandwerendheid houdt niet automatisch in dat de constructie de brand ook overleeft. In dit artikel worden de consequenties voor het brandscenario van een houten gebouw vergeleken met die van een traditioneel, vrijwel onbrandbaar gebouw.

Tekst Ruud van Herpen

Een *fire resistant* constructie is niet automatisch *fire resilient* (brandbestendig). Het Bouwbesluit (en ook de opvolger, Besluit bouwwerken leefomgeving, Bbl) staat een afbrandscenario toe, mits de draagconstructie en (sub)brandcompartimentering voldoende tijd bieden aan de gebouwgebruikers om een veilige plaats te bereiken. De kans op een afbrandscenario neemt toe wanneer de bouwconstructie brandbaar is, zoals bij CLT-gebouwen het geval is. Dat betekent niet dat die gebouwen veel onveiliger zijn, maar wel dat ze minder fire resilient zijn. Dat strookt niet met de doelstellingen van een duurzaam gebouw.

Fire resilience en publiekrechtelijk toetskader

Het publiekrechtelijk toetskader ligt in het Bouwbesluit/Bbl. Het gaat om een verzameling prescriptieve voorschriften, die grofweg in de volgende afgeleide doelen (of risicosubsystemen) kunnen worden ondergebracht:

1. Veiligheid van gebouwgebruikers en hulpverleners (vluchtroute en aanvalsroute).
2. Veiligheid van brandcompartimenten (beperking branduitbreidingsgebied).
3. Veiligheid van subbrandcompartimenten (beperking van verspreiding van rook).
4. Veiligheid van het gebouw (in stand houding draagconstructie).
5. Veiligheid van de omgeving (voorkomen brandoverslag naar buurpercelen).

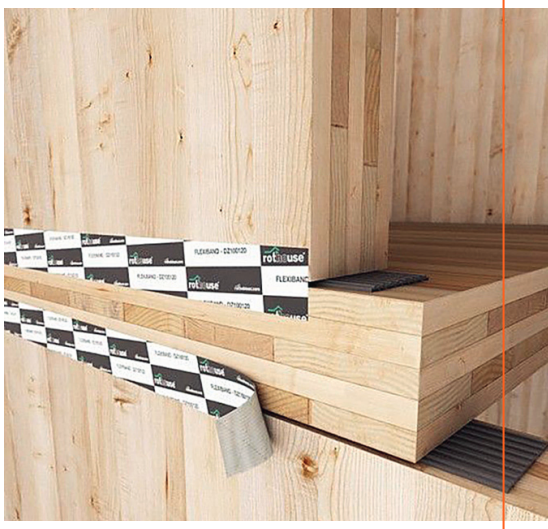
De publiekrechtelijke hoofddoelen die hiermee moeten worden geborgd zijn persoonlijke veiligheid van gebouwgebruikers en hulpverleners en de veiligheid van eigendommen van derden (buurpercelen). De afgeleide doelen 1 en 5 houden daar direct verband mee. De afgeleide doelen 3, 4 en 5 kunnen worden gezien als Lines of Defence (LOD's of 'verdedigingslinies'). Daarmee kan tijd gewonnen worden, zodat de hoofddoelen eenvoudiger zijn te realiseren.
Wanneer de voornoemde LOD's met een hoge betrouwbaarheid worden uitgevoerd kan voorkomen worden dat een gebouw afbrandt. Wanneer de brand met grote zekerheid beperkt blijft tot een relatief klein uitbreidingsgebied kan het gebouw fire resilient genoemd worden. Dat is mogelijk met een actief blussysteem, maar ook met een betrouwbare brandcompartimentering. De brandcompartimentering moet dan betrouwbaarder zijn dan voorgeschreven in Bouwbesluit/Bbl, dus een hogere WBDBO-eis (Weerstand tegen BrandDoorslag en BrandOverslag) bezitten met beperking van overdracht via flankerende constructies (zoals de gevel).

Houten draagconstructie

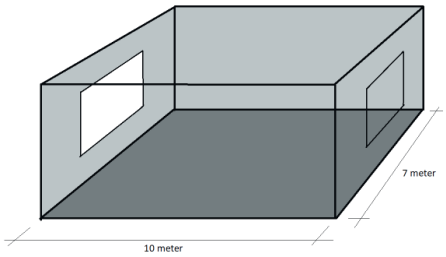
Een draagconstructie in hout kan onbeschermd voldoende brandwerend zijn, wanneer de inbranddiepte gedurende de benodigde brandwerendheidsduur voldoende doorsnede over laat om in het belastinggeval 'brand' de krachten te kunnen afdragen. De Eurocode geeft hiervoor een berekeningswijze die rekening houdt met de duur waarover de constructie brandwerend moet zijn.
Impliciet is daarbij het uitgangspunt dat de constructie niet blijft branden nadat dat tijdsbestek is verstreken. Met andere woorden: de brand in de constructie dooft gelijktijdig met de brand in het compartiment. Dat is nog niet zo logisch. Het is denkbaar dat de constructie blijft doorbranden en uiteindelijk toch bezwijkt. Bij gelamineerde constructies kan daarnaast de inbranding worden versneld doordat de lijm verweekt of mee gaat branden en lamellen van de constructie loslaten. Omgekeerd is het ook denkbaar dat de inbrandsnelheid vertraagt omdat de koollaag die aan de oppervlakte ontstaat isolerend werkt, zolang die koollaag niet van de constructie af valt.
Echter, in alle gevallen is de draagconstructie die de brand overleeft niet meer bruikbaar na de brand. De gereduceerde doorsnede zal onvoldoende zijn voor de normale gebruiksbelasting. In de praktijk zal het vervangen van de constructie de enige optie zijn. Een fire resistant draagconstructie in hout is dus zonder bescherming niet fire resilient (Zee, 2018).

Houten brandscheidingen

Bij brandwerende scheidingsconstructies speelt de afdracht van krachten ten gevolge van een mechanische belasting geen rol. Hier is alleen de thermische weerstand van belang, die ervoor moet zorgen dat aan de EI- of EW-criteria (brandwerendheid in minuten standaard brand) volgens NEN-EN 13501-2 wordt voldaan.
Echter, het voldoen aan de criteria volgens NEN-EN 13501-2 zegt niets over de faalkans van de scheidingsconstructie. De faalkans wordt bepaald door de thermische belasting ten gevolge van de brand en de thermische weerstand (brandwerendheid) van de scheidingsconstructie. Dit is een RST-AST analyse. De RST (Required Safe Time, benodigde vluchttijd) is daarin de thermische belasting die door een brand wordt geleverd, uitgedrukt in minuten standaard brand. De AST (Available Safe Time, beschikbare vluchttijd) is de brandwerendheid van de scheidingsconstructie, eveneens uitgedrukt in minuten standaard brand. Zolang AST › RST is de scheidingsconstructie succesvol, waarbij de constructie betrouwbaarder is naarmate het interval AST-RST groter is.
De standaard brandkromme wordt gebruikt om de brandwerendheid te bepalen met behulp van gestandaardiseerde testmethoden. De werkelijke temperatuurontwikkeling van een brand in een brandcompartiment volgt niet de standaard brandkromme, maar wordt



In woningbouw zijn de draagconstructies tevens de scheidingsconstructies.



Figuur 1. Isometrie van het brandcompartiment (appartement).

bepaald door project-specifieke bouwkundige kenmerken en brandkenmerken. In een natuurlijk brandconcept volgens NEN 6055 is het mogelijk deze kenmerken te waarderen.
Zo kan voor een klein compartiment met een woonfunctie (een appartement van 70 m²) het verschil worden beschouwd in de thermische belasting (RST) tussen traditionele steenachtige bouw en houtbouw in CLT. Het appartement is in beide situaties voorzien van daglichtopeningen in twee gevels die niet brandwerend zijn. Dat houdt in dat na flashover het glas in de daglichtopeningen als bezweken kan worden beschouwd. De daglichtopeningen zijn precies zo groot aangenomen dat na flashover de brand zich in de overgang van brandstofbeheerst naar ventilatiebeheerst bevindt. Dat leidt tot de grootste thermische belasting en kan dus als worst-case gezien worden.
Figuur 1 geeft een eenvoudige voorstelling van het brandcompartiment. Tabel 1 geeft een overzicht van de belangrijkste randcondities, uitgaande van een cellulose-achtige vuurlast met brandstofformule $C_4H_6O_3$ (NEN 6065).
De thermische belasting door de gastemperaturen ten gevolge van een natuurlijke brand in het appartement is in beide situaties vertaald naar een equivalente brandduur volgens de standaard brandkromme. De equivalente brandduur volgt uit de gecumuleerde interne gasenergie tijdens de totale natuurlijke brand. Het verschil in thermische belasting ten gevolge van brand in een traditioneel appartement met die in een CLT-appartement is duidelijk zichtbaar in figuur 2.
Uit figuur 2 blijkt dat de equivalente brandduur van een natuurlijke brand in een traditionele woning ongeveer 54 minuten bedraagt en in een CLT-woning 101 minuten. Dit betekent voor het interval AST-RST bij gemiddelde randcondities:

- traditionele woning: AST - RST = 60 - 54 = +6 min. standaard brandkromme
- CLT-woning: AST - RST = 60 - 101 = -41 min. standaard brandkromme

Uit de resultaten blijkt dat een 60 minuten brandwerende scheidingsconstructie in een traditioneel appartement een faalkans bezit van minder dan 50%. De faalkans van een 60 minuten brandwerende scheidingsconstructie in een CLT-appartement is voor een natuurlijke brand veel groter. De kans dat een CLT-gebouw een uitslaande woningbrand overleeft zonder repressieve brandweerinzet is daardoor klein. Een CLT-woongebouw is zonder aanvullende maatregelen niet fire resilient.

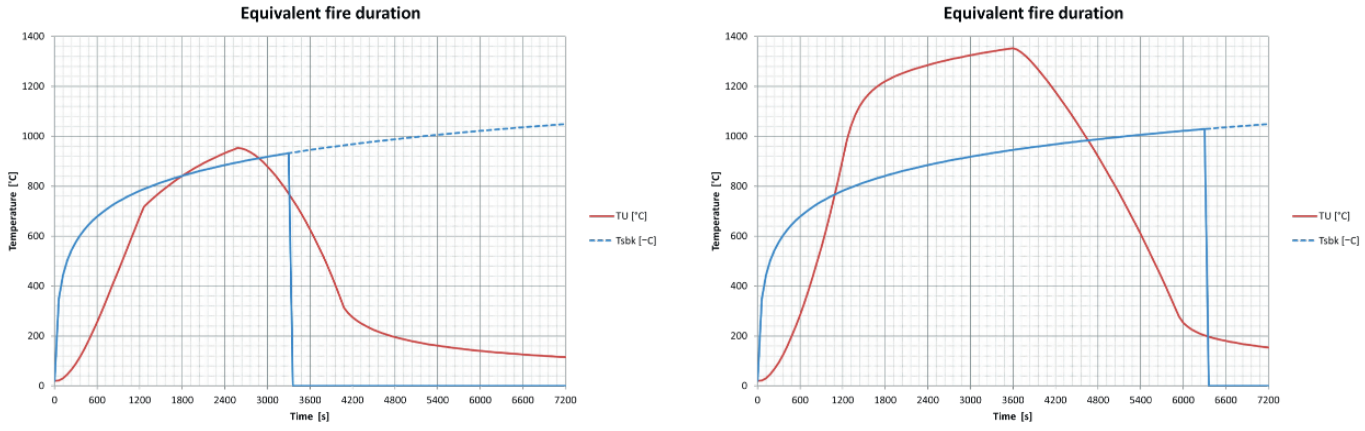
Tabel 1. Overzicht randcondities voor de natuurlijke brand.

Grootheid		Traditioneel	CLT
Permanente vuurbelasting (gemiddeld)	[MJ/m²]	-	400[2]
Variabele vuurbelasting (gemiddeld)	[MJ/m²]	780[1]	780[1]
Brandvermogensdichtheid	[kW/m²]	250[1]	250[1]
Tijdconstante brandontwikkeling	[s]	300[1]	300[1]
Verbrandingswaarde	[MJ/kg]	17,5[3]	17,5[3]
Stoichiometrische constante	[kg/kg]	1,27[3]	1,27[3]
Verbrandingsefficiëntie	[-]	0,8[3]	0,8[3]
Bezweken daglichtopeningen h x b	[m]	1,5 x 8,2 (totaal)	1,5 x 8,4 (totaal)

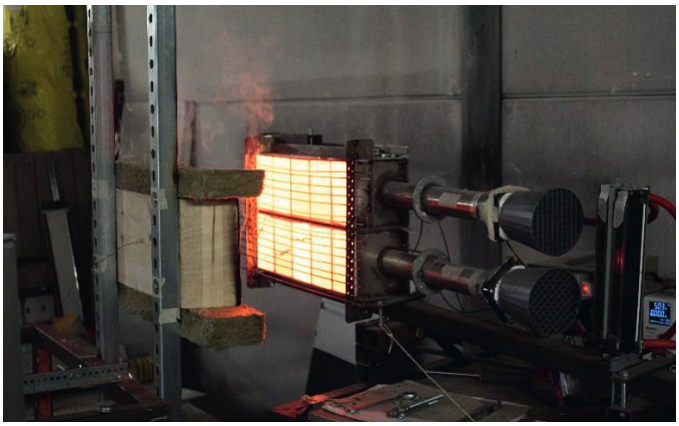
1. **Volgens NEN-EN 1991-1-2+NB.**
2. **Uitgaande van een karakteristieke permanente vuurbelasting van 500 MJ/m².**
3. **Volgens NEN 6055.**

Zelfdovend effect van CLT

Er is een kans dat de brand in de CLT-constructie dooft wanneer de variabele vuurbelasting is verbrand. Dan blijft een deel van de CLT-constructie behouden (Crielaard, 2015). Deze moet worden vervangen of gerepareerd, maar de brand is wel beperkt gebleven tot één compartiment. Daardoor zijn de CLT-constructies buiten het uitgebrande compartiment niet aangetast.
Echter, in een compartiment met wanden en vloeren van onbeschermd CLT leveren die constructies nog langere tijd voldoende energie aan elkaar om de brand in stand te houden nadat de variabele vuurlast is verbrand. Om na te gaan bij welke warmtebelasting (stralingsflux) de brand in een CLT-constructie uiteindelijk dooft zijn experimenten uitgevoerd in het brandlab van Peutz aan CLT-proefstukken met verschillende lameldikten en lijmsoorten (Berdugo, 2022). De proefstukken zijn daarbij blootgesteld aan een initiële stralingflux van 25 kW/m2, die na 30 minuten in verschillende experimenten werd teruggebracht tot 20, 15, 10 en 5 kW/m2. De lagere stralingsflux werd vervolgens 60 minuten in stand gehouden. De



Figuur 2. Natuurlijke brandkromme en bijbehorende equivalente brandduur volgens de standaard brandkromme voor een traditioneel appartement (links) en een CLT-appartement (rechts).



Testen van een CLT-proefstuk voor het stralingspaneel.



Vlammende verbranding bij stralingsflux 25 kW/m².

duur van elk experiment bedroeg dus 90 minuten.
De proefstukken zijn langs de randen geïsoleerd met steenwol, om inbranding via de randen te vermijden. Vervolgens zijn de proefstukken voor een stralingspaneel opgesteld.
Bij alle stralingsfluxen in het experimenteel onderzoek blijkt de koollaag te groeien, zolang die stralingsflux aanwezig is. Bij de laagste warmtestralingsflux van 5 kW/m² is niet helemaal duidelijk of er nog van een smeulbrand gesproken kan worden, hoewel het massaverlies van het proefstuk met een vrijwel constante snelheid door gaat. Dat kan ook veroorzaakt worden door verdamping van vocht en pyrolyse van hout, zonder verbranding. Het gevolg hiervan is dat de doorsnede van het CLT-proefstuk dieper aangetast is dan de visueel waarneembare koollaag doet vermoeden. De belangrijkste resultaten zijn samengevat in tabel 2.
In de experimenten is geen zelfdovend effect van de CLT-constructie waargenomen. Daarom wordt momenteel in het brandlab van Peutz een tweede reeks experimenten uitgevoerd met stralingsfluxen tussen 0 en 5 kW/m². Hieruit moet blijken of kan worden vastgesteld onder welke stralingsflux van een zelfdovend effect gesproken kan worden.



Smeulende verbranding achter de koollaag aan de voorzijde. Wanneer de koollaag de lijmlaag tussen twee lamellen nadert, raakt de verkoolde lamel los van de constructie en ontstaat weer een vlammende brand. Dit effect is bij poly-urethaan lijm (PU) heftiger dan bij melaminelijm (ME).

Conclusie

Uit zowel de simulaties als de experimenten blijkt dat in CLT-woongebouwen in geval van een brand in een appartement de brand in de CLT-constructie niet vanzelf dooft. Er zijn dus aanvullende maatregelen nodig om een CLT-woongebouw dezelfde mate van fire resilience te geven als een traditioneel woongebouw. Hoewel dit geen publiekrechtelijke doelstelling is, strookt fire resilience wel met duurzaamheidsdoelstellingen en wordt het woongebouw daarmee ook toekomstbestendiger. De persoonlijke veiligheid van de gebouwgebruikers is dan namelijk minder afhankelijk van het vermogen van de gebouwgebruikers om zelfstandig te kunnen vluchten.
Voor een fire resilient woongebouw is bescherming van de CLT-constructie noodzakelijk. Dat kan een bouwkundige bescherming zijn (brandwerend bekleden of coaten), of een installatietechnische bescherming die ingrijpt in het brandscenario (automatische blusinstallatie). Er kan ook aan meer innovatieve oplossingen worden gedacht, zoals het dubbelbladig uitvoeren van brandscheidingen (wanden en vloeren), waarbij de spouw tussen de bladen wordt gevuld met steenwol. Elk appartement vormt zo een eigen CLT-box, die geïsoleerd is van de rest van de CLT-constructie. De detaillering, met name de aansluiting aan de gevels, verdient daarbij bijzondere aandacht.

Tabel 2. Resultaten van de experimenten (Berdugo, 2022).

Stralingsflux [kW/m²]	Verbranding	Massaverlies [kg/(m².min)]	Inbrandsnelheid (mm/min)
25	Koollaag 0 – 2,5 mm: Vlammend, temp.: > 500 °C	0,135 (gemiddeld)	0,3 (gemiddeld)
	Koollaag 2,5 – 8 mm: Overgang vlammend → smeulend, temp.: 500 – 300 °C		
	Koollaag > 8 mm: Smeulend, temp.: 300 °C		
15, 10, 5	Koollaag > 8 mm: Smeulend, temp.: 150 - 250 °C	0,068 (gemiddeld)	0,15 (gemiddeld)

Literatuur

- NEN 6055:2011 nl – Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept – Bepalingsmethode – NNI, Delft.
- NEN-EN 1991-1-2+C3+NB:2019 – Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand – NEN, Delft.
- NEN-EN 1995-1-2+C2+NB:2011 – Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houconstructies – Deel 1-2: Ontwerp en berekening van constructies bij brand – NEN, Delft.
- Crielaard, R. (2015). *Self extuingishment of cross laminated timber*. TU Delft, civil engineering.
- Zee, P. (2018). *Vertikaal dragend verlijmd kruislaaghout en brandveiligheid*. Hanzehogeschool Groningen, Bouwkunde.
- Berdugo, A.F. (2022). *Fire resilience of cross laminated timber in residential buildings*. Politecnico Torino, Architecture-Construction-City.

Informatie over de auteur
Ruud van Herpen, Fellow Fire Engineering, TU Eindhoven.