

# Fire resilience als duurzaamheidskenmerk

## Woningbouw in CLT, is dat fire resilient?

Ruud van Herpen  
TU Eindhoven – Fellow Fire Engineering

### Introductie

Cross Laminated Timber (CLT), of in het Nederlands kruislaaghout, wint aan populariteit omdat hout een duurzaam bouw materiaal is. Daarnaast kunnen houten draag- en scheidingsconstructies zonder bescherming voldoende brandwerend zijn, wanneer in de dimensionering rekening wordt gehouden 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 of thermische weerstand te bieden kan het betreffende houten constructiedeel als voldoende brandwerend worden beschouwd.

Maar heeft de constructie dan ook de brand overleefd? Is de constructie niet alleen *fire resistant* maar ook *fire resilient*? Dat zou betekenen dat het gebouw na brand met beperkte reparaties weer in gebruik genomen kan worden. Wanneer constructies moeten worden vervangen is dat vaak niet als een beperkte reparatie aan te merken en kan niet van een fire resilient gebouw worden gesproken.



Figuur 1. CLT huis in aanbouw

## **Fire resilience en het publiekrechtelijke toetskader**

Het publiekrechtelijke toetskader ligt in Nederland momenteel vast in Bouwbesluit 2012. Net als in de meeste andere landen gaat het om een verzameling prescriptieve voorschriften, die grofweg in de onderstaande afgeleide doelen (of risico subsystemen) kunnen worden ondergebracht:

1. Veiligheid van gebouwgebruikers (vluchtroute)
2. Veiligheid van hulpverleners (aanvalsroute)
3. Veiligheid van compartimenten en subcompartimenten (max. uitbreidingsgebied van brand en 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 bovenstaande afgeleide doelen 1, 2 en 5 houden daar direct verband mee. De afgeleide doelen 3 en 4 kunnen worden gezien als Lines of Defence (LOD's), waarmee tijd gewonnen kan worden, zodat de hoofddoelen eenvoudiger gerealiseerd kunnen worden.

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 resiliënt genoemd worden. Dat is mogelijk met een actief blussysteem, maar ook met een betrouwbare brandcompartimentering. Brandcompartimentering die betrouwbaarder is dan voorgeschreven in Bouwbesluit 2012, dus met een hogere WBDBO eis (Weerstand tegen BrandDoorslag en BrandOverslag) en aandacht voor aansluitdetaillering met flankerende constructies (zoals de gevel).

Is dat mogelijk met houten gebouwen? Of meer specifiek: Is dat mogelijk met woningbouw in CLT?

## **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 nog bezwijkt. Bij gelamineerde constructies kan daarnaast de inbranding worden versneld doordat de lijm verweekt of gaat meebranden en lamellen van de constructie los laten. 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).



Figuur 2. In woningbouw zijn de draagconstructies tevens de scheidingsconstructies

### Houten brandscheidingen

Bij brandwerende scheidingsconstructies speelt de afdracht van krachten ten gevolge van een mechanische belasting in principe 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.

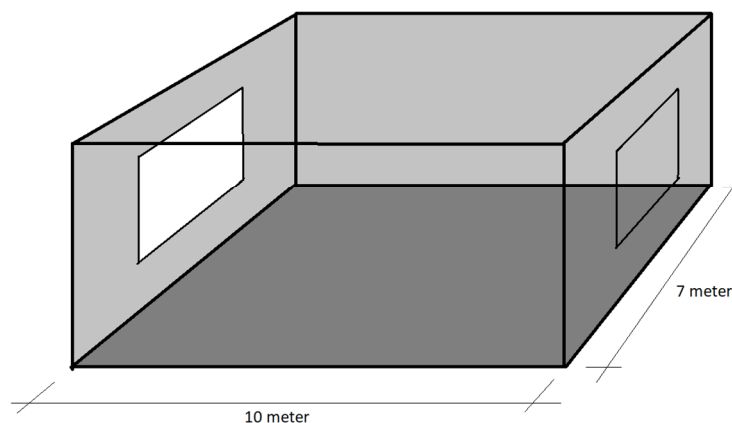
Echter, het voldoen aan de criteria volgens NEN-EN 13501-2 zegt niets over de faalkans van de scheidingsconstructie. De faalkans wordt bepaald door de thermische belasting ten gevolge van de brand en de thermische weerstand (brandwerendheid) van de scheidingsconstructie. Feitelijk is dit een RST-AST analyse. De RST (Required Safe Time) is daarin de thermische belasting die door een brand wordt geleverd, uitgedrukt in minuten standaard brand. De AST (Available Safe Time) 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. Echter, de werkelijke temperatuurontwikkeling van een brand in een brandcompartiment volgt niet de standaard brandkromme, maar wordt bepaald

door projectspecifieke 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 m<sup>2</sup>) het verschil worden beschouwd in de thermische belasting (RST) tussen traditionele steenachtige bouw en moderne 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 bezwaken 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 3 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<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub> (NEN 6065).



Figuur 3. Isometrie van het brandcompartiment (appartement)

Tabel 1. Overzicht randcondities voor de natuurlijke brand

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

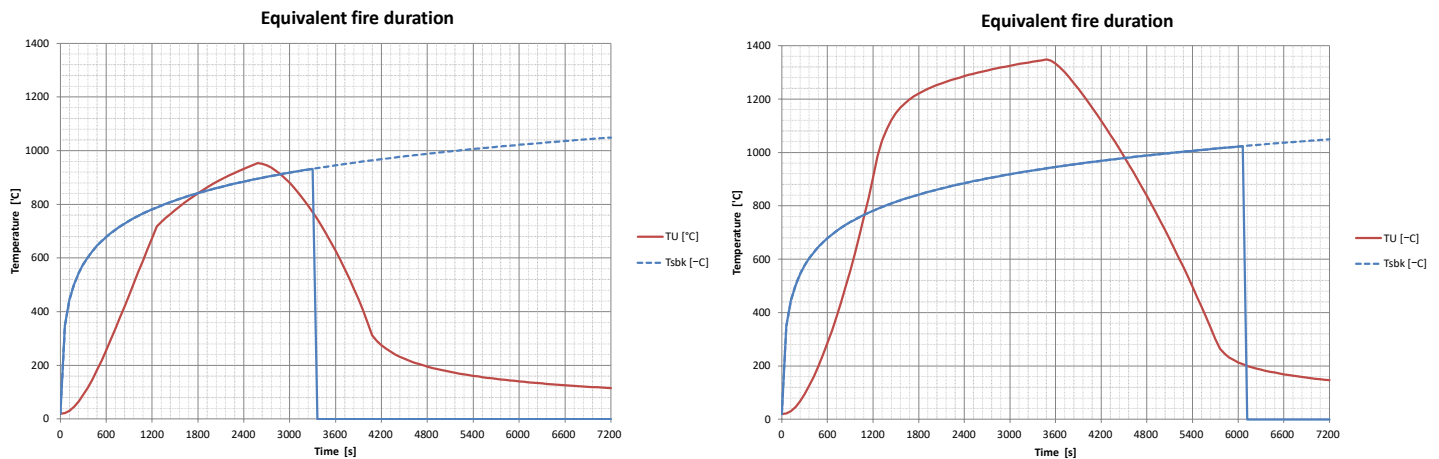
<sup>(1)</sup> Volgens NEN-EN 1991-1-2+NB

<sup>(2)</sup> Uitgaande van een karakteristieke permanente vuurbelasting van 500 MJ/m<sup>2</sup>

<sup>(3)</sup> Volgens NEN 6055

De thermische belasting door de gastemperaturen ten gevolge van een natuurlijke brand in het appartement zijn in beide situaties vertaald naar een equivalente brandduur volgens de

standaard brandkromme. De equivalente brandduur volgt daarbij 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 modern CLT appartement is duidelijk zichtbaar in figuur 4.



Figuur 4. Natuurlijke brandkromme en omrekening naar equivalente brandduur volgens de standaard brandkromme voor een traditioneel appartement (links) en een CLT appartement (rechts)

Uit figuur 4 blijkt dat de equivalente brandduur van een natuurlijke brand in een traditionele woning ongeveer 54 minuten bedraagt en in een CLT woning 101 minuten. Wanneer de brandcompartimentsscheidingen 60 minuten brandwerend zijn is er een duidelijk tekort aan brandwerendheid voor de CLT woning:

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

Wanneer niet wordt ingegrepen in de natuurlijke brand zal het CLT-gebouw met woonfuncties afbranden (afbrandscenario). Hoewel dat publiekrechtelijk acceptabel is zolang persoonlijke veiligheid gegarandeerd is, is het gebouw niet fire resiliënt. Het gebouw overleeft een uitslaande woningbrand niet zonder repressieve brandweerinzet.

### Kwantificeren van het faalrisico

Het faalrisico kan worden gekwantificeerd door de faalkans van het maatgevende effect te bepalen. Dat is de kans dat de thermische belasting groter is dan de brandwerendheid van de constructie. In formulevorm:  $P_{falen} = P(RST > AST)$ .

De brandwerendheid (AST) is deterministisch bepaald met behulp van een brandwerendheidstest volgens de standaard brandkromme. In een deterministische bepalingsmethode speelt de faalkans geen rol.

De thermische belasting is projectspecifiek bepaald aan de hand van het natuurlijk brandconcept. Hierin spelen randcondities met onzekerheid (stochasten) een grote rol in de betrouwbaarheid van de thermische belasting. Met behulp van een gevoeligheidsanalyse, waarin elke stochast afzonderlijk wordt gevarieerd met zijn standaard afwijking, kan de invloed van die stochast op de thermische belasting worden bepaald. De sommatie van de

specifieke deelvarianties van de stochasten levert de variantie (en daarmee de standaard afwijking) van de kansverdeling  $P(\text{AST} < \text{RST})$ , zie figuur 5.

<b>Each boundary condition (<math>x_i</math>):</b>	
Average value:	$\bar{x}_i$
Variation:	$dx_i$
Standard Deviation:	$s_i$
<b>Impact on outcome AST-RST (<math>t</math>):</b>	
Variation:	$dt$
Specific Variation:	$dt/dx_i$
Specific Variancy:	$(s_i dt/dx_i)^2$
<b>Probability AST-RST :</b>	
Total Variancy:	$var = \sum_i (s_i dt/dx_i)^2$
Standard Deviation:	$s = \sqrt{var}$

Figuur 5. Van variatie per stochastische randconditie naar specifieke variantie en ten slotte naar standaard afwijking voor AST-RST.

De belangrijkste stochastische randcondities betreffen de brandstofkenmerken. De in de gevoeligheidsanalyse opgenomen stochasten zijn weergegeven in tabel 5 (Benen et al, 2018). In de stochastische randcondities is één bouwkundig kenmerk opgenomen, de permanente vuurbelasting van het compartiment. Deze is alleen van belang voor het CLT compartiment, omdat niet bekend is of de gehele CLT constructie verbrandt en hoe groot de pyrolyse snelheid is (Rinta-Paavola et al, 2021).

Tabel 2. Overzicht stochastische randcondities met gemiddelde waarde en geschatte standaardafwijking

Stochast	Gemiddeld (AVG)	Standaard afwijking (SD)
Permanente vuurbelasting [MJ/m <sup>2</sup> ]	0 (traditioneel) 400 (CLT)	0 (traditioneel) -300 <sup>(1)</sup> / +120 (CLT)
Variabele vuurbelasting [MJ/m <sup>2</sup> ]	780	-120 / +120 <sup>(2)</sup>
Brandvermogensdichtheid [kW/m <sup>2</sup> ]	250	-100 / +100 <sup>(3)</sup>
Tijdconstante brandontwikkeling [s]	300	-100 / +100 <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Gebaseerd op het doven van de brand in de CLT constructie wanneer de variabele vuurlast verbrand is

<sup>(2)</sup> Gebaseerd op NEN-EN 1991-1-2/NB

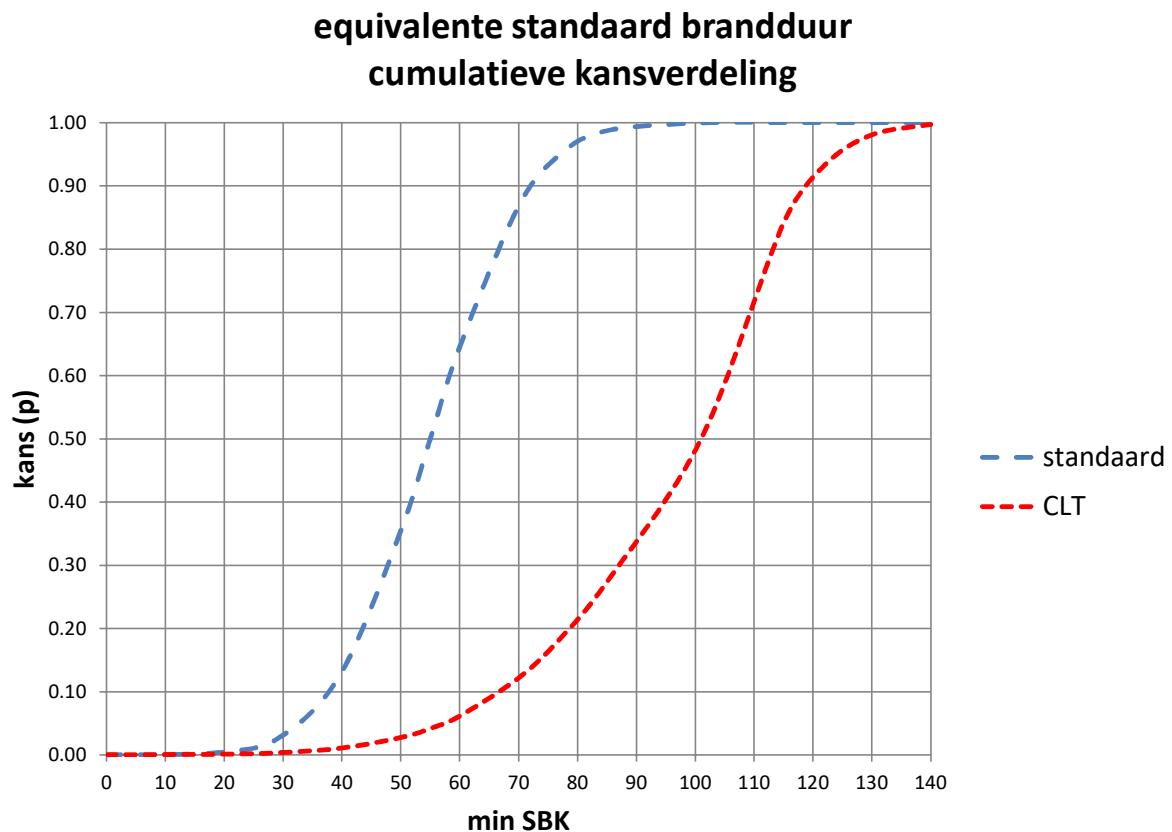
<sup>(3)</sup> Gebaseerd op bandbreedte van de classificatie

Voor elke variatie is de consequentie voor de thermische belasting RST in equivalente brandduur bepaald. Daaruit is de standaard afwijking van de thermische belasting RST vastgesteld. De variabele vuurbelasting is daarin de maatgevende stochast. De resultaten zijn samengevat in tabel 3 en weergegeven in figuur 6.



Tabel 3. Gemiddelde waarde en standaard afwijking van de thermische belasting door brand voor een traditionele woning en een CLT woning

	Traditioneel [min. SBK]	CLT [min. SBK]
Gemiddeld (AVG)	55	101
Standaard afwijking (SD)	-13,4 / +13,4	-26,6 / +14,0



Figuur 6. Cumulatieve kansverdeling (p) van de thermische belasting door brand in minuten standaard brandkromme voor een traditionele woning en een CLT woning

### Conclusie

Uit de analyse blijkt dat een 60 minuten brandwerende scheidingsconstructie in een traditionele woning circa 64% betrouwbaar is, dus een faalkans voor de natuurlijke brand bezit van circa 36%. De faalkans van een 60 minuten brandwerende scheidingsconstructie in een CLT woning is 93%. Dat houdt in dat in geval van een woningbrand in een CLT woongebouw een afbrandscenario vrijwel zeker is, wanneer niet wordt ingegrepen in het brandscenario door automatische of manuele blussing. Een CLT woongebouw is daarmee niet fire resilient. Om dat te bereiken 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 een beschermende coating die de koollaag aan de oppervlakte tijdens de brand intact houdt waardoor de inbrandsnelheid in de tijd tot stilstand komt (Schmidt, 2020)

Overigens is er 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). Het resterende deel van de constructie die aan de brand blootgesteld is geweest zal niet meer geschikt zijn om aan de normale gebruikseisen te voldoen. Deze zal moeten worden vervangen, maar heeft er dan wel voor gezorgd dat de brand beperkt is gebleven tot één compartiment. Daardoor zijn de CLT-constructies buiten het uitgebrande compartiment niet aangetast.

Met andere woorden: wanneer een CLT-constructie een zodanige kwaliteit bezit dat deze niet zelfstandig kan branden en dus dooft wanneer de variabele vuurlast in een brandcompartiment verbrand is, komt fire resilience in handbereik.

Bij grondgebonden woningen hoeft aan die voorwaarde niet te worden voldaan wanneer de CLT constructie van een woning onafhankelijk is van de naastgelegen woning. Door de CLT constructies mechanisch en thermisch te scheiden ter plaatse van de woningscheiding, kan ook van fire resilience worden gesproken. De brand kan zich dan niet meer automatisch uitbreiden naar de aangrenzende woningen. De detaillering, met name de aansluiting aan de gevels, verdient daarbij bijzondere aandacht.

---

## Literatuur

NEN 6055:2011 nl – *Thermische belasting op basis van het natuurlijk brandconcept – Bepalingsmethode* – NNI, Delft

NEN-EN 1991-1-2+C1+C2+C3+NB:2019 – *Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand* – NNI, Delft

NEN-EN 1995-1-2+C1+C2+NB:2011 – *Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houconstructies – Deel 1-2: Ontwerp en berekening van constructies bij brand* – NNI, Delft

Crielaard, R. (2015) – *Self extinguishment of cross laminated timber* – TU Delft, civil engineering

Zee, P. (2018) – *Vertikaal dragend verlijmd kruislaaghout en brandveiligheid* – Hanzehogeschool Groningen, Bouwkunde

Benen, M., Quaas, L., Herpen, R.A.P. (2018) – *Reliability of fire compartmentation* – TU Eindhoven, Built Environment

Schmidt, L. (2020) – *Experimental study on the effect of char fall off on the heat transfer within loaded cross-laminated timber columns exposed to radiant heating* – University of Edinburgh, Science & Engineering

Rinta-Paavola, A., Hostikka, S. (2021) – *A model of the pyrolysis of two Nordic structural timbers* – Aalto University, Fire and Materials 2021; 1-14