



Literatuurstudie - Brandveiligheid en Bouwen met Hout

Daniel Brandon
Siri Qvist
IJsbrand van Straalen
Yvonne Wattez
Pascal Steenbakkens

RISE Report 2022:99

Literatuurstudie - Brandveiligheid en Bouwen met Hout

Daniel Brandon

Siri Qvist

IJsbrand van Straalen

Yvonne Wattez

Pascal Steenbakkers

RISE Report 2022:99

ISBN 978-91-89711-43-3

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in opdracht van NEN als stap 1 van de onderzoeksopdracht "Brandveiligheid en bouwen met hout" die binnen NEN-werkgroep 351 007 007 wordt uitgevoerd. Het werk is uitgevoerd door RISE (Daniel Brandon), ARUP (Siri Qvist, Yvonne Wattez en Pascal Steenbakkers) en TNO (IJsbrand van Straalen) met behulp van feedback en commentaar van de werkgroep.

Nico Scholten van de Stichting Expertisecentrum Regelgeving Bouw heeft het projectteam van relevante achtergrondinformatie van de regelgeving voorzien.

David Barber van ARUP, Australië heeft geholpen bij het samenstellen van de Australische regelgeving en informatie gegeven over de achtergronden van de achterliggende filosofie.

Management samenvatting

In opdracht van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) en in overleg met werkgroep 351 007 00 07 'Brandveiligheid en bouwen met hout, heeft RISE met medewerking van Arup en TNO een literatuurstudie uitgevoerd. Deze literatuurstudie is stap 1 van meerdere te nemen stappen om antwoord te kunnen geven op motie nr. 28325-220 d.d. 20 april 2021 van de Tweede Kamer waarin wordt geconstateerd dat het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving nog niet is toegerust op de toenemende toepassing van nieuw of hernieuwd bouw materiaal, zoals hout, voor nieuwe hoogbouw.

Het doel van deze literatuurstudie is specifieke punten te identificeren die aandacht behoeven in de regelgeving om te zorgen voor brandveilige gebouwen waarin veel hout is toegepast. Het onderzoek geeft op basis van literatuur inzicht in nut, achtergronden, noodzaak en relevantie van gebruik van bestaande regelgeving, beoordelingsmethoden en de uitgangspunten daarin.

De vervolgstappen op dit rapport omvatten in de literatuurstudie geïdentificeerde punten die aandacht behoeven, waaronder mogelijke aanpassing van de Nederlandse bouwregelgeving en bestaande normen, zoals NEN 6068, NEN 6069 en de Eurocodes 1995-1-2, 1991-1-2 en de in de Eurocode 1995-1-2 aangeduide bepalingsmethode, NEN-EN 13381-7.

Uit deze literatuurstudie blijkt onder andere dat:

- de huidige brandveiligheidseisen uit het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving niet zonder meer adequaat zijn voor alle massieve houtconstructies, omdat de huidige prestatie-eisen geen directe relatie kennen met de eventueel verhoogde permanente vuurbelasting;
- wanneer de huidige prestatie-eisen uit het Bouwbesluit en BBL worden toegepast voor gebouwen met de nieuwe houten bouwsystemen dan levert dit voor die gebouwen een mogelijke onderschatting van het bereikte veiligheidsniveau, en wordt er mogelijk aan de functionele eisen van het Bouwbesluit en BBL onvoldoende voldaan;
- de huidige prestatie-eisen uit het Bouwbesluit / Besluit Brandveiligheid Leefomgeving en bijbehorende bepalingsmethodes (NEN-normen) zijn niet altijd voldoende toegesneden op het beoordelen van nieuwe typen houten bouwsystemen, zoals 'engineered wood'-producten waaronder CLT (Cross Laminated Timber) en NLT (Nailed laminated timber) en LVL (Laminated veneer lumber). Dit is gerelateerd aan de grotere hoeveelheid brandstof in constructies met deze materialen, waardoor de vuurlast, de brandrisico's en gevolgen voor de omgeving mogelijk zijn verhoogd. Nader moet worden onderzocht welk deel van de constructie, rekening houdend met repressieve inzet, een bijdrage levert aan de vuurbelasting, intensiteit en de duur van de brand;
- het blussen van een brand en de aanvullende brandrisico's vergen extra inzet, middelen en aandacht van de brandweer voor wat betreft het blussen en volledig doven van smeulende resten in het gebouw (en dus ook in de bouwconstructie);

Op basis van de resultaten van het literatuuronderzoek komt de werkgroep tot de conclusie dat de toename van de vuurlast bij houtbouw de brandveiligheid in potentie negatief beïnvloedt. De werkgroep heeft de indruk dat voor gebouwen met een beperkt brandrisico en een beperkte hoeveelheid brandbare bouwmaterialen en hout, en ook

met een laag gevolg-risico, de invloed beperkt is en de huidige eisen en bepalingsmethoden mogelijk gehandhaafd kunnen blijven. Voor de overige situaties zullen aanvullende maatregelen of aangepaste bepalingsmethoden moeten worden ontwikkeld, om aanvullende brandrisico's te beheersen, en/of zullen de eisen en de bepalingsmethodes moeten worden herzien.

Om op dit moment aantoonbaar aan de functionele eisen van het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving te voldoen is een nadere studie op basis van een integrale aanpak, en gebruikmakend van fire safety engineering, nodig. Zowel de op fire safety engineering gebaseerde aanpak als een mogelijke aanscherping van de prestatie-eisen moeten nader worden uitgewerkt.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Management samenvatting	4
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	11
1.1 Ontwikkelingen in de houtbouw	11
1.2 Doelstelling	12
1.3 Recentelijke aanpassingen van regelgeving in het buitenland	13
1.4 Typologieën	14
1.5 Leeswijzer	14
2 Specifieke risico's van bouwen met hout	15
2.1 Inleiding en doelstellingen	15
2.2 Inventarisatie risico's	16
2.3 Toepasbaarheid van huidige classificatie van brandwerendheid	17
2.3.1 Brandwerendheid van houtconstructies & vuurlast	18
2.3.2 Mogelijke gevolgen van verhoogde vuurlast en rookontwikkeling	20
2.4 Invloed van vuurlast toename	20
2.4.1 Vuurlast bijdrage van volledig beschermde massieve houtconstructies	25
2.4.2 Vuurlast bijdrage van blootgestelde massieve houtconstructies	25
2.4.3 Vuurlast bijdrage van houtskeletbouw	29
2.5 Invloed op constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand 30	
2.6 Invloed op het beperken van het uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw - brandscheidingsconstructie	32
2.7 Invloed op het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw - brandoverslag (NEN6068)	33
2.8 Invloed op het voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen	34
2.9 Invloed op het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	35
2.10 Invloed op veilig vluchten	35
2.11 Impact op het uitvoeren van reddingswerkzaamheden	36
2.12 Invloed op de brandveiligheid tijdens de bouw van de constructie (NEN-EN 1995-01-02 en NEN 6069)	36
2.13 Impact op schadebeperking	37
2.14 Impact van gebouwtypologieën	38
2.15 Impact van gebouwhoogte	41
2.16 Impact van gebruiksfunctie	41

3	Wettelijk kader brandveiligheid.....	42
3.1	Besluit Bouwwerken leefomgeving (BBL) – publiekrechtelijke eisen.....	42
3.2	Voor houtbouw relevante prestatie-eisen en bepalingsmethode	51
3.2.1	Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand	51
3.2.2	Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	52
3.2.3	Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw & voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen.....	52
3.2.4	Veilig vluchten	53
3.2.5	Brandweerinzet en blusvoorzieningen	53
3.2.6	Brandveiligheidsinstallaties	53
3.3	Voor houtbouw relevante normen.....	54
3.3.1	NEN-EN 1991-1-2:2021 (prEN in ontwikkeling)	54
3.3.2	NEN-EN 1995-1-2:2011	55
3.3.3	NEN 6068:2020	55
3.3.4	NEN 6069+A1+C1:2019	56
3.3.5	NEN 6075:2020	56
3.3.6	NEN 6090:2017.....	56
3.3.7	NEN-EN 13501-1:2019	57
3.3.8	NEN-EN 13501-2:2021.....	57
3.3.9	NEN-EN1991-1-7+C1+A1:2015	57
3.4	Hoogbouwrichtlijn.....	57
3.4.1	Ontruimingsconcepten.....	58
3.4.2	Sterkte bij brand.....	58
3.4.3	Aandachtspunt voor houtbouw	59
3.5	Achtergronden en uitgangspunten	59
3.5.1	Constructieve veiligheid bij brand.....	59
3.5.2	Beperken branduitbreiding	61
3.5.3	Brandweerinzet en blusvoorzieningen	65
3.5.4	Brandveiligheidsinstallaties	66
3.6	Opties verkennen voor alternatieve aansluiting van aanvullende maatregelen (art. 1A lid 3 woningwet).....	67
4	Aanvullende eisen en aandachtspunten	68
4.1	Beperking schade gebouw	68
4.2	Extra eisen voor repressie.....	69
4.3	Doorstaan van uitbrandscenario's.....	69
5	Ontwerpen en maatregelen voor ontwerp houten gebouwen	70
5.1	Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand	70

5.1.1	Inschatting brandverloop	70
5.1.2	Eurocode berekening.....	71
5.1.3	Weerstand tegen delamineren.....	72
5.1.4	Inbrandsnelheid en nul-sterkte laag.....	72
5.1.5	Equivalente brandduur.....	73
5.1.6	Brandproeven	74
5.1.7	Toepassing van sprinklers	75
5.1.8	Herhaalbaarheid van een fire safety engineering gebaseerde aanpak	75
5.2	Het beperken van het maximale uitbreidings-gebied van brand binnen het gebouw.....	76
5.2.1	Voorkomen van “super spreaders”.....	76
5.2.2	Doorbranden brandscheidingen	77
5.2.3	Het effect van sprinklers op branduitbreiding en schadebeperking.....	77
5.2.4	Brandoverslag naar bovenliggende verdiepingen	79
5.3	Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen.....	80
5.4	Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	80
5.5	Veilig vluchten	80
5.5.1	Hulp bij ontruiming bij brand.....	80
5.5.2	Lengte vluchtroutes.....	81
5.5.3	Brandklasse vluchtroutes	81
5.5.4	De invloed van houtconstructies op veilig vluchten	81
5.5.5	Sprinklers en veilig vluchten	81
5.6	Brandveiligheid tijdens bouw en uitvoering.....	81
5.7	Uitvoeren van reddingswerkzaamheden	82
5.8	Integraal Plan Brandveiligheid voor totale oplossing	83
5.9	Doorstaan van uitbrandscenario's in buitenlandse regelgeving	84
5.10	Relatie tussen brandwerendheid & het doorstaan van uitbrandscenario's.....	86
5.10.1	Onbrandbare constructies	87
5.10.2	Brandbare constructies	89
5.11	Voorgeschreven oplossingen in het buitenland.....	91
5.11.1	Verenigde Staten	95
5.11.2	Canada	96
5.11.3	Parijs.....	96
5.12	Voorbeeld praktijk aanpak in Nederland	96
6	Conclusies en aanbevelingen.....	98
6.1	Stand van zaken	98
6.2	Algemene conclusie	98

6.3	Verhoogde risico's en extra uitdagingen.....	100
6.3.1	Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand	100
6.3.2	Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw	101
6.3.3	Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen	103
6.3.4	Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	103
6.3.5	Veilig vluchten	103
6.3.6	Uitvoeren van reddingswerkzaamheden	104
6.3.7	Brandveiligheid tijdens bouwconstructie en uitvoering	105
6.4	Aanbevelingen voor ontwerpen en maatregelen voor ontwerp houten gebouwen	105
6.4.1	Algemene aanbeveling voor het voldoen aan relevante prestatiedoelen met een integrale aanpak	105
6.4.2	Bepalingsmethoden	107
6.4.3	Brandveiligheidsmaatregelen.....	108
6.4.4	Brandvertragende verf/impregneren	109
6.4.5	Belangrijke details met betrekking tot het begrenzen van branduitbreiding	110
6.5	Wettelijk kader.....	110
6.5.1	Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand	110
6.5.2	Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw	111
6.5.3	Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	111
6.5.4	Veilig vluchten	111
6.5.5	Uitvoeren van reddingswerkzaamheden	112
6.5.6	Brandveiligheidsinstallaties	112
6.6	NEN-EN 1991-1-2	113
6.6.1	Constructieve brandveiligheid bij brand	113
6.6.2	Beperken uitbreiding brand	113
6.6.3	Overig gebruik	113
6.7	NEN-EN 1995-1-2	114
6.7.1	Constructieve brandveiligheid bij brand	114
6.7.2	Beperken uitbreiding brand	114
6.7.3	Overig gebruik	114
6.8	NEN 6068	115
6.9	NEN 6069	115
6.10	NEN 6075	116

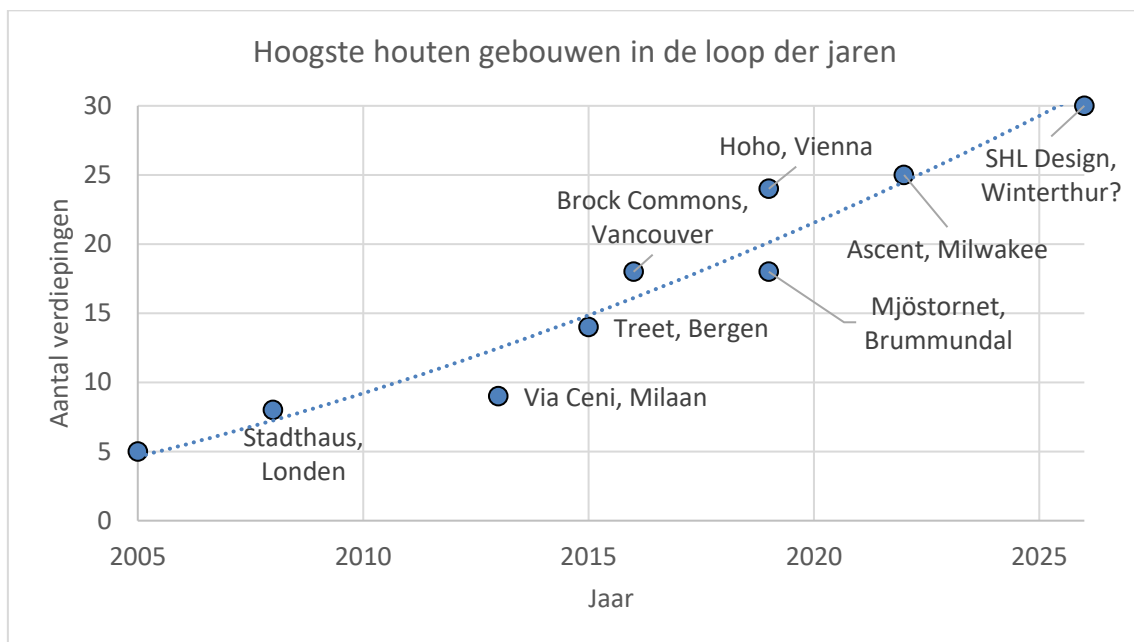
6.11	NEN 6090	116
6.12	Woningwet artikel 1a lid 3; aansturing via regeling	116
6.13	Aanbeveling vervolgstappen	116
Referenties.....		118

1 Inleiding

1.1 Ontwikkelingen in de houtbouw

De bouwsector is verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de CO₂ uitstoot en het energieverbruik in Nederland. Om de klimaatdoelstellingen te halen wordt er daarom steeds vaker ingezet op duurzame bouwmethoden en hernieuwbare bouwmaterialen. Hout is hiervan een voorbeeld, het slaat CO₂ op, is hernieuwbaar en heeft potentie om hergebruikt of gerecycled te worden. Daarnaast biedt het voordelen in bouwsnelheid en is het een licht bouw materiaal. In de afgelopen 25 jaar zijn de mogelijkheden om te bouwen met hout als constructiemateriaal significant gegroeid. Prefabricatie en productontwikkelingen hebben het mogelijk gemaakt om steeds hogere en complexere gebouwen te realiseren met hout.

Dit is een belangrijke aanleiding voor het toenemende gebruik van hout en engineered timber zoals cross-laminated-timber (CLT) ofwel kruisgelaagd hout als constructiemateriaal. Figuur 1 geeft hier een indicatie van.



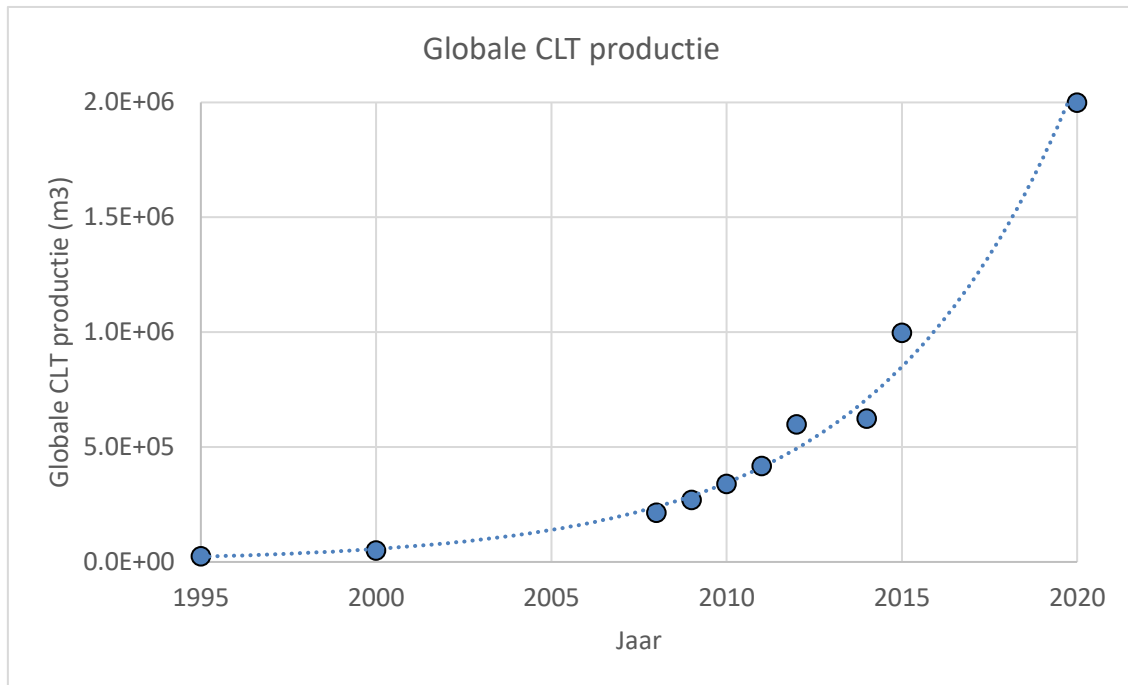
Figuur 1: Recordaantal verdiepingen van gebouwen met een houtconstructie in de loop der jaren

Naast de voorbeelden gepresenteerd in Figuur 1 zijn er wereldwijd nog meer grootschalige houten gebouwen gerealiseerd. Een overzicht van de houten gebouwen in bijvoorbeeld Amerika is te vinden op de site van Woodworks Innovation Network (2022)¹. Hieronder een beknopt overzicht van andere projecten.

1. Sky Believe in Better, Londen, UK
2. Sara Kulturhus, 76m, Skellefteå, Sweden
3. HAUT, 73 m, Amsterdam, NL
4. Forté, 32m, Melbourne, Australië

¹ <https://www.woodworksinnovationnetwork.org/>

De ontwikkeling van CLT is een van de hoofdredenen voor de uitbreiding van mogelijkheden. De ongeveer exponentiële groei (Figuur 2) die de globale productie van CLT in de afgelopen 25 jaar heeft ondervonden, geeft een indicatie voor de significantie van deze ontwikkelingen.



Figuur 2: Globale CLT-productie. Data tot en met 2010 afkomstig van Schickhofer (2011), data na 2010 afkomstig van Muszynski (2015) en een prognose door Muszynski (2020)

Een inventarisatie van houten gebouwen met meer dan drie verdiepingen in Zweden door Eriksson *et al.* (2016) laat zien dat ook het aantal hogere houtskeletbouw-constructies exponentieel groeit. In het bouwbestand van gebouwen met meer dan drie verdiepingen was het aantal houtskeletbouw-constructies in 2015 ongeveer 10 keer zo groot als het aantal CLT-constructies.

Ook voor houtskeletbouw-constructies hebben significante ontwikkelingen plaatsgevonden. Een groei in geprefabriceerde bouwelementen (2D) en modules (3D), leidt tot vervanging van de traditionele stick-built (1D) methode. Prefabricatie, wordt gelinkt aan hogere kwaliteitscontrole en een vermindering van bouwfouten (Johnsson en Meiling, 2009).

Vanwege klimaatdoelstellingen hebben verschillende Nederlandse partijen in de afgelopen jaren initiatieven genomen om ook in Nederland meer te bouwen in houtbouw. Het is dan ook de verwachting dat in de komende jaren de gebouwvoorraad voor een significant aandeel uit houtbouw zal bestaan.

1.2 Doelstelling

De toenemende omvang en hoogte van houten gebouwen en de sterke groei van het aantal houten gebouwen in combinatie met de brandbaarheid van het hout heeft in veel

landen tot brandveiligheidsvraagstellingen geleid. In dit rapport worden deze vraagstellingen, coherente bepalingsmethodes en kennishiaten geïdentificeerd door middel van een literatuuronderzoek in opdracht van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN).

In lijn met de besluiten van werkgroep 351 007 007 "Brandveiligheid en bouwen met hout" beschrijft dit rapport een literatuurstudie (stap 1) van de onderzoeksopdracht "Brandveiligheid en bouwen met hout". Deze opdracht werd geïnitieerd naar aanleiding van motie nr. 28325-220 welke op 20 april 2021 door De Tweede Kamer werd geaccepteerd. Het hoofddoel van de werkgroep is het identificeren van eventuele wijzigingen die nodig zijn om de bestaande Nederlandse bouwregelgeving en normen geschikt te maken voor de toepassing van hout als bouw- en constructiemateriaal voor hogere of complexe gebouwen en waar mogelijk aanpassingen van de Nederlandse bouwregelgeving en normen voor te stellen.

Daartoe stelde de werkgroep een onderzoeksvoorstel op dat uit drie stappen bestaat, met het doel antwoord te geven op de volgende vragen:

- Welke rol kan Fire Safety Engineering (FSE) spelen bij de aanpak van het extra brandgevaar van houten gebouwen?
- Is het uitbrandscenario zoals we dat nu kennen een-op-een van toepassing op houten constructies?
- Welke beheersmaatregelen kunnen op korte termijn worden geïmplementeerd?

Dit literatuuronderzoek (stap 1) heeft als doel specifieke punten te identificeren die aandacht behoeven om te zorgen voor brandveilige oplossingen voor nieuwe houtconstructies. Vanuit deze basis kan verder worden gewerkt aan de beantwoording van bovenstaande vragen. Het onderzoek geeft op basis van literatuur inzicht in nut, noodzaak en relevantie van gebruik van bestaande beoordelingsmethoden en de uitgangspunten daarin, zoals bijvoorbeeld het gebruik van een standaardbrandkromme in brandwerendheidstests en/of het meenemen van de extra vuurlast in berekeningen voor houten gebouwen.

Stap 2 en 3 van het onderzoeksvoorstel omvatten de geïdentificeerde punten die aandacht behoeven: aanpassing van de Nederlandse bouwregelgeving en normen, zoals NEN 6068, NEN 6069 en de Eurocodes 1995-1-2, 1991-1-2, de in de Eurocode 1995-1-2 aangeduide bepalingsmethode, en NEN-EN 13381-7.

Ten slotte geeft de literatuurstudie richting voor stap 2 en 3 en geeft een indicatie van wat mogelijk is in de vervolgtrajecten, waarbij niet is uitgesloten dat brandproeven of nader onderzoek moeten worden uitgevoerd.

1.3 Recentelijke aanpassingen van regelgeving in het buitenland

De noodzaak om de bouwregelgeving aan te passen aan de nieuwe ontwikkelingen is niet begrenst tot Nederland. Een aantal landen heeft al een proces doorlopen waarin hun bouwregelgeving of de toepassing daarvan zijn aangepast aan nieuwe ontwikkelingen en

geïdentificeerde risico's. Deze landen zijn onder andere de Verenigde Staten, Canada, het Verenigd Koninkrijk en Australië. Ook zijn landen, waaronder Zweden, Denemarken en Frankrijk, in een stadium vergelijkbaar met Nederland.

1.4 Typologieën

Er is een grote variatie van gebouwen met een houtconstructie. Problemen en uitdagingen zijn niet altijd in dezelfde mate van belang voor verschillende constructietypologieën, gebruiksfuncties en hoogtebegrenzingsen.

Met betrekking tot brandveiligheid worden houtskeletbouw, massiefhouten constructies en vakwerkconstructies vaak onderscheiden als constructietypologieën. Om brandveiligheid te bespreken is het relevant om deze nog verder onder te verdelen. Zo kunnen houtskeletconstructies verder verdeeld worden in stick-built constructies (1D), geprefabriceerde wanden en vloeren etc (2d), geprefabriceerde modules (3D). Voor massief houten constructies kan het relevant zijn om een onderverdeling te maken tussen CLT (Cross laminated timber), NLT (Nailed laminated timber) en LVL (Laminated veneer lumber) omdat deze verschillende manieren hun integriteit kunnen behouden of verliezen in een brand.

Na een discussie van de risico's van bouwen met hout wordt in paragraaf 2.14 een overzicht gegeven voor welke gebouw- of compartiment-typologieën deze risico's het meest relevant zijn.

1.5 Leeswijzer

Het rapport begint met een overzicht van de risico's gerelateerd aan bouwen met hout (Hoofdstuk 2). Vervolgens zijn een overzicht van de huidige voor houtbouw relevante wet- en regelgeving (Hoofdstuk 3) en aanvullende eisen (Hoofdstuk 4) gegeven. Een aantal hulpmiddelen en methodes om de risico's te mitigeren zijn geïdentificeerd in Hoofdstuk 5. Een beschrijving van punten die meegenomen kunnen worden in een integraal plan voor een totale oplossing is beschreven in 5.8 en een overzicht van aanpakken in het buitenland is toegelicht in 5.9. Aanbevelingen en conclusies zijn besproken in Hoofdstuk 6.

2 Specifieke risico's van bouwen met hout

2.1 Inleiding en doelstellingen

Om de aanvullende risico's van het bouwen van hoge en complexe houten gebouwen in de context van de regelgeving te kunnen inschatten is het belangrijk om de basis van de publiekrechtelijke regelgeving te overzien. Het handboek Basis voor Brandveiligheid van het Instituut voor Fysieke Veiligheid (IFV) geeft hierover relevante informatie. In deze paragraaf wordt een aantal essentiële zaken samengevat om de aanvullende risico's van het bouwen met hout te kunnen plaatsen. In hoofdstuk 3 wordt dan in meer detail ingegaan op het wettelijk kader.

De publiekrechtelijke hoofddoelen op het gebied van brandveiligheid die met behulp van bouwregelgeving worden geborgd zijn:

- persoonlijke veiligheid van gebouwgebruikers;
- persoonlijke veiligheid van hulpverleners; en
- de veiligheid van eigendommen van derden (buurpercelen).

Daarnaast zijn er aanvullende privaatrechtelijke doelen ter beperking van schade en het beperken van de impact op bedrijfscontinuïteit.

Net als in de meeste andere landen geeft de Nederlandse publiekrechtelijke bouwregelgeving (het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving) een verzameling van functionele eisen en daaruit afgeleide prestatie-eisen. De functionele eisen kunnen in hoofdlijnen in de onderstaande doelen worden onderverdeeld:

- Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand
- Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw
- Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw
- Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen
- Veilig vluchten
- Veilig uitvoeren van reddingswerkzaamheden

Vervolgens geeft het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving prestatie-eisen waarmee de prestaties zijn vastgelegd om te kunnen voldoen aan de functionele eisen. Voor het toetsen aan deze prestatie-eisen, verwijst het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving veelal naar normen met daarin bepalingsmethoden of geeft een te leveren prestatie direct. In hoofdstuk 3 zijn de relevante prestatie-eisen toegelicht.

Aan het niveau van de brandveiligheidsvoorschriften ligt geen gedefinieerde risicoanalyse ten grondslag. Het in de voorschriften vervatte niveau is voornamelijk gebaseerd op historie, verworven rechten, haalbaarheid, ervaringen en afspraken tussen partijen over grenswaarden.

In dit hoofdstuk 2 is toegelicht wat de aanvullende risico's zijn van het bouwen van hoge en complexe gebouwen met de nieuwe houten bouwmaterialen. Hiervoor wordt op basis

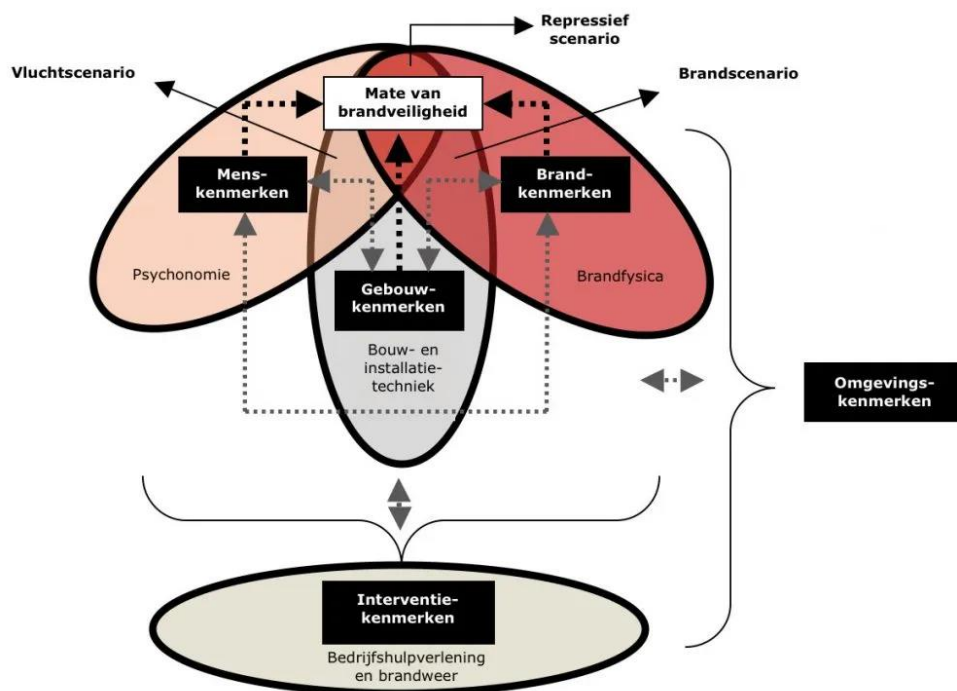
van het risico- en kenmerkenschema van het Instituut van Fysieke Veiligheid (IFV) een overzicht gegeven van de verschillen in kenmerken van: (a) de brand, (b) het gebouw, (c) de mensen, (d) interventie en (e) de omgeving.

In hoofdstuk 3 is aangegeven op welke wijze deze risico's impact hebben op de beoogde veiligheidslagen (de afgeleide doelen) en het hoofddoel van de publiekrechtelijke bouwregelgeving.

2.2 Inventarisatie risico's

In een houten gebouw zijn andere brandrisico's aan de orde dan bij gebouwen van staal, metselwerk of beton. Een manier om de aanvullende risico's te inventariseren en categoriseren, is door gebruik te maken van het kenmerkenschema (Figuur 3), zoals door het Nederlands Instituut voor Publieke Veiligheid (NIPV) en IFV is opgesteld (Instituut Fysieke Veiligheid, 2022). Dit stelt dat risicofactoren voor brand voortkomen uit vijf kenmerken. Deze beïnvloeden tevens het doel en de manier van optreden van de repressieve dienst volgens de brandweerdoctrine:

- Menskenmerken: kenmerken gebouwgebruikers.
- Gebouwkenmerken: bouwtechnische- en gebruikskenmerken van de fysieke omgeving.
- Brandkenmerken: fysische kenmerken van brand- en rookontwikkeling.
- Interventiekenmerken van de BHV-organisatie en de brandweer.
- Omgevingskenmerken: geografische ligging van het gebouw in relatie tot de brandveiligheid in het gebouw.



Figuur 3: Kenmerkenschema volgens het IFV

Dit hoofdstuk beschrijft de bevindingen van dit literatuuronderzoek naar de volgende brandrisico's in houten gebouwen:

Brandkenmerken

1. Toepasbaarheid van huidige classificaties en bepalingsmethodes
 - a. Brandwerendheid van houtconstructies & vuurlast
 - b. Mogelijke gevolgen van verhoogde vuurlast en rookontwikkeling
2. Toename vuurlast en limiet voor extra maatregelen
 - a. Vuurlast bijdrage van volledig beschermde massieve houtconstructies
 - b. Vuurlast bijdrage van blootgestelde massieve houtconstructies
 - c. Vuurlast bijdrage van lichte houtconstructies
3. Toename brandvermogen
4. Toename rookproductie
5. Toename brandvoortplanting

Gebouwkenmerken

6. Impact op brandscheidingsconstructies
7. Impact op rookscheidingsconstructies
8. Progressive collapse
9. Impact op brandoverslag
10. Impact tijdens de bouw van de constructie
11. Impact op de gebouwhoogte
12. Impact op de schadebeperking

Menskenmerken

13. Impact op vluchten en materialisering van de vluchtroutes

Interventiekenmerken

14. Impact op de brandweerinzet

2.3 Toepasbaarheid van huidige classificatie van brandwerendheid

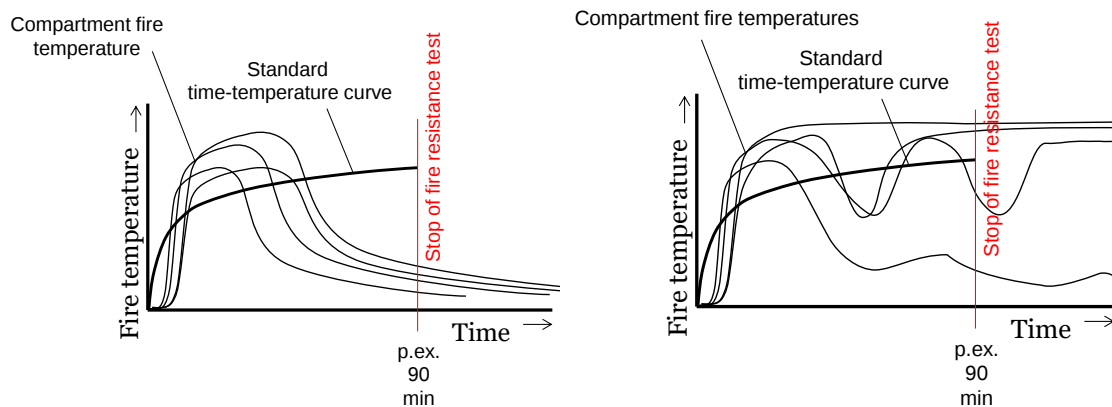
Brandveiligheidsvoorschriften in Nederland zijn gebaseerd op classificaties, zoals de brandwerendheid om constructieve veiligheid te waarborgen en om brandverspreiding te begrenzen en het Euroklasse systeem om versnelde brand- en rookontwikkeling te voorkomen.

Met de opkomst van een nieuw type constructie dat nieuwe uitdagingen op het gebied van brandveiligheid met zich meebrengt, moet worden beoordeeld of de momenteel vereiste klassen voldoende zijn om een veiligheid te garanderen die gelijkwaardig is aan die van conventionele gebouwen.

2.3.1 Brandwerendheid van houtconstructies & vuurlast

Vraagstellingen met betrekking tot het gebruik van vooral brandwerendheidseisen voor houtconstructies worden besproken in tal van publicaties. Discussies in zulke publicaties gaan soms terug naar de originele doelen van een brandwerendheidsproef, zoals door Babrauskas en Williamson (1978), Schmid *et al.* (2019), Gales *et al.* (2021) uiteengezet. Het vraagstuk dat Schmid *et al.* (2019) proberen te beantwoorden, is de vraag of de brandwerendheidsproef wel of niet ontworpen was om gebouwen resistent te maken tegen volledige uitbrandscenario's. Ongeacht de originele intentie, zijn er echter concrete aanwijzingen dat de standaard brandwerendheidsproef voor constructies van hoge consequentieklassen, wordt gebruikt met het doel om instorting uit te sluiten. Zo wordt bijvoorbeeld de methode van equivalente brandduur die veelal voor staalconstructies wordt toegepast, gebruikt om de brandwerendheid benodigd voor het doorstaan van een volledige uitbranding te berekenen (Buchanan, 2000).

Brandon en Just (2018) gebruikten de linker afbeelding in Figuur 4 om te verklaren dat de constructieve schade geïnduceerd door een brandwerendheidsproef groter kan zijn dan de schade door de grote meerderheid van echte brandscenario's. Dit kan bereikt worden door simpelweg een voldoende hoge brandwerendheidseis te stellen (*i.e.* de rode lijn in Figuur 4 ver genoeg naar rechts te plaatsen). Dit principe geldt echter niet als de constructie brandbaar is en er geen duidelijke begrenzing van de vuurlast is (Figuur 4, rechter afbeelding). Dit was in lijn met de observaties van Law en Hadden (2017), die erop wezen dat het toepassen van enkel het brandwerendheidsraamwerk voor gebouwen met een houtconstructie, de risico's vergroot.



Figuur 4: Temperaturen van een brandwerendheidsproef: typische temperaturen (schematisch) in een conventioneel brandcompartimenten (links) en in een compartiment waar een massiefhouten constructie significant bijdraagt aan de vuurlast (rechts), uit Brandon en Just (2018).

Een aantal studies onderzochten de vuurlastbijdrage of de invloed van vuurlastbijdrage van houten proefstukken in brandwerendheidsproeven (Lange *et al.* 2020, Bartlett *et al.* 2020, Wegrzynski *et al.* 2020). Deze studies duiden erop dat de verbrandingsenergie die nodig is om de in EN1363-1 (2020) voorgeschreven temperaturen van de brandwerendheidsproef te bereiken, voor een deel wordt geleverd door de brandende houtconstructie. Door deze extra verbrandingsenergie, is het benodigde brandstof (gas of olie) voor de proef verminderd. Met voldoende bijdrage van de houtconstructie is het zelfs mogelijk dat de branders volledig uit moeten worden gezet om de brandcurve te volgen (Wegrzynski en Brandon, 2022). In dat geval kan de verbranding en dus de

temperatuur alsnog gecontroleerd worden door middel van het veranderen van de ventilatie snelheid in de oven.

De verminderde hoeveelheid energie benodigd om een standaardbrandproef uit te voeren kan zorgen baren. Een aantal onderzoekers pleiten daarom om de mate van (thermische) belasting in een standaard brandproef uit te drukken in energie in plaats van temperatuur (*e.g.* Maluk, 2014; Wegrzynski *et al.*, 2020).

Volgens Brandon *et al.* (2018a) is dit niet representatief voor ventilatie gecontroleerde branden, omdat er dan simpelweg geen zuurstof in het compartiment is om de verbranding en de temperatuur binnen in het compartiment te verhogen. De temperatuur en het zuurstofgehalte die gemeten waren in een kamerbrandproef met een CLT-plafond, kopieerden zij in een brandoven met een CLT-plafond. De gelijkenis tussen de materiaal temperaturen, de verkoolde laag en zelfs de tijd van delaminatie, duiden erop dat een temperatuur gestuurde brandproef met een relevant zuurstofgehalte kan leiden tot een relevante schade. Zelinka *et al.* (2019) presenteren vergelijkbare proeven en resultaten. De energie input van de kamerbrand in vergelijking met de energie input van de ovenproef is volgens Brandon *et al.* (2018a) niet relevant omdat de energiebalans significant verschilt. Een brandoven is namelijk ontworpen om zo min mogelijk warmte te verliezen. De warmte verliezen in een brandcompartiment (convectie, straling door openingen en conductie door wanden) zijn vele malen hoger (Wegrzynski en Brandon, 2022). Schmid *et al.* (2019) argumenteren mede op basis van deze waarnemingen dat de hoge temperaturen en het lage zuurstofgehalte in een brandwerendheidsproef tot op zekere hoogte representatief zijn voor flash-over branden.

In het geval dat er wel voldoende zuurstof is in het brandcompartiment voor extra verbranding, heeft de verbranding van hout wel invloed op de binnentemperatuur en mogelijk de duur van een brand. Er is een consensus dat de brandwerendheidsproef eventuele extra blootstelling aan brand door een hogere vuurlast van een houtconstructie niet meeneemt en dat brandwerendheid op zichzelf niet geschikt is om constructieve veiligheid in uitbrandsenario's te garanderen. Een aantal onderzoekers suggereren daarom brandwerendheidsproeven niet te gebruiken voor houtconstructies (*e.g.* Wegrzynski *et al.*, 2020). Een andere aanpak is het limiteren van de vuurlastbijdrage van het hout of het effect hiervan door middel van extra eisen. Een zodanige aanpak was gekozen in de ontwikkeling van de huidige bouwregelgeving in de Verenigde Staten en Canada, die verder besproken worden in 5.9.

Naast het niet meenemen van de additionele vuurlast duiden een aantal onderzoeken (Lange *et al.* 2015; Brandon *et al.* 2017, Bartlett *et al.* 2019, Gernay 2021) erop dat de constructieve schade in de afkoelfase een lange tijd doorgaat. De hittegolf die relatief langzaam door een constructie gaat kan de capaciteit verminderen. Gernay (2021) deed onderzoek naar belaste kolommen (in tegenstelling tot de andere onderzoekers) en stelt een significante sterkte reductie in de afkoelfase vast. Wellicht zijn kolommen en wanden gevoeliger voor dit fenomeen dan balken en vloeren, vanwege hun hogere gevoeligheid voor slankheid vanwege knik.

2.3.2 Mogelijke gevolgen van verhoogde vuurlast en rookontwikkeling

De proeven op het gebied van brandwerendheid zijn maar een klein onderdeel van het gehele brandveiligheidspectrum. De extra vuurlast en rookvorming bij brand van houten constructies hebben ook invloed op de volgende aspecten:

- constructieve veiligheid, verder besproken in 2.4 en 2.5;
- brandscheidingsconstructies, verder besproken in 2.6;
- brandoverslag, verder besproken in 2.7 en 2.8;
- rookverspreiding, verder besproken in 2.9
- veilig vluchten, verder besproken in 2.10;
- brandweerinzet, verder besproken in 2.11;
- brandveiligheid op de bouwplaats, verder besproken in 2.12;
- materiële schade, verder besproken in 2.13.

Het belang van de bovengenoemde punten is afhankelijk van de mogelijke consequenties, welke afhankelijk zijn van parameters zoals gebouwtypologie, gebouwhoogte en gebruiksfunctie (besproken in respectievelijk 2.14, 2.15 en 2.16).

2.4 Invloed van vuurlast toename

De duur van een brand en de intensiteit van een brand is afhankelijk van de aanwezige vuurlast en de verbrandingssnelheid. Voorgaand onderzoek naar vuurlast in gebouwen (*e.g.* Bwayla *et al.*, 2004) betreft voornamelijk de variabele vuurlast, waarbij een eventuele vuurlast van de constructie, ook wel permanente vuurbelasting genoemd, niet wordt meegenomen. Voor houtconstructies is het in acht nemen van de permanente vuurlast van de constructie echter nog lang niet zo vanzelfsprekend als het in acht nemen van de variabele vuurbelasting. Waar het over het algemeen als een redelijke en conservatieve aanname wordt beschouwd dat de variabele vuurbelasting in een compartiment volledig door de brand kan worden verbruikt, is het in veel gevallen geen acceptabel uitgangspunt om dezelfde aanname te maken voor de permanente vuurbelasting in een houtconstructie.

De vuurlastbijdrage van de houtconstructie is afhankelijk van de inbranding van alle brandbare constructieonderdelen. Deze inbranding is op zichzelf afhankelijk van de mate van blootstelling aan brand. Omdat de blootstelling afhankelijk is van de vuurlast en de warmteverliezen (*e.g.* Cadot en Franssen, 2003), is de bijdrage van de houtconstructie afhankelijk van verschillende parameters van een brandcompartiment. Omdat er een interactie plaats vindt tussen alle brandende delen van de houtconstructie en de brand zelf, is het moeilijk om een test van één enkel bouwelement te ontwikkelen waarin de bijdrage van een deel van constructie aan de vuurlast wordt bepaald (Wegrzynski en Brandon, 2022). Omdat deze interactie van nature aanwezig is in een brandcompartiment, is het meest relevante onderzoek van de bijdrage aan de vuurlast door houtconstructies, voornamelijk uitgevoerd door middel van compartimentsbrandproeven.

Tabel 1 geeft een overzicht van onderzoeken met in totaal meer dan 70 compartimentsbrandproeven met houtconstructies op realistische schaal. Verder is een

overzicht van kleinschalige brandcompartimentsproeven te vinden in Tabel 2. De tabellen nemen ook een paar lopende projecten mee, die niet in de literatuurlijst staan. Naast proeven van massief houten constructies (MH) zijn ook proeven van houtskelet constructies (HS) meegenomen. Eerdere overzichten van compartimentsbrandproeven zijn gepubliceerd door Brandon en Östman (2016), LaMalva en Hopkin (2021) en Ronquillo et al (2021).

Leeswijzer tabel: Met het doel de lezer een indicatie te geven van de uitbrandingsweerstand van de beproefde compartimenten is een indicatie van de maximaal toegepaste blootgestelde oppervlaktes en een indicatie van het aantal brandproeven dat een afkoelfase doorliep, opgenomen in de tabellen.

De studies zijn genummerd, waarbij de letter G voor grootschalig (compartimenthoogte >2.0 m) of K voor kleinschalig is toegevoegd. Verder worden in dit hoofdstuk deze nummers vetgedrukt benoemd om het opzoeken in de tabel te vergemakkelijken.

De notatie “1/5” in de kolom volledige afkoeling geeft aan dat 1 van de 5 compartimentsbranden significant afkoelde voordat de test werd gestopt. De openingsfactor is berekend volgens Eurocode 1 (1991-1-2, 2002). Ter indicatie: volgens data van meer dan 700 compartimenten in nieuwbouw, hebben veruit de meeste appartementen een openingsfactor tussen 0.05 en 0.15 m^{0.5} (Brandon et al., 2021a). Openingsfactoren van kantoorgebouwen (alleen met een CLT constructie) van hetzelfde onderzoek hebben een openingsfactor tussen 0.18 en 0.34 m^{0.5}.

De vuurlastbijdrage van beschermde en onbeschermde massiefhouten constructies is verschillend en is om die reden afzonderlijk besproken in de volgende paragrafen. Ook is de vuurlastbijdrage van houtskeletconstructies afzonderlijk besproken.

Tabel 1: Overzicht van compartimentsbrandproeven op realistische schaal (MH=Massief Hout, HS= Hout Skelet, SS= Staal Skelet, n-verd indiceert het aantal verdiepingen van het bouwwerk, 0/4=> 0 van de 4 compartimentsbranden had een significante afkoelfase, ?= twijfelgeval, Onb= onbekend)

No.	Referentie	Aantal comp. proeven	Vloer opp. (m2)	Br.stof (MJ/m ²)	Openings-factor (m ^{0.5})	Volledige afkoeling	Max. bloot-gestelde oppervlaktes	Volledige afkoeling bij max. bloot-stelling
G1	Lennon et al. (2000)	1 (HS 6-verd)	Onb.	Onb.	Onbekend	0/1	geen	N
G2	Hakkarainen (2002)	4	15.8	900**	0.042	0/4	wanden & plafond	N
G3	Frangi en Fontana (2005)	6 (HS 2-verd)	18.0	211-237	0.041	0/6	wanden & plafond	N
G4	Frangi et al. (2008)	1 (MH)	11.2	790	0.032	0/1	geen	N
G5	Lennon et al. (2010)	3 (HS)	12.0	450	0.024	0/3	geen	N
G6	McGregor (2013)	5 (MH)	15.8	128-553	0.042	1/5	wanden & plafond	J/N***
G7	Li et al. (2014)	3 (2HS, 1SS)	15.8	601-614	0.042	3/3	geen	J
G8	Medina Hevia (2014)	3 (MH)	15.8	532	0.042	1/3	2 wanden	N

G9	Su en Loughheed (2014)	4 (1MH, 2HS, 1SS)	52.5	550	0.031	TG*	geen	N
G10	Su en Muradori (2015)	1 (MH)	23.7	790	0.064	0/1	geen	N
G11	Kolaitis et al (2014)	1 (HS)	4.9	420	0.015	0/1	geen	N
G12	Janssens (2015)	2 (MH)	14.8	575-600	0.084	2/2	geen	J
G13	Hox (2015)	1 (MH)	13.3	653	0.034	0/1	~2 wand. & plafond	N
G14	Emberley (2017)	1 (MH)	12.3	6.5kg*	0.042	1/1	1 wand & plafond	J
G15	Hadden et al (2017)	4 (MH)	7.3	132	0.058	1/4	2 wanden & plafond	N
G16	Just et al. (2017)	1 (MH 2-verd)	15.8	600	0.072	0/1	2 wanden	N
G17	Su et al (2018a)	6 (MH)	42.3	550	0.03/0.06	2/6	plafond & 1 wand	N
G18	Zelinka et al (2018)	5 (MH 2-verd)	84.6	550	0.104	4/5	20% van plafond	J
G19	Su et al (2018b)	5 (MH)	10.8	550	0.03	?**	2 wanden & plafond	N
G20	McNamee et al (2020)	3 (MH)	24.0	891	0.03/0.05/0.144	3/3	plafond	J/N
G21	Gorska (2020)****	1 (MH)	12.3	6.5kg*	0.042	1/1	1 wand & plafond	J
G22	Brandon et al. (2021a)	5 (MH)	48.0	560	0.06	4/5	plafond & >2.5wand	J
G23	Kotsovinos et al (2022)	1 (MH)	352	374	0.071	1/1	plafond	J
G24	Engel (2022)	5 (MH/ HSK)	20/40	1085	0.094	2?/5	wand & plafond	N
G25	Hopkin et al (2022)	3 (MH)	28.5	265***	0.165	2/2	plafond	J
G26	Chaumont & Brandon (unp.)	2 (MH)	120	570	0.17	2/2	plafond	J
G27	Canadian Wood Council (unp.)	Onb.	Onb.	Onb.	Onb.	Onb.	Onb.	J
G28	Saeter Bo et al. (unp.)	2 (MH)	102	~420	0.22	1/2	wand & plafond	N

* 80 kg (6.5 kg/m²) hout was gebruikt als brandlast. De energiewaarde is niet gegeven. Een redelijke aanname is dat de variabele vuurlast ongeveer 120 MJ/m² was.

** Vanwege inbranding achter de gipsbescherming koelde de kamer in veel gevallen niet helemaal af en de temperaturen stagneerden na een periode van afkoeling.

***Ingeschatting gebaseerd op de verbrandingsenergieplot van de gasbrander.

****Dezelfde proef als gepubliceerd door Emberley *et al.* (2017).

Tabel 2: Overzicht van compartimentsbrandproeven op kleine schaal

No.	Referentie	Aantal comp. proeven	Vloer opp. (m ²)	Brandstof MJ/m ²	Opening-factor (m ^{0.5})	Volledige afkoeling	Max. blootgesteld hout	Volledige afkoeling bij max. blootstelling
K1	Crielaard (2015)	5 (MH)	0.25	220-448	0.042	3/5	3 wanden	N
K2	Olivier (2019)	5 (MH)	0.25	277-409	0.042	4/5	2 wanden	J/N

K3	Gorska (2020)	16 (MH)	0.25	100	0.035	10/16	wanden & plafond	N
K4	Nothard (2022)	3 (MH)	1.8	96	0.116?	3/3	plafond	J
K5	Karranagodage (unp.)	>10 (MH)	0.25	75 -300	0.02/0.04	Onb.	3 vlakken	Onb.

In Tabel 3 worden dezelfde studies onderverdeeld voor de gebouw typologieën waarvoor deze relevant zijn. De relevante gebouwhoogte is vaak niet vermeld in de bron; met kennis van de context van de studies is een inschatting gemaakt van de gebouwhoogte waarvoor de resultaten vooral relevant zijn. Voor gevallen waarbij een grotere onzekerheid bestaat, zijn de categorieën met lichtgroen aangegeven in plaats van donkergroen. Omdat de studies op chronologische volgorde zijn geordend, is de verschuiving van focus van stick-built houtskeletbouw naar CLT zichtbaar. Ook is zichtbaar dat recentelijk een verschuiving plaatsvindt van woonfunctie naar kantoorfunctie. Bepaalde typologieën zijn weinig of niet bestudeerd, zoals vakwerk constructies en gebouwen met een gezondheids- of winkelfunctie.

Tabel 3: Overzicht van typologieën

No.	Referentie	Constructietypologie					Hoogte onderverdeling			Functie onderverdeling									
		Houtskelet - Stick built (1D)	Houtskelet - Prefab (2D)	Houtskelet - Prefab modules (3D)	Massief Hout - Vakwerk	Massief hout - platen, CLT of NLT	Hybride constructies	Laag < ~3 verdiepingen	Binnen brandweer bereik ≤ ~8 verd.	Buiten brandweer bereik ~>9 verd.	Vluchtroute verticaal	Vluchtroute horizontaal	Bijeenkomstfunctie (Atrium)	Woon- of slaapfunctie	Kantoorfunctie	Winkelfunctie	Onderwijsfunctie	Cellfunctie	Gezondheidsfunctie
G1	Lennon <i>et al.</i> (2000)																		
G2	Hakkarainen (2002)																		
G3	Frangi en Fontana (2005)																		
G4	Frangi <i>et al.</i> (2008)																		
G5	Lennon <i>et al.</i> (2010)																		
G6	McGregor (2013)																		
G7	Li <i>et al.</i> (2014)																		
G8	Medina Hevia (2014)																		
G9	Su en Loughheed (2014)																		
G10	Su en Muradori (2015)																		
G11	Kolaitis <i>et al.</i> (2014)																		
G12	Janssens (2015)																		
G13	Hox (2015)																		
G14	Emberley (2017)																		
G15	Hadden <i>et al.</i> (2017)																		
G16	Just <i>et al.</i> (2017)																		
G17	Su <i>et al.</i> (2018a)																		
G18	Zelinka <i>et al.</i> (2018)																		
G19	Su <i>et al.</i> (2018b)																		
G20	McNamee <i>et al.</i> (2020)																		
G21	Gorska (2020)																		
G22	Brandon <i>et al.</i> (2021a)																		
G23	Kotsovinos <i>et al.</i> (2022)																		
G24	Engel (2022)																		
G25	Hopkin <i>et al.</i> (2022)																		
G27	Chaumont & Brandon (unp.)																		
G28	Canadian Wood Council (unp.)																		
G29	Saeter Bo <i>et al.</i> (unp.)																		
K1	Crielaard (2015)																		
K2	Olivier (2019)																		
K3	Gorska (2020)																		
K4	Nothard <i>et al.</i> (2022)																		
K5	Karranagodge (unp.)																		

2.4.1 Vuurlast bijdrage van volledig beschermde massieve houtconstructies

Brandproeven van massiefhouten compartimenten, waarbij het hout volledig beschermd was, zijn gerapporteerd door Hakkarainen (2002) **G2**, McGregor (2013) **G6**, Su en Loughheed (2014) **G9**, Su en Muradori (2015) **G10**, Janssens (2015) **G12**, Su *et al.* (2018) **G17**, Zelinka *et al.* (2018) **G18**. Uit deze studies kan geconcludeerd worden dat in geval van voldoende afscherming van het houten oppervlak door brandwerende gipsplaten (of andere brandwerende platen) betrokkenheid van hout bij branden kan voorkomen. Als dat het geval is, komen de verbrandingssnelheid, brandtemperatuur en brandduur van de brand overeen met dat van branden in onbrandbare constructies (mits de muren een vergelijkbare isolatiewaarde hebben). Het aantal lagen en de dikte van gipsplaten die nodig is om betrokkenheid van het hout bij een brand te voorkomen, is afhankelijk van het compartimentontwerp en de hoeveelheid brandbare materialen in een compartiment (Brandon, 2018). In de meeste van de bovengenoemde onderzoeken waren twee brandwerende (Noord-Amerikaanse, type X) gipsplaatlagen van 12,5 tot 15,9 mm dik nodig om de betrokkenheid van CLT bij de compartimentbrand te voorkomen. Drie lagen van 15,9 mm gips waren toegepast in een studie van Su *et al.* (2018) **G17** op basis van temperatuurberekeningen volgens methodes verder besproken in 5.1. Het is bij het aanbrengen van de gipsplaten van belang rekening te houden met oorzaken die kunnen leiden tot vroegtijdig wegvallen van gips. Zulke oorzaken zijn: grote onderlinge schroefafstanden (Sultan, 2008), te korte gipsschroeven, kleine randafstanden van schroeven en het te diep schroeven van de schroefkoppen (Just en Brandon, 2019). Verkeerde schroefmethodes kunnen de beschermtijd drastisch verminderen.

Een vroege studie (Hakkarainen, 2002 **G2**) toont aan dat het afvallen van de basis laag van gipsplaten kan leiden tot significante bijdragen van het hout aan de vuurlast, wat in dit geval bleek uit een significante toename van de vuurpluim uit het raamopening van het compartiment.

Een studie van Su *et al.* (2018b) **G19** duidt aan dat verkoling van hout dat beschermd is door gips, ertoe kan leiden dat een brand niet volledig dooft. Analyse van de laatste test, liet zien dat de dikte van de verkoolde laag achter twee lagen brandgips na vier uur vergelijkbaar was met de verkoolde laag in het blootgesteld hout.

Significant minder inbranding vond plaats achter twee lagen van 15,9mm brandgips in Test 1 van Brandon *et al.* (2021a) **G22**. Na de proef was op enkele plekken na het hele compartiment gedoofd. Lokaal smeulen achter de gipsplaten stopte niet automatisch en moest handmatig geblust worden, zoals verder besproken in 5.7.

2.4.2 Vuurlast bijdrage van blootgestelde massieve houtconstructies

Om een overzicht te geven van compartimentsbrandproeven met blootgestelde massieve houtconstructies zijn de proeven ingedeeld in:

- **Eerste generatie studies**, waar de focus ligt op het brandgedrag in compartimenten met blootgestelde massiefhouten elementen

- **Tweede generatie studies**, waar actief de grens is opgezocht waarbij het doel is om branden uit zichzelf te laten doven.
- **Studies waar de focus ligt op brandontwikkeling**

Eerste generatie studies

De eerste generatie studies, zijn uitgevoerd door McGregor (2013) **G6**, Medina Hevia (2014) **G8**, Hox (2015) **G13**, Emberley *et al.* (2017) **G14**, Hadden *et al.* (2017) **G15**, Su *et al.* (2018a) **G17**, McNamee *et al.* (2020) **G20**. Hakkarainen (2002) **G2** rapporteert proeven met parallel gelijmde houten schijven, vergelijkbaar met dunne gelijmde balken met een significante diepte. Proeven op kleinere schaal zijn uitgevoerd door Crielaard (2015) **K1**, Olivier (2019) **K2** en Gorska (2020) **K3**.

De resultaten van deze proeven duiden op de volgende aspecten die significant kunnen zijn voor de intensiteit, de duur en consequenties van een brand:

- De brandontwikkeling kan versneld worden (verder besproken in de volgende paragraaf).
- Ten opzichte van volledig beschermde compartimenten leidt de verbranding van het blootgestelde hout tot een toename in de totale vuurlast en hogere totale verbrandingssnelheid.
- De hogere vuurlast en verbranding snelheid kan leiden tot:
 1. een grotere brandpluim uit openingen en een vergrootte warmteblootstelling aan de gevel, mits de brand ventilatie-gecontroleerd is;
 2. een verlengde brandduur (aangeduid door het verschil van de foto's in Figuur 5);
 3. hogere temperaturen binnen een compartiment, als de brand brandstof-gecontroleerd is.
- Delaminatie van gelijmd hout als gevolg van verhitting kan een volledig ontwikkelde brand verlengen en een puls in de brandpluim veroorzaken. Het kan ook de uitdooffase onderbreken en een tweede flashover optreden.
- Delaminatie hoeft niet altijd een significante consequentie te hebben. De effecten van delaminatie zijn kleiner voor compartimenten met grotere openingen (Su *et al.* 2018a).
- Wegvallen van beschermende lagen kan een vergelijkbaar effect hebben als delaminatie, omdat het op een vergelijkbare manier kan leiden tot een plotselinge significante toename van betrokken brandstof.
- Verkoling van beschermd of ingekapseld hout (bijv. door gips) kan volledige afkoeling en uitdoving uitsluiten en vereist vaak handmatige blussing om de brand te stoppen (Su *et al.* 2018b **G19**, Brandon *et al.* 2021a **G22**).

De brandproeven van Hox (2015) **G13**, Test 1-6 van Su *et al.* (2018a) **G17** en Test 1 en 2 van McNamee *et al.* (2020) **G20** werden doorgevoerd totdat een deel van de constructie bezweek. In de meeste andere gevallen werd de brand handmatig geblust. Veel compartimenten die niet of niet volledig werden geblust, bleven doorsmeulen. In Test 2 door McNamee *et al.* (2020) was dit in alle waarschijnlijkheid de oorzaak van het bezwijken van het dak, dat na 29 uur ontdekt werd.



Figuur 5: Volledig beschermd CLT compartiment (links), vergelijkbaar compartiment, met het plafond en een muur blootgesteld (rechts), 1 uur na aansteken.

Tweede generatie studies

Tweede generatie studies waarbij het doel is om branden uit zichzelf te laten doven, zijn gerapporteerd door Zelinka et al (2018) **G18**, Su et al (2018b) **G19**, Just *et al.* (2017) **G16**, Gorska (2020) **G21**, Brandon *et al.* (2021a) **G22** en Hopkin et al (2022) **G25**. Op kleinere schaal werden proeven door Olivier (2019) **K2**, Gorska (2020) **K3** uitgevoerd voor hetzelfde doel.

Gebaseerd op een overzicht van 41 compartimentsbrandproeven door Brandon en Östman (2016) en de proefserie van Su *et al.* (2018b) **G19**, concludeert Brandon (2018) dat het volgende ervoor zorgt dat een brand uiteindelijk afkoelt zonder het ontstaan van een tweede flash-over:

- het limiteren van het blootgestelde houtoppervlak;
- het voorkomen van een verhoging van de vuurlast en verbrandingssnelheid gedurende een brand.

Redenen voor een significante verhoging van de vuurlast in eerdere brandproeven waren:

- delaminatie van gelijmde houten delen;
- wegvallen van brandbescherming.

Aanvullend hierop zijn er ook aanleidingen geïdentificeerd die volledige afkoeling en uitdoving tegen gaan, namelijk:

- (I) significante houtverkoling achter beschermde lagen (Su *et al.* 2018b) **G19**;
- (II) blootgestelde houten oppervlaktes die door onderlinge interactie de verbranding langer stand laten houden (Brandon 2021) **G22**.

Van de bovengenoemde punten is de meeste aandacht van onderzoekers geschonken aan het voorkomen van delamineren. CLT delaminatie kan theoretisch worden voorkomen door het gebruik van een dikkere blootgestelde lamel in de CLT. Just *et al.* (2017) **G17** voerden de eerste compartimentsbrandproef uit waarbij een dikkere lamel werd

toegepast met het doel delaminatie te voorkomen. Hoewel *a priori* modeleren (volgens een methode door Brandon en Andersson, Annex A, 2018) suggereerde dat een uiterste lamel dikte van 45 mm nodig was, was het voor de CLT-producent alleen mogelijk om lamellen met een maximale dikte van 40 mm toe te passen. Het gebruik van CLT met een 40 mm dikke geëxponeerde laag leidde uiteindelijk tot delaminatie in een laat stadium van de brand. Gorska (2020) **G21** rapporteert een compartimentsbrandproef van CLT met een 45 mm dikke uiterste laag, waarbij de brand afkoelde totdat het uit zichzelf doofde. Een mogelijk punt van commentaar op het gebruik van dikkere lamellen is dat deze methode niet altijd praktisch haalbaar is. De lamel dikte in CLT is in de praktijk gelimiteerd en is niet geschikt als algemene oplossing voor uitdagendere brandscenario's dan getest door Just *et al.* (2017) **G17** en Gorska (2020) **G21**.

Een andere manier om delaminatie tegen te gaan is het limiteren van het blootgestelde houtoppervlakte. Dit was gedaan in de proeven gerapporteerd door Zelinka *et al.* (2018). Voor de proeven was er door middel van modelering een voorspelling gedaan van de temperaturen in de lijmlagen en de temperaturen achter de gipsplaten. Door een klein oppervlak bloot te stellen (bijvoorbeeld 20% van het plafond oppervlakte), bleven de temperaturen in de lijm lager dan de delaminatie-temperaturen die geïdentificeerd waren voor dezelfde lijm (Brandon en Dagenais, 2018).

CLT delaminatie kan ook voorkomen worden door het gebruik van lijmen met een hogere brandprestatie (Frangi, 2008b; Janssen, 2017; Brandon en Dagenais, 2018; Zelinka *et al.* 2018 **G18**). Brandproeven van CLT compartimenten met een verbeterde brandprestatie van de CLT lijm zijn uitgevoerd door Su *et al.* (2018b) **G19** en Brandon *et al.* (2021a) **G22**. Een studie die dit op kleinere schaal deed met een Melamine Urea Formaldehyde lijm is gepubliceerd door Olivier (2019) **K2**. De conceptversie van de toekomstige Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022) omschrijft dat resistentie tegen delamineren kan worden aangenomen voor (1) fenol-formaldehyde Type I lijmen volgens EN 301, (2) lijmen voor LVL volgens EN 14374, (3) lijmen voor multiplex volgens EN 636 of (4) lijmen met een gedemonstreerde brandprestatie. Hierbij wordt verwezen naar een brandproef beschreven in Annex B van de toekomstige Eurocode 5, welke ontwikkeld was in een studie door Brandon, Klippel en Frangi (2021). De studie liet naast een adequate herhaalbaarheid ook zien dat de brandproef een schade induceert die ongeveer equivalent is aan die van de Noord Amerikaanse compartimentsbrandproef in Annex B van ANSI/APA PRG 320 (2019).

In compartimenten met significante koeling (*i.e.* grote ventilatie openingen) is het effect van delaminatie kleiner (Su *et al.* 2018a **G17**, Hoehler *et al.* 2018) of zelfs insignificant zoals in de studie van Hopkin *et al.* (2022) **G25**.

Een inschatting van de benodigde hoeveelheid beschermende gipslagen in de proeven door Su *et al.* (2018) **G17**, Zelinka *et al.* (2018) **G18** en Brandon *et al.* (2021) **G22**, was gemaakt door middel van een zone model verder besproken in 5.1. Het doel hierbij was om significante verkoling achter de gipsplaten tegen te gaan. In een project genaamd Timpulse (Engel *et al.* 2022 **G24**) is een geschikt aantal gipslagen op experimentele wijze bepaald.

Studies waar de focus ligt op brandontwikkeling

Een studie met kamer brandproeven door Kagiya *et al.* (2017) toont aan dat het risico op flashover verhoogd is in compartimenten met blootgestelde houten oppervlaktes. In hun studie met een relatief lage brandbelasting, leidde alle configuraties met blootgesteld hout uiteindelijk tot flashover. De branden in compartimenten met onbrandbare oppervlaktes leidden niet tot flashover, omdat er geen extra brandbare materialen betrokken konden raken.

De meeste compartimentsbrandproeven zijn uitgevoerd op de schaal van een appartement of kleiner. Kotsovinos *et al.* (2022) **G23** voerden een compartiment brandproeven uit met een plattegrond van 352 m². Een houten vuurlast was verspreid over de vloer en aan een kant aangestoken. Na ongeveer 6 minuten van brandontwikkeling spreidde de brand zich in enkele seconden onder het gehele plafond, dat uit blootgesteld CLT bestond. De straling van het brandende plafond resulteerde een paar minuten later in de ontvlaming van de vuurlast op de grond. De onderzoekers concluderen dat de brandontwikkeling vele malen sneller ging dan is aangenomen in Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002) voor een snelle brandontwikkeling. De onderzoekers voerden overigens nog twee proeven uit die nog niet zijn gepubliceerd.

In de praktijk worden nog grotere en complexere compartimenten, zoals atriums, met blootgesteld houtoppervlaktes gerealiseerd. Atriums verbinden een aantal vloeren aan elkaar en worden soms uitgevoerd zonder brandscheiding. Het is tot op heden nog niet onderzocht hoe een brand zich kan spreiden in atria met blootgesteld hout en wat de consequenties van de extra rook ontwikkeling zijn.

Er zijn ook voorbeelden van brandongevallen in grote compartimenten met een blootgestelde houtoppervlaktes, waarbij een volledige flashover plaatsvond². Voorbeelden van zulke branden zijn: een brand van het chemie gebouw van Nottingham University in (Morby, 2014); een brand van een schoolgymzaal in Japan (Kagiya, 2008); een brand in een Top Mountain Crosspoint Motorfietsmuseum in Oostenrijk (Smith, 2021)

2.4.3 Vuurlast bijdrage van houtskeletbouw

De grootste brandproefopstelling van een houtconstructie ooit uitgevoerd was deel van een project genaamd Timber Frame 2000 door (Lennon, 2000) **G1**. De opstelling had 6 verdiepingen met een vloeroppervlakte van 12.4 x 24.1m. Elke vloer had vier appartementen, een lobby, trappen en een liftschacht. Het gebouw was gebruikt voor een aantal proeven, waarvan de brandproef de laatste was. De constructie bestond uit een houtskelet dat beschermd was met gips platen. De brand was geïnitieerd in een appartement op de derde verdieping. De gepubliceerde temperatuurcurves geven aan dat het ongeveer 24 minuten duurde voordat flashover plaats vond. De brand werd na 64 minuten geblust omdat de houten regels van de constructie betrokken raakten van de brand. Het rapport duidt aan dat er geen constructieve bezwijking plaats vond gedurende de brandproef. Volgens verschillende mediabronnen (*e.g.* Pearson en Lane, 2002) zette

² Een volledige flashover was geconstateerd op basis van beelden van vlamuitslag uit alle openingen van een groot compartiment.

de brand zich voort in de holle ruimtes van de constructie. De brand werd 2.5 uur na de test ontdekt door een laboratoriummedewerker en het duurde vervolgens 5.5 uur om de brand te blussen, omdat de brand moeilijk te lokaliseren en te blussen was. De schade was substantieel. Vergelijkbare schadegevallen zijn verder besproken in 2.13.

Su en Loughheed (2014) **G9** hebben een serie van 4 grootschalige kamerbrandproeven gerapporteerd, waarvan twee geconstrueerd waren met een lichte houtconstructie. De compartimenten representeerden appartementen met scheidingswanden. De scheidingswanden hadden geen brandwerendheidseis en bezweken in een vroeg stadium tijdens de brand. Het vroeg bezwijken van de scheidingswand leidde tot een doorbreking van de gipslaag, waardoor de brand voortijdig kon spreiden in de holle ruimtes boven het plafond. De beschermingstijd van de gipslagen (*i.e.* de tijd nodig om een temperatuurstijging van 250 °C of 270 °C te krijgen) was het kortst voor de lichte houtconstructies. Dezelfde bescherming door gips had een meer dan twee keer zo lange beschermingstijd in de CLT constructie.

In de proeven van Lennon *et al.* 2010 **G5** brak de brand ook door tot in de holle ruimtes van het plafond. In de meeste gevallen zijn kamerbrandproeven geblust voordat er een duidelijk teken van een continue dooffase was. De enige twee kamerbrandproeven van lichte houtconstructies met een lange afkoelfase zijn gepubliceerd door Li *et al.* (2015). Het houten raamwerk was gevuld met glasvezelisolatie.

Geconcludeerd kan worden dat in alle zes gevonden kamerbrandproeven van houtskeletbouw met holle ruimtes, de brand zich naar deze holle ruimtes verspreidde. Ook een analyse van echte brandongevallen zoals verder besproken in 2.13, duidt erop dat dit in de praktijk leidt tot een groot aandeel van incidenten met grote materiële schade. Waar dit niet acceptabel is, biedt het vullen van de ruimte met onbrandbare isolatie een mogelijke oplossing.

Volgens Note 2 in Annex A2 van de laatste conceptversie van prEN 1995-1-2:2025(E) (2022) is de bijdrage van het hout voor houtskeletbouw verwaarloosbaar. Hierbij wordt gerefereerd naar de binnentemperatuur van een compartiment. Het brandverloop in de houtskeletbouw proeven van Su en Loughheed (2014) **G9** laat in vergelijking met dat van eenzelfde proef met een staalskelet zien dat de bijdrage van de houtskelet constructie de brand wel kan verlengen.

2.5 Invloed op constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand

Zoals aangegeven in 2.4 kan de vuurlastbijdrage van vooral massiefhouten constructies de brandduur verlengen en/of de intensiteit van de brand vergroten. Door deze bijdrage tonen veel van de compartimentsbrandproeven besproken in 2.4 aan dat er in de meeste gevallen geen sprake is dat de brand uit zichzelf dooft. Het niet uit zichzelf doven van de brand zal leiden tot het bezwijken van de constructie als er geen succesvolle interventie van de brandweer plaats vindt. Ook in het geval dat de brand wel uit zichzelf dooft zal een significante permanente vuurlast leiden tot meer constructieve schade. Inbranding achter gipsplaten (of andere bescherming) kan langer doorgaan dan inbranding van onbeschermd hout, waardoor de constructieve schade op den duur net zo significant kan zijn als de schade van onbeschermd hout.

Het bezwijken van een constructief element in een hoger gebouw hoeft niet perse te leiden tot een disproportionele instorting, (ofwel progressive collapse). Het kan echter beargumenteerd worden dat het bezwijken van een element van de hoofddraagconstructie eerder tot een disproportionele instorting leidt als andere elementen van de hoofddraagconstructie ook constructieve schade hebben ondervonden, wat waarschijnlijk het geval is in uitgebreide brandscenario's.

Er zijn in de literatuur geen studies gevonden die gerelateerd zijn aan disproportionele instorting ten gevolge van brand in houten constructies. Echter, in een artikel over progressive collapse in mitigatie in massiefhouten constructies (Daneshvar en Chui, 2019) wordt het onderwerp voor de situatie van een brand in een korte discussie aangekaart.

Beitel en Iwankiw (2008) geven een overzicht van 14 hoogbouwconstructies die disproportioneel bezweken door een brand. Eén van de gebouwen had een 6 verdiepingen hoog houtskelet constructie, maar er is weinig bekend over de brand. De rest van de ingestorte gebouwen hadden onbrandbare draagconstructies.

Brandon (2018b) vult de lijst van ongevallen aan en zoekt informatie over de brandspreiding en de tijd tot instorting voor alle branden. Hij concludeert dat in alle branden waarvan de brandspreiding bekend is, de brand verspreid was tot meerdere verdiepingen voordat disproportioneel instorten plaats vond. In het enige incident dat dit niet het geval was, was een bouwfout geïdentificeerd. Het totaal aantal geïdentificeerde brand gerelateerde disproportionele instortingen in gebouwen van 4 of meer verdiepingen was slechts 17 branden, waarvan 5 gevallen het resultaat waren van de aanslagen op het World Trade Center en Pentagon. Als deze niet worden meegenomen in de vergelijking, zijn er slechts vier branden in gebouwen boven acht verdiepingen geïdentificeerd. Twee daarvan (in Sao Paolo en Teheran) voldeden in veel opzichten niet aan de lokale bouwregelgeving. Omdat het vrij aannemelijk is dat instortingen van hoge gebouwen op grote schaal worden gepubliceerd, is het waarschijnlijk dat niet veel gebouwen missen in de analyse. Het aantal geïdentificeerde instortingen in hogere gebouwen door brand is extreem laag in vergelijking met het immense bouwbestand. Dit suggereert dat de huidige praktijk en regelgeving voor conventionele gebouwen effectief is om instorting van middelhoge en hoge gebouwen tegen te gaan.

Geen conclusies kunnen getrokken worden direct gerelateerd aan houten constructies. Een ogenschijnlijke correlatie tussen een grote brandspreiding en buitenproportionele instortingen geeft echter een indicatie dat limiteren van brandspreiding een belangrijk aspect is om het risico van disproportioneel instorten te voorkomen. Aangezien onderzoek aantoonde dat houtconstructies gevoeliger zijn voor sommige mogelijkheden van brandverspreiding, zoals besproken in 2.5, 2.7 en 2.13, is een dergelijke correlatie van belang voor houtconstructies.

2.6 Invloed op het beperken van het uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw - brandscheidingsconstructie

In 2.4 is besproken dat de bijdrage van hout aan een brand kan leiden tot een langere en intensievere belasting door brand. Dit heeft niet alleen effect op de draagconstructie, maar ook op de brandscheidingsconstructie. Als het achterliggende prestatiedoel is dat er geen doorbraak van de brand door de brandscheidingsconstructie optreedt tijdens de gehele natuurlijke brandduur in een gebouw, dan moet er rekening gehouden worden met de extra vuurlast. Indien een doorbraak wel acceptabel is en het prestatiedoel inhoudt dat de hoofdconstructie een volledige brand kan weerstaan zonder bezwijken, kan het belangrijk zijn rekening te houden met het feit dat de brandduur in het compartiment waarin de brand is ontstaan, wordt verlengd wanneer de brandscheidingswand wegvalt en een nieuwe vuurlast van een naastgelegen compartiment betrokken raakt bij de brand. Geen studies zijn gevonden die dit in acht nemen.

Werther *et al.* (2016) constateren dat het risico van brandspreiding tussen twee brandcompartimenten in houtconstructies hoofdzakelijk komt door verkeerd ontworpen verbindingen of installaties. Stürmer (2006) vindt dat ongeveer 50% van onderzochte installaties in muren en plafonds verkeerd waren geïnstalleerd en daarmee tot vroegtijdige doorbranding en brandspreiding kunnen leiden. Ook rookverspreiding vindt vooral plaats door verbindingen (*e.g.* Kampmeier, 2008). Bij houtconstructies is het risico van brandspreiding door deze details vergroot omdat het stromen van hete gassen langs houten oppervlaktes in een verbinding of ander detail kan leiden tot pyrolyse en een versnelde verhitting in het detail (Fornather, 2003; Frangi, 2001).

Er is geen Europese norm beschikbaar om de brandwerendheid van hoekverbindingen middels een brandproef te bepalen. Een aantal compartimentsbrandproeven met representatieve hoekverbindingen tussen CLT elementen (Just *et al.* 2017, **G16**; Su *et al.*, 2018a, **G17**; Brandon *et al.* 2021a, **G22**) suggereren echter dat juist hoeken tussen wanden en plafondelementen gevoelig zijn voor brandspreiding. Slechts enkele brandwerendheidsproeven van hoekverbindingen zijn gepubliceerd (*e.g.* Kampmeijer, 2008).

Slechts één publicatie (Ranger *et al.* 2018) van doorvoeringen door massiefhouten vloeren is gevonden. Om een indicatie van de schaarste aan te duiden, confirmeerde de laboratoriummanager in RISE Sweden (Johansson, persoonlijke communicatie, 2022) recentelijk dat zulke testen nog nooit zijn uitgevoerd in het enige Zweedse brandlaboratorium. Het is echter wel een vereiste (*e.g.* EN1366-2, 2015) om de brandwerendheid van doorvoeringen door non-conventionele wand en vloer constructies zoals CLT experimenteel te bepalen.

Studies suggereren dus dat het van belang is om verbindingen, doorvoeringen en installatiedetails te gebruiken die geschikt zijn voor houtconstructies. Hierbij is er een significant verschil tussen houtskeletbouw en massiefhouten constructies. Methodes worden besproken in 5.2.2.

Analyses van een aantal grote brandongevallen suggereren echter dat grote brandspreiding in de meeste gevallen niet te wijten is aan de brandscheidingsconstructie, maar langs andere routes. Dit is verder besproken in 2.13.

Om gelijkwaardigheid van oplossingen aan te tonen, is het interessant om de branduitbreiding in gebouwen met een houtconstructie te vergelijken met de branduitbreiding in andere bouwtypen. Een overzicht van brandschadestatistieken in landen waar houtconstructies veel voorkomen (Brandon *et al.* 2021b), geeft aan dat een dergelijke vergelijking in verschillende landen tot verschillende conclusies leidt. Het risico van branduitbreiding is afhankelijk van een groot aantal factoren in de bouwregelgeving en de bouwcultuur. Landen waar een statistisch significant verschil geïdentificeerd is, zijn Verenigd Koninkrijk, Amerika en Canada. Dit verschil is echter alleen significant voor laagbouw tot en met 4 verdiepingen. Voor gebouwen van 5 tot 6 verdiepingen is geen statistisch significant verschil gevonden, hetgeen waarschijnlijk te maken heeft met de relatief recente bouwjaar van hoge houten gebouwen in vergelijking met het bouwjaar van hoge gebouwen uitgevoerd in andere materialen.

De Canadese statistieken (Garis, 2019) duiden erop dat een eventueel statistisch verschil insignificant is voor situaties waarin sprinklers zijn toegepast. Of dat ook geldt voor andere landen is natuurlijk afhankelijk van talloze andere factoren. In de Zweedse vergelijking (Brandon *et al.* 2021b) werden gebouwen 3 tot 8 verdiepingen uit dezelfde bouwperiode vergeleken. Ondanks dat de data van branduitbreiding in houtbouw een aantal uitschieters had, is het niet aan te tonen dat het verschil statistisch significant is. Wel is er voor een aantal bekende uitschieters in Zweden met zekerheid te constateren dat de aanwezigheid van hout een significante rol heeft gespeeld bij de branduitbreiding.

2.7 Invloed op het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw - brandoverslag (NEN6068)

Hakkarainen (2002) vergelijkt branden in compartimenten met massief houten constructies. Hierbij is het hout in de eerste proef volledig onbeschermd, in de tweede proef beschermd met een 12.5 mm laag gips zonder brandclassificering en in de derde proef beschermd met twee lagen gips waarbij de uiterste laag van type F is. Hakkarainen (2002) concludeert dat de brandpluim uit de ventilatieopening significant hoger is in de eerste twee proeven. Vergelijkbare waarnemingen zijn gemaakt door Frangi en Fontana (2005) **G3**, McGregor (2014) **G6**, Su *et al.* (2018a) **G17** en Bartlett *et al.* (2019) (zelfde proeven als **G20**). In een brandproef van een volledig beschermde constructie zien Frangi *et al.* (2008) dat de brandpluim abrupt groter werd toen gips van een wand af viel. Door het gebrek aan zuurstof tijdens een volledig ontwikkelde brandfase, d.w.z. de fase waarbij alle beschikbare zuurstof wordt verbruikt, kan een toevoeging van extra brandgassen niet resulteren in een verhoging van de interne verbranding. Een toevoeging van vuurlast resulteert daarom in dat geval in meer externe verbranding.

De compartimentsbrandproeven door Frangi en Fontana (2005) **G3** duiden op een groter risico van brandoverslag naar een bovenverdieping via het raam. In een proef met

alle wanden van blootgesteld hout-gebaseerd materiaal bezweken beide glazen van het raam naar de bovenverdieping al na 7.5 minuten, terwijl dat meer dan 40 minuten nodig had in geval van de compartimenten met onbrandbare bekleding.

Studies met een significante hoeveelheid metingen in de gevel zijn gepubliceerd door Gorska (2020, kleinere schaal) **K3**, Su *et al.* (2018a) **G17**, Zelinka (2018) **G18**, Sjöström *et al.* (2021) (zelfde proeven als **G22**). Op basis van een vergelijking tussen de brandpluimgrootte van drie verschillende proefseries, concluderen Brandon en Anderson (2018) dat de significantie van de invloed van de aanwezigheid van blootgestelde houtoppervlaktes afhankelijk is van de grootte van de ventilatieopeningen. Om die reden hebben Sjöström *et al.* (2021) proeven uitgevoerd met openingsafmetingen die gebaseerd zijn op raamafmetingen van meer dan 700 appartementen. Hierbij waren de openingsfactor en de totale breedte van ramen statistisch klein, wat in de grootste brandpluim (Thomas en Law, 1972) zou resulteren.

De brandprestatie van gevels worden normaalgesproken afzonderlijk beoordeeld. De gevels worden dan toegepast in gebouwen van verschillende typologieën. Een probleem dat in de veel landen niet wordt aangekaart in de bouwregelgeving is het risico dat een achterliggende constructie eventueel kan bijdragen aan de externe vuurlast. Onderzoek hiernaar is begrensd. Een CLT wand met een gips laag is door Gibbs en Su (2015) onderzocht op basis van een Canadese gevelbrandproef. Observaties na de brand duiden erop dat het CLT niet aangetast was. Deze proef heeft tot de eis geleid om een brandbescherming van 40 minuten toe te passen tussen de gevel en de massief houten draagconstructie in de Verenigde Staten.

Om informatie te leveren voor discussies over het al dan niet toepassen van brandbare materialen in de gehele buitenwand gaf Brandon (2020) een kort overzicht van gevelbrandproeven waarbij de achterliggende CLT-constructie niet betrokken raakte bij de brand. Dit gaf aan dat er bestaande gevelsystemen zijn die kunnen voorkomen dat een houtconstructie bijdraagt aan een externe brand.

2.8 Invloed op het voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen

Bij veel van de compartimentsbrandproeven besproken in 2.4 is de warmtestraling naar externe locaties gemeten. Sjöström *et al.* (2021) vergelijken de stralingsmetingen buiten compartimenten van blootgestelde massiefhouten met significante blootgestelde houtoppervlaktes (tot het equivalente van 202% van de vloeroppervlakte). Zij concluderen dat de gemeten straling gemeten op een afstand van 8 meter van de opening, lager is dan de grenswaarden volgens de bouwregelgeving in de Verenigde Staten, het Verenigd Koninkrijk en Zweden. Deze grenswaarden worden overschreden op een afstand van 4.8 meter.

Gebouwen in Nederland dienen op het gebied van brandoverslag via de buitenlucht naar naastgelegen brandcompartimenten beoordeeld te worden met behulp van de norm NEN 6068. Paragraaf 3.3.3 geeft over nadere informatie, inclusief de randvoorwaarden van de norm dat wanden en vloeren in het gebouw niet in belangrijke mate mogen bijdragen aan de brand in het gebouw.

2.9 Invloed op het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw

Hout kan in potentie rook produceren in geval van een thermische belasting. In Europa is de invloed van de oppervlaktematerialen op de rookproductie in de beginfase van een brand gereguleerd door middel van brandklassen. Onbehandeld zachthout heeft over het algemeen klasse D-s2 do, waarin 's2' een gemiddelde rookuitstoot aanduidt. Experimenten door Ko en Nour (nog niet gepubliceerd) duiden erop dat blootgestelde houten wanden in de beginfase van een brand al de rookproductie kan verhogen.

In een later stadium van de brand spelen ook de inwendige materialen (*i.e.* die niet aan het oppervlak zitten) een rol in de rookproductie. Rook kan zich verspreiden door verbindingen naar andere compartimenten (Kampmeijer, 2008). Hiervoor is in Nederland sinds kort een rookwerendheidsclassificatie vereist.

Een verhoogde rookspreading kan ook leiden tot verhoogde schade. Een analyse van statistiek op basis van Nieuw Zeelandse data duidt erop dat de gerapporteerde rookspreading bij branden van gebouwen met een houtconstructie (van minstens 3 verdiepingen en gebouwd na 1991) statistisch groter is dan rookspreading in gebouwen met andere constructiematerialen. De analyse, uitgevoerd door RISE, is echter nog niet gepubliceerd.

2.10 Invloed op veilig vluchten

Zoals besproken in 2.4.3 kan de aanwezigheid van blootgesteld hout leiden tot een vergroot risico op flashover. Een argument om dit te onderbouwen is de brandklasse van hout, die in het algemeen D-s2,do is (Östman en Mikkola, 2006). Euroklasse D wijst op een mogelijke bijdrage aan de brandontwikkeling. "s2" geeft een tussenliggende bijdrage aan de rookproductie aan.

Zowel de brand/temperatuurontwikkeling als de productie van rook verkorten de tijdsduur van overleefbare omstandigheden. Een recente studie van (Ko en Nour, niet gepubliceerd) toont een relatief korte tijd tot levensbedreigende omstandigheden vanwege rookontwikkeling in tests waarbij de activering van de sprinkler werd vertraagd. Ook zijn testen uitgevoerd met verschillende sprinklertypes. Met uitzondering van het criterium voor zichtbaarheid, werd aan de houdbaarheidscriteria voldaan als een van de sprinklers werd geactiveerd. Er moet worden vermeld dat de kamer relatief klein was en dat de ontstekingslocatie zich op de slechtst mogelijke locatie bevond (een hoek met twee blootgestelde CLT wanden met elementen om straling naar de kamer te blokkeren). Een verkorting van de tijd van houdbare omstandigheden (ASET), leidt dan ook tot een verkorte beschikbare tijd voor evacuatie.

Zoals besproken in 2.4.3, laten brandtesten van grote compartimenten met blootgesteld hout een risico zien van zeer snelle branduitbreiding. Een dergelijke snelle branduitbreiding kan de beschikbare tijd voor veilige evacuatie verminderen, vooral in grote compartimenten. Er zijn geen bepalingsmethoden gevonden die de veilige evacuatietijd voor dit soort compartimenten voorspellen.

In het Verenigd Koninkrijk is een stay-put strategie gebruikelijk waarbij wordt geadviseerd om met gesloten deuren in een appartement te verblijven, tenzij de brand in dat appartement plaats vindt. Na de bekende brand van de Grenfell toren, waar een stay-put strategie werd toegepast, werden ook zorgen geuit over het gebruik van een stay-put strategie in gebouwen die eventueel niet bestand zijn tegen een volledige brand. Deze discussies hebben geleid tot recente richtlijnen van de Structural Timber Association, die verder worden besproken in 5.9.

2.11 Impact op het uitvoeren van reddingswerkzaamheden

De volgende punten, gevonden in verschillende bronnen zijn geïdentificeerd als scenario's die het blussen van branden onsuccesvol kunnen maken:

- Ongecontroleerde brandverspreiding over een groot deel van een grote gevel of dak (Barker, 2021);
- Brandspreiding door holle ruimtes met brandbaar materiaal (Just en Brandon, 2017);

In 2.7 is besproken dat het mogelijk is dat de gevel blootgesteld is aan een hogere vuurlast ten gevolge van een houtconstructie die betrokken raakt in een brand. Het blussen in de bovengenoemde twee scenario's kan bemoeilijkt worden door de aanwezigheid van een houtconstructie.

Branden in houtconstructies doven in veel gevallen niet compleet uit zichzelf. In proeven door McNamee *et al.* (2019) **G20** was de brand niet gedoofd. In een van de gevallen leidde dat uiteindelijk tot bezwijken. Een smeulende brand van CLT achter gips lagen dooft mogelijk niet uit zichzelf. In de studie van Brandon *et al.* (2021a) **G22**, is het smeulen achter gips na Test 1 in een aantal locaties geblust door watermist dat met hoge druk door het gips penetreerde. In andere locaties is het smeulen gestopt door het verwijderen van de gipslagen. Een thermische camera was gebruikt om het smeulen te lokaliseren. Deze plekken waren in een paar gevallen niet direct zichtbaar met de camera en hadden tijd nodig om heet genoeg te worden om gelokaliseerd te worden achter de gipslagen.

Door de gevoeligheid van hout voor waterschade, kan bluswater significante schade aanrichten in een gebouw. Waterschade in houtconstructies is een zorg die vaak benadrukt wordt door de verzekeringsbranche (*e.g.* Glockling, 2022).

2.12 Invloed op de brandveiligheid tijdens de bouw van de constructie (NEN-EN 1995-01-02 en NEN 6069)

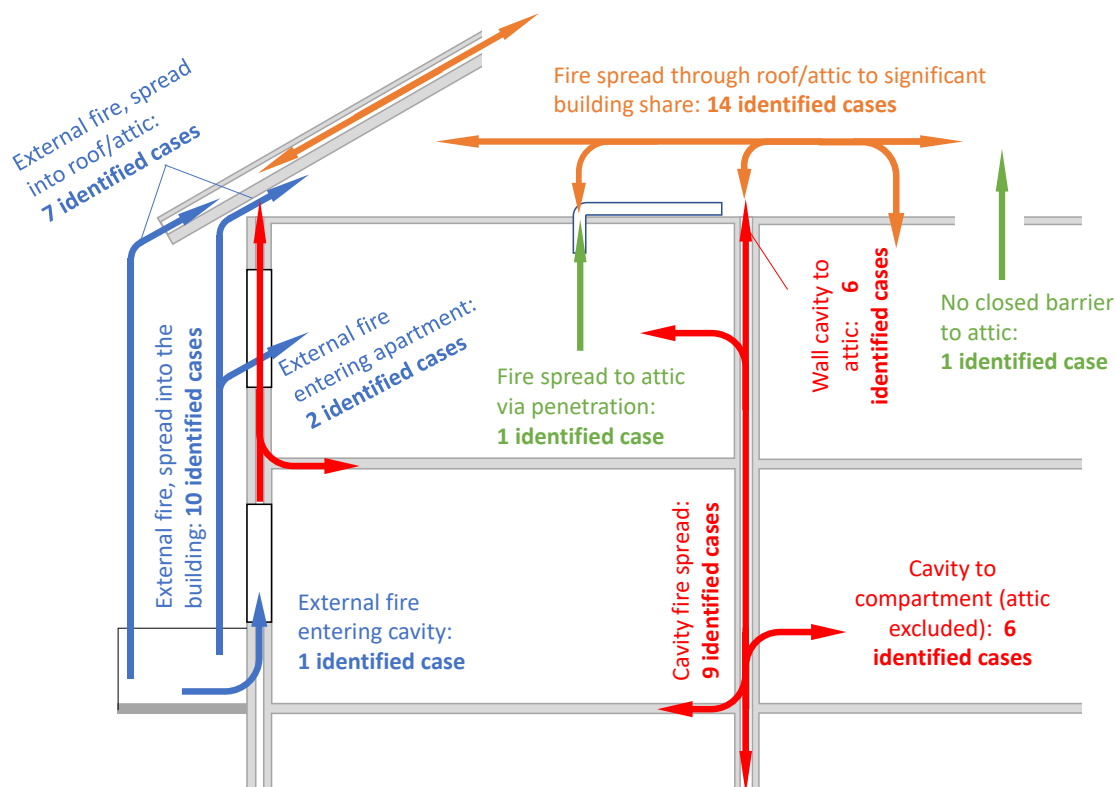
Een studie van brandschadegevallen in Engeland tussen 2010 en 2011 (Dept of Communities and Local Government, 2012), toont aan dat branden tijdens de constructie van gebouwen met een (lichte) houtconstructie statistisch gezien vele malen

groter worden dan branden in andere gebouwen. Bekende voorbeelden van zulke branden, zoals de Colindale brand in 2006, hebben ook tot schade van nevenstaande gebouwen geleid (e.g. Lane, 2006). Hoewel de data van de Dept of Communities and Local Government vermoedelijk geen of weinig massieve houtconstructies betreft, zijn er voorbeelden van branden, zoals de brand van het chemielaboratorium in Nottingham University (BBC News, 2015), die erop wijzen dat ook branden tijdens de bouw van massief houten constructies het gehele gebouw kunnen betrekken.

Martin en Klippel (2018) rapporteren een database van 85 branden tijdens de constructie van gebouwen en analyseerden de gegevens. Omdat er in veel gevallen weinig informatie is, zijn er geen goed onderbouwde conclusies te trekken. De resultaten suggereren dat brandstichting de grootste oorzaak is van branden gedurende de bouwconstructie.

2.13 Impact op schadebeperking

Statistische studies die brandschade in houten gebouwen vergelijken met de brandschade in andere gebouwen zijn gepubliceerd door de UK Dept of Communities and Local Government, (2012), Garis (2019), Garis en Clare (2014), Eriksson *et al.* (2016), Berg (2021), Brandon *et al.* (2021b). De UK studie maakt geen onderscheid in gebouwhoogte en bevat veelal data voor laagbouw. De andere studies maakten dit onderscheid wel en geven geen statistisch significant verschil in schade gevallen in gebouwen met meer dan 3 of meer dan 5 verdiepingen. Brandon *et al.* (2021b) merken wel op dat sommige beschrijvingen in brandongevalsrapporten duiden op een grotere brandschade door de aanwezigheid van hout in holle ruimtes van de constructie. Ze deden een kwalitatieve studie van ongevallen in hogere gebouwen met een houtconstructie die tot relatief grote materiaalschade hebben geleid. Van 18 gevallen was de route van de brandspreiding bekend. Al deze 18 gebouwen hadden een houtskeletconstructie met meer dan drie verdiepingen. Figuur 6 duidt de routes van significante brandspreiding aan op basis van deze 18 branden. Brandspreiding naar de zolder van een appartementencomplex is geïdentificeerd als de hoofdoorzaak van grote schadegevallen. In op zijn minst 7 van de 14 gevallen kwam de brand via de dakvoet de zolder in. In 6 van de 14 gevallen gebeurde dat via holle ruimtes. In 1 geval ontstond de brand op zolder. Brandspreiding door holle ruimtes en brandspreiding via de gevel of balkons zijn ook significante oorzaken voor grote schade gevallen. Richtlijnen die resulteerden uit deze studie van schadegevallen worden verder besproken in 5.2.1.



Figuur 6: Overzicht van geïdentificeerde significante routes van brandspreiding in 18 branden met een grote materiaalschade.

Bij het blootstellen van hout is inbranding onvermijdelijk als een flashover-brand optreedt. Het aantal studies van de reparatie na inbranding is erg beperkt. Chorlton en Gales (2021) repareerden gelijmd houten balken en bereikten maximaal slechts 66% van het originele buigcapaciteit. Brandon *et al.* (2021c) repareerden een deel van een CLT plafond na een compartmentsbrand. Zij herstelden hiermee de volledige buigsterkte en stijfheid van het originele CLT.

2.14 Impact van gebouwtypologieën

De relevantie van de in dit hoofdstuk benoemde risico's van bouwen met hout, is afhankelijk van de gebouwtypologie. De noodzaak om deze risico's te verkleinen is afhankelijk van gevolklassen en gebouwgroepen.

Voor de mate van betrouwbaarheid van een constructie maakt Eurocode NEN-EN 1990 een onderscheid in verschillende gevolklassen (consequence classes). Hierin worden de consequenties van het optreden van de risico's en de impact daarvan in hoofdlijnen verdeeld in drie gevolklassen. Tabel 4 geeft een omschrijving van de gevolklassen alsmede een aantal voorbeeld van gebouwen die in deze klassen vallen.

Tabel 4: Definitie van gevolgklassen NEN-EN 1990, tabel B1.

Gevolgklasse CC	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

Afhankelijk van de gevolgklassen gelden dan aanvullende eisen en voorschriften ten aanzien van het ontwerp en uitvoering van de gebouwen. Dit met als doel om de betrouwbaarheid van het gebouw te verhogen en maatregelen te nemen tegen de risico's zoals deze bekend zijn en kunnen worden voorzien. Dat is inclusief het risico op brand in het gebouw. Hieronder is in Tabel 5 een overzicht gegeven van de verhoogde risico's van het bouwen in hout voor een aantal relevante bouwtypologieën.

Tabel 5: Risico's en geïdentificeerde relevante gebouwtypologieën.

Verhoogde risico's	Betreffende functionele of aanvullende eisen (zie 2.1)	Relevante typologieën
Verhoogde vuurlast	Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen Veilig vluchten Veilig uitvoeren van reddingswerkzaamheden	Massieve houtconstructies met onbehandelde blootgestelde hout oppervlaktes Massieve houtconstructies met een brandbescherming die snel wegvalt Houtskeletbouw met brandbare isolatiematerialen Houtskeletbouw met veel holle ruimtes
Bijdrage aan brandoverslag	Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen Veilig uitvoeren van reddingswerkzaamheden	Massieve houtconstructies met onbehandelde blootgestelde hout oppervlaktes Massieve houtconstructies met een brandbescherming die snel wegvalt
Impact op rookontwikkeling	Veilig vluchten Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw	Massieve houtconstructies met onbehandelde blootgestelde hout oppervlaktes
Versnelde branduitbreiding binnen een compartiment	Veilig vluchten	Grote compartimenten met onbehandelde blootgestelde hout oppervlaktes
Impact op de brandscheidingsconstructie	Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw	Houtskeletbouw Massieve houtconstructies
Progressive collapse	Veilig vluchten Veilig uitvoeren van reddingswerkzaamheden Begrenzen schade (aanvullende eis)	<i>Niet onderzocht</i>
Snelle brandspreiding incidenten tijdens de bouw van de constructie	Invloed op de brandveiligheid tijdens de bouw van de constructie (aanvullende eis) Begrenzen schade (aanvullende eis)	Alle houtconstructies met meerdere verdiepingen In mindere mate: modulaire houtskeletbouw. In meerdere mate: stick built houtskeletbouw
Bemoeilijkte brandweerinzet	Veilig uitvoeren van reddingswerkzaamheden Begrenzen schade (aanvullende eis)	Houtskeletbouw Massieve houtconstructies Gebouwen buiten het bereik van de brandweer Gebouwen waarbij binneninzet van de brandweer nodig is

2.15 Impact van gebouwhoogte

Hoogtebegrenzing voor gebouwen met (1) houtconstructies, (2) zichtbare houtoppervlaktes of (3) houten gevelconstructies, is in veel landen onderdeel van de bouwregelgeving. Het meest uitgebreide overzicht is gegeven door Östman (2022), die concludeert dat de verschillen tussen hoogtebegrenzings in landen erg groot zijn. De invloed van de aanwezigheid van sprinklers op deze hoogtebegrenzings verschilt ook significant. Deze conclusies duiden erop dat er geen algemene consensus is over de risico's van houten bouwdelen in hogere gebouwen.

Risico's die hogere gebouwen met zich meebrengen zijn o.a. gerelateerd aan hogere consequenties van brandspreiding of constructieve bezwijking, moeilijkere brandweerinzet, moeilijkere evacuatie, etc. De aanwezigheid van een houtconstructie kan een invloed hebben op deze drie punten (zie 2.4.2, 2.11, 2.10). Daarom kan het een optie zijn om constructiemateriaal-specifieke maatregelen te eisen afhankelijk van de gebouwhoogte.

2.16 Impact van gebruiksfunctie

Compartimentparameters die de intensiteit van een flashoverbrand bepalen, zoals de vuurlast en ventilatieopeningen (meestal gebroken ramen), zijn afhankelijk van de gebruiksfunctie (1991-1-2, 2002). Flashover branden in open-plan kantoorgebouwen met grote (brekende) raamoppervlaktes koelen relatief snel af en leiden tot een relatief kleine inbranding (Brandon *et al.*, 2021a) **G22**. Ook heeft delaminatie een minder sterk effect in compartimenten met grote openingen (Su *et al.* 2018a) **G17**, zoals ook te zien was in recente proeven door Hopkin *et al.* (2022) **G25** met een relatief lage vuurlast en Chaumont en Brandon (unp.) **G26** met een hogere variabele vuurlast.

In compartimenten met een kleinere ventilatieopening (*i.e.* kleiner brekend raamoppervlak) zoals bijvoorbeeld in woongebouwen, kunnen branden relatief lang voortduren. In het geval van een relatief kleine zuurstoftoevoer is het mogelijk dat de houtconstructie de brand in een volledig ontwikkelde toestand houdt, door alle zuurstof te verbruiken. Dit leek het geval te zijn in proeven van Hakkarainen (2002) **G2** en McGregor (2014) **G6**. Dit duidt erop dat ruimtes met een hoge vuurlast en kleine ramen zoals opslagplaatsen een groter risico hebben om niet uit zichzelf te doven.

3 Wettelijk kader brandveiligheid

In dit hoofdstuk worden de brandveiligheidseisen beschreven die vanuit het wettelijk kader gedefinieerd zijn. Hierbij is een selectie gemaakt van meest relevante eisen met betrekking tot het bouwen in hout. In dit hoofdstuk wordt aangegeven op welke wijze de in hoofdstuk 2 benoemde aanvullende risico's van bouwen met hout, impact hebben op de bouwregelgeving, zijn hoofddoelstellingen en afgeleide doelstellingen, zoals in paragraaf 2.1 omschreven.

Het wettelijk kader in Nederland bestaat momenteel uit de Woningwet en het daaronder hangende Bouwbesluit en de Regeling Bouwbesluit. Per 1 januari 2023 zal de Omgevingswet worden ingevoerd. In de Omgevingswet wordt niet langer het Bouwbesluit maar het Besluit Bouwwerken Leefomgeving (BBL) aangestuurd waar in dit hoofdstuk op is gefocust. Hiervoor is de versie van het BBL gebruikt, bijgewerkt tot Staatsblad 2021, 658 (22 december 2021). Verder worden de aangestuurde NEN-normen behandeld en de hoogbouwrichtlijn, de 'Handreiking Hoogbouw'.

3.1 Besluit Bouwwerken leefomgeving (BBL) – publiekrechtelijke eisen

Tabel 2 geeft een overzicht van de functionele brandveiligheidseisen (de afgeleide doelstellingen uit paragraaf 2.1) die aan een ontwerp worden gesteld vanuit de BBL. Deze eisen zijn verdeeld in 6 thema's: Constructieve brandveiligheid, Beperken ontstaan van een brand en ontwikkelen brand en rook, Beperken uitbreiding brand, Veilig vluchten, Brandweerinzet en blusvoorzieningen en Brandveiligheidsinstallaties.

In de linker kolom worden de voor brand relevante functionele eisen beschreven, gekoppeld aan de paragraaf van het BBL. De middelste kolom geeft een overzicht van de prestatie-eisen waarmee invulling kan worden gegeven aan de functionele eisen. De rechter kolom geeft de relevante normen die van toepassing zijn op de prestatie eisen. Slechts de prestatie-eisen en normen die relevant zijn voor nieuwe houten gebouwen maken deel uit van dit literatuuronderzoek. Dit is aangeduid in de tabel door de overige onderdelen een lichtgrijs lettertype weer te geven.

Tabel 2: Overzicht brandveiligheidseisen BBL met selectie voor houtbouw

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
Constructieve veiligheid		
§ 4.2.1 Constructieve veiligheid	Artikel 4.11 Aansturingsartikel	
Een bouwwerk is bestand tegen krachten die tijdens het beoogde gebruik op het bouwwerk worden	Art. 4.13 Buitengewone belastingcombinaties	NEN-EN 1990 NEN-EN 1991

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
uitgeoefend en is zodanig dat bij een calamiteit voortschrijdende instorting van het bouwwerk wordt voorkomen.		
§ 4.2.2 Constructieve veiligheid bij brand Een bouwwerk is bestand tegen brand zodat geen sprake zal zijn van instorting die gevaar oplevert voor het vluchten of voor hulpverlening bij brand, gedurende een redelijke tijd.	Artikel 4.16. Aansturingsartikel	-
	Artikel 4.17. Tijdsduur niet-bezwijken	NEN 6090 Bepaling van de vuurbelasting
	Artikel 4.18. Bepalingsmethode niet-bezwijken	NEN-EN 1990 NEN-EN 1992; NEN-EN 1993; NEN-EN 1994; NEN-EN 1995; (NEN 1995-1-2 Ontwerp en berekenen van houtconstructies bij brand) NEN-EN 1996; NEN-EN 1999; of NEN 6069 Beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouwonderdeleng8
Beperken ontstaan van een brand en ontwikkelen brand en rook		
§ 4.2.6 Beperking van het ontstaan van een brandgevaarlijke situatie Een bouwwerk is zodanig dat het ontstaan van een brandgevaarlijke situatie voldoende wordt beperkt.	Artikel 4.37 Aansturingsartikel	-
	Artikel 4.38. Stookplaats	
	Artikel 4.39. Schacht, koker of kanaal	
	Artikel 4.40. Rookgasafvoer	

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
§ 4.2.7 Beperking van het ontwikkelen van brand en rook Een bouwwerk is zodanig dat brand en rook zich niet snel kunnen ontwikkelen.	Artikel 4.42. Aansturingsartikel	1.
	Artikel 4.43. Binnenoppervlak	NEN-EN 13501-1 Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen
	Artikel 4.44. Buitenoppervlak	NEN-EN 13501-1 Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen
	Artikel 4.45. Beloopbaar vlak	NEN-EN 13501-1 Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen
	Artikel 4.45a Elektrische leidingen en pijpisolatie	NEN-EN 13501-1 Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen NEN-EN 13501-6 Brandclassificatie van elektrische kabels
	Artikel 4.46. Vrijgestelde oppervlakte	2.
	Artikel 4.47. Dakoppervlak	NEN 6063 Bepaling van het brandgevaarlijk zijn van daken
§ 6.2.1 Voorkomen van brandgevaar en ontwikkelen van brand De regels in deze paragraaf zijn op een gebruiksfunctie van toepassing voor zover deze in tabel 6.11 voor die	Artikel 6.11 Aansturingsartikel	
	Artikel 6.12 Verbod op roken en open vuur	
	Artikel 6.13 Vastzetten zelfsluitend constructieonderdeel	
	Artikel 6.14 Aankleding	

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
gebruiksfunctie zijn aangewezen.	Artikel 6.15 Brandveiligheid inrichtingselementen	
	Artikel 6.16 Brandveilig gebruik grote brandcompartimenten	NEN 6060 NEN 6079
	Artikel 6.17 Behandeling constructieonderdeel	
	Artikel 6.18 Overgangsrecht: aankleding	
Beperking uitbreiding brand		
§ 4.2.8. Beperking van uitbreiding van brand Een bouwwerk is zodanig dat de uitbreiding van brand: - naar bouwwerken op andere percelen beperkt blijft; en - geen gevaar oplevert voor het vluchten of hulpverlening bij brand.	Artikel 4.49. Aansturingsartikel	3.
	Artikel 4.50. Brandcompartiment: ligging	NEN-EN 13501-1 Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen NEN 6090 Bepaling van de vuurbelasting
	Artikel 4.51. Brandcompartiment: omvang	NEN 6090 Bepaling van de vuurbelasting
	Artikel 4.52. Opvangcompartiment	NEN 6060 NEN 6079
	Artikel 4.53. Weerstand tegen branddoor en brandoverslag: niveau van eisen	NEN 6090 Bepaling van de vuurbelasting
	Artikel 4.54. Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag: bepalingmethode	NEN 6068 Bepaling van de weerstand tegen branddoor en brandoverslag tussen ruimten
§ 4.2.9 Verdere beperking van uitbreiding van brand en beperking van verspreiding van rook	Artikel 4.56. Aansturingsartikel	4.
	Artikel 4.57. Subbrandcompartiment: ligging	5.

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
Een bouwwerk is zodanig dat uitbreiding van brand en verspreiding van rook in verdergaande mate wordt beperkt dan is beoogd met paragraaf 4.2.8 zodat veilig kan worden gevlucht.	Artikel 4.58. Beschermd subbrandcompartiment: ligging	6.
	Artikel 4.59. Beschermd subbrandcompartiment: omvang	7.
	Artikel 4.60. Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag	NEN 6068 Bepaling van de weerstand tegen branddoor en brandoverslag tussen ruimten
	Artikel 4.61 Subbrandcompartiment: Weerstand tegen rookdoorgang	NEN 6075 Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten
	Artikel 4.62. Beschermd subbrandcompartiment: Weerstand tegen rookdoorslag	NEN 6075 Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten
Veilig vluchten		
§ 4.2.10. Vluchtroutes: verloop Een bouwwerk heeft zodanige vluchtroutes dat bij brand een veilige plaats kan worden bereikt.	Artikel 4.64. Aansturingsartikel	-
	Artikel 4.65 Vluchtroute	8.
	Artikel 4.66 Vluchten naar de uitgang van een subbrandcompartiment	9.
	Artikel 4.67 Uitgang van een beschermd subbrandcompartiment	10.
	Artikel 4.68 Beschermd vluchtroute	11.
	Artikel 4.69 Extra beschermde vluchtroute	12.
	Artikel 4.70 Veiligheidsvluchtroute	13.

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
	Artikel 4.71 Tweede vluchtroute	14.
§ 4.2.11. Vluchtroutes: inrichting en capaciteit Een bouwwerk heeft vluchtroutes met een zodanige inrichting en capaciteit dat bij brand een veilige plaats kan worden bereikt.	Artikel 4.73 Aansturingsartikel	a.
	Artikel 4.74 Inrichting vluchtroute: weerstand tegen rookdoorgang	NEN 6075 Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten
	Artikel 4.75 inrichting vluchtroute: weerstand tegen branddoor en brandoverslag	NEN 6068 Bepaling van de weerstand tegen branddoor en brandoverslag tussen ruimten
	Artikel 4.76 inrichting vluchtroute: permanente vuurlast	
	4.77 Rooksluis	
	Artikel 4.78 Vrije doorgang van een vluchtroute	
	Artikel 4.79 Inrichting vluchtroute: niet-besloten ruimte	
	Artikel 4.80 Doorstroomcapaciteit zonder opvangcapaciteit	
	Artikel 4.81 Doorstroomcapaciteit bij opvangcapaciteit	
§ 4.7.6 Vluchten bij brand Een bouwwerk heeft zodanige voorzieningen dat de gebruikers bij brand tijdig het bouwwerk kunnen	Artikel 4.212 Aansturingsartikel	
	Artikel 4.213 Ontruimingsalarminstallatie	NEN 2575
	Artikel 4.214 Inspectiecertificaat ontruimingsalarminstallatie	

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
ontvluchten of op een andere manier in veiligheid kunnen worden gebracht	Artikel 4.215 Vluchtrouteaanduiding	NEN 3011 NEN-EN 1838
	Artikel 4.216 Deuren in vluchtroutes: draairichting	
	Artikel 4.217 Deuren in vluchtroutes: weerstand bij openen	NEN-EN 179 NEN-EN 1125
	Artikel 4.218 Zelfsluitende constructie onderdelen	
	Artikel 4.218a Lift	NEN 6068
Afdeling 6.2.2 Veilig vluchten bij brand De regels in deze paragraaf zijn op een gebruiksfunctie van toepassing voor zover deze in tabel 6.19 voor die gebruiksfunctie zijn aangewezen.	Artikel 6.19 Aansturingsartikel	
	Artikel 6.20 Ontruiming bij brand	15.
	Artikel 6.21 Deuren in vluchtroutes	16.
	Artikel 6.22 Opstelling zitplaatsen en verdere indeling	
	Artikel 6.23 Gangpaden	
	Artikel 6.24 Beperking van gevaar voor letsel	
Brandweerinzet (en blusvoorzieningen)		
§ 4.2.12 Hulpverlening bij brand Een bouwwerk is zodanig dat hulpverlening binnen redelijke tijd personen kan redden en brand kan bestrijden.	Artikel 4.83 Aansturingsartikel	17.
	Artikel 4.84 Brandweerlift	18.
	Artikel 4.85 Loopafstand	19.
	Artikel 4.86 Hulppost	20.
§ 4.7.7 Bestrijden van brand	Artikel 4.219 Aansturingsartikel	21.

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
Een bouwwerk heeft zodanige voorzieningen voor de bestrijding van brand, dat brand binnen redelijke tijd kan worden bestreden.	Artikel 4.220 Brandslanghaspels	22.
	Artikel 4.221 Droge blusleiding	NEN 1594 Droge blusleidingen in en aan gebouwen
	Artikel 4.222 Bluswatervoorziening wegtunnel	23.
	Artikel 4.223 Blustoestellen	NEN 3011
§ 4.7.8 Toegankelijkheid voor hulpverleningsdiensten Een bouwwerk is zodanig toegankelijk voor hulpverleningsdiensten dat tijdig bluswerkzaamheden kunnen worden uitgevoerd en hulpverlening kan worden geboden.	Artikel 4.225 Aansturingsartikel	24.
	Artikel 4.226 Brandweeringang	25.
	Artikel 4.227 afbakening maatwerkvoorschriften brandweeringang	26.
	Artikel 4.228 Brandweerlift	
	Artikel 4.229 Mobiele radiocommunicatie hulpverleningsdiensten	
	Artikel 4.230 Afbakening maatwerkvoorschriften mobiele radiocommunicatie hulpverleningsdiensten	27.
Brandveiligheidsinstallaties		
§ 4.7.5 Tijdig vaststellen van brand Een bouwwerk heeft zodanige voorzieningen dat brand tijdig kan worden ontdekt zodat veilig kan worden gevlucht.	Artikel 4.207 Aansturingsartikel	28.
	Artikel 4.208 Brandmeldinstallatie	NEN 2535 Brandmeldinstallaties
	Artikel 4.209 Melding en doormelding	
	Artikel 4.210 Inspectiecertificaat brandmeldinstallatie	
	Artikel 4.211 Rookmelders	NEN 6068

Functionele eisen brandveiligheid	Prestatie-eisen houtbouw	Relevante normen voor houtbouw
		NEN 2535 Brandmeldinstallaties
§ 6.5.1 Brandveiligheidsinstallaties Geen functionele eis beschreven.	Artikel 6.32 Brandmeldinstallaties	-
	Artikel 6.33 Ontruimingsalarminstallaties	-
	Artikel 6.34 Droge blusleiding	NEN 1594
	Artikel 6.35 Blustoestellen en brandslanghaspels	-
	Artikel 6.36 Automatische brandblusinstallatie en rookbeheersingssysteem	-

3.2 Voor houtbouw relevante prestatie-eisen en bepalingsmethode

De BBL stelt in de aansturingsartikelen functionele eisen per gebruiksfunctie. Hieraan kan worden voldaan door naleving van de daaropvolgende prestatie-eisen. In deze paragraaf worden de voor houtbouw relevante brand gerelateerde prestatie-eisen beschreven, zoals weergegeven in tabel 2.

3.2.1 Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand

Artikel 4.13 (Buitengewone belastingcombinaties) van het BBL stelt eisen voor de waarborging van de constructieve sterkte tijdens een buitengewone belastingcombinatie. De eis stelt dat gedurende de ontwerplevensduur bepaald door NEN-EN 1990 de constructie niet mag bezwijken door buitengewone belastingcombinatie bepaald door NEN-EN 1991.

Artikel 4.17 (Tijdsduur niet-bezwijken) van het BBL stelt eisen voor de constructieve sterkte tijdens een brand. De eis is afhankelijk van onder meer gebruiksfunctie, gebouwhoogte, locatie vluchtroute en permanente vuurbelasting van het brandcompartiment. Hierbij is de permanente vuurbelasting bepaald volgens NEN 6090.

Op basis van dit artikel kunnen een aantal gebouwen een reductie krijgen op de vereiste brandwerendheid indien het gebouw zelf is opgebouwd uit veelal onbrandbare materialen. In die gevallen mag de vereiste brandwerendheid met 30 minuten worden gereduceerd indien de permanente vuurbelasting bepaald volgens NEN 6090, lager is dan 500 MJ/m².

Het gaat hier om gebouwen waarvan de permanente vuurbelasting van alle constructieonderdelen (alle onderdelen van het gebouw) tezamen niet of nauwelijks een bijdrage levert aan brand. In de praktijk betekent dit dat er een minder zware eis wordt gesteld aan gebouwen van steenachtig materiaal en met onbrandbare isolatie. Deze reductie geldt alleen voor woongebouwen met een vloer lager dan 7 meter, en ook voor andere gebruiksfuncties zoals kantoren, logies, en industriegebouwen.

Aan de permanente vuurbelasting conform NEN 6090 dragen die onderdelen van het gebouw bij die noodzakelijk zijn om aan de eisen van het Bouwbesluit / BBL te voldoen. Indien bijvoorbeeld zonwering is opgenomen in de EPC berekeningen maken deze ook onderdeel uit van de permanente vuurbelasting. Ook kozijnen, isolatie materialen, gevelementen, dakbedekking, kunststoffen, houten vloeren, bouwconstructies en daken tellen mee in de permanente vuurbelasting van het gebouw. Onderdelen die pas in de afbouw worden aangebracht en die niet noodzakelijk zijn om aan de eisen te voldoen (zoals plinten vloerbedekking, binnendeuren, niet dragende binnenwanden) behoren tot niet tot de permanente vuurbelasting.

Indien echter aannemelijk kan worden gemaakt dat gedurende de vereiste weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag een gedeelte van het aanwezige materiaal niet bijdraagt aan de brand, mag de in rekening te brengen vuurbelasting met dit gedeelte

van het aanwezige materiaal worden gereduceerd. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn indien de permanente vuurbelasting is afgeschermd of indien deze op een andere wijze wordt beschermd.

Artikel 4.18 (Bepalingsmethode niet-bezwijken) van het BBL beschrijft bepalingmethoden voor het niet bezwijken van de constructie tijdens een brand. NEN-EN 1995-1-2 beschrijft een methode voor het bepalen van de sterkte van houten constructie elementen tijdens een brand.

3.2.2 Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw

Artikel 6.61 (Subbrandcompartiment: weerstand tegen rookdoorgang) stelt eisen aan de weerstand tegen rookdoorgang vanuit een subbrandcompartiment naar een ander subbrandcompartiment, naar een beschermd subbrandcompartiment en naar besloten ruimte waardoor een beschermde vluchtroute voert. Bepalingsmethode volgens NEN 6075.

Artikel 6.62 (Beschermd subbrandcompartiment: weerstand tegen rookdoorgang) stelt eisen aan de weerstand tegen rookdoorgang vanuit een beschermd subbrandcompartiment naar een ander beschermd subbrandcompartiment, naar een subbrandcompartiment en naar besloten ruimte waardoor een extra beschermde vluchtroute voert. Bepalingsmethode volgens NEN 6075.

3.2.3 Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw & voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen

Artikel 4.51 (Brandcompartiment: omvang) van het BBL stelt eisen voor de maximale omvang van een brandcompartiment, afhankelijk van gebruiksfunctie. Daarnaast worden voor afwijkende gebruiksfuncties aangepaste eisen beschreven.

Artikel 4.53 (Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag: niveau van eisen) van het BBL stelt eisen aan de weerstand tegen brand door- en overslag. De eis is afhankelijk van de functie van aangrenzende compartimenten, de locatie van een extra beschermde vluchtrouten, omvang van compartiment, de hoogte van het hoogstgelegen verblijfsgebied en de vuurbelasting in het compartiment.

Artikel 4.54 (Weerstand tegen branddoor en brandoverslag: bepalingmethode) geeft de bepalingmethode die moet worden gebruikt voor het bepalen van de brand door- en overslag. Dit kan worden bepaald aan de hand van NEN 6068.

Artikel 4.59 (Beschermd subbrandcompartiment: omvang) van het BBL stelt eisen voor de maximale omvang van een beschermt subbrandcompartiment, afhankelijk van gebruiksfunctie. Daarnaast worden voor afwijkende gebruiksfuncties aangepaste eisen beschreven.

Artikel 4.60 (Weerstand tegen branddoor en brandoverslag) van het BBL stelt eisen aan de weerstand tegen brand door- en overslag van een beschermd subbrandcompartiment naar een andere ruimte en naar een ander subbrandcompartiment. Bepaald volgens NEN 6068.

Artikel 6.16 (Brandveilig gebruik grote brandcompartimenten) van het BBL stelt dat bij toepassing van NEN 6060 of NEN 6079 voor de bepaling van artikel 4.51 (Brandcompartiment: omvang), moet tijdens het gebruik van het bouwwerk rekening worden gehouden met de gebruiksvoorwaarden van de norm.

Artikel 6.17 (Behandeling constructieonderdeel) van het BBL stelt dat een constructieonderdeel waarvoor op grond van het BBL een eis aan de sterkte bij brand, brandvoortplanting, rookdichtheid, brandklasse of rookklasse geldt waaraan het constructieonderdeel alleen met een aanvullende behandeling kan blijven voldoen, op adequate wijze moet worden onderhouden.

3.2.4 Veilig vluchten

Artikel 4.66 (Vluchten naar de uitgang van een subbrandcompartiment) van het BBL stelt eisen aan de maximale lengte van een vluchtroute naar een aangelegen subbrandcompartiment.

Artikel 4.74 (Inrichting vluchtroute: weerstand tegen rookdoorgang) stelt eisen aan de weerstand tegen rookdoorgang tussen (extra) beschermde vluchtroute en besloten ruimte, bepaald volgend NEN 6075.

Artikel 6.20 (Ontruiming bij brand) stelt dat er voor bepaalde gebruiksfuncties voldoende personen aanwezig moeten zijn om de ontruiming bij brand voldoende snel te laten verlopen.

3.2.5 Brandweerinzet en blusvoorzieningen

Artikel 4.84 (Brandweerlift) van het BBL stelt eisen aan de bereikbaarheid van een brandweerlift via extra beschermde vluchtroutes.

Artikel 4.85 (Loopafstand) van het BBL stelt eisen aan de maximaal toelaatbare loopafstand vanuit een punt in het gebruiksgedebied naar toegang van een trappenhuis en brandweerlift.

Artikel 4.221 (Droge blusleiding) van het BBL stelt eisen aan de droge blusleiding. De algemene eis stelt dat een gebruiksfunctie met een vloer van een verblijfsgebied hoger dan 20m boven het meetniveau een droge blusleiding moet hebben. Ook worden er eisen gesteld aan de maximale loopafstand tussen een brandaansluiting van een droge blusleiding en een punt in het aangewezen verblijfsgebied. De te installeren droge blusleiding moet voldoen aan NEN 1594.

Artikel 4.228 (Brandweerlift) stelt dat een gebouw waarvan een vloer van een verblijfsgebied hoger ligt dan 20m boven het meetniveau een brandweerlift moet hebben.

3.2.6 Brandveiligheidsinstallaties

Artikel 4.208 (Brandmeldinstallatie) worden eisen gesteld aan het tijdig vaststellen van een brand, door eisen te stellen aan de brandmeldinstallatie. Eisen voor

brandmeldinstallaties zijn gerelateerd aan of een brandmeldinstallatie moet worden ontworpen met NEN 2535 en met een omvang van de bewaking en een doormelding zoals beschreven in bijlage 2 van het BBL. Dit is afhankelijk van onder meer, de gebruiksfunctie, het gebruiksoppervlak, de hoogte van de gebruiksfunctie en de karakteristieken van de vluchtroute. Daarnaast worden er uitzonderingen op de regel beschreven.

Artikel 4.209 (Melding en doormelding) beschrijft waar een melding en doormelding van een brandmeldinstallatie heen gaat.

Artikel 6.36. (Automatisch brandblusinstallatie en rookbeheersingsystemen) stelt eisen aan automatische brandblusinstallaties en rookbeheersingsystemen. De eis stelt dat een bij of krachtens de wet voorgeschreven automatische brandblusinstallatie en rookbeheersingsinstallatie voorzien moet zijn van een geldig inspectiecertificaat met geldigheidsduur van een jaar.

3.3 Voor houtbouw relevante normen

In deze paragraaf worden de normen die naar aanleiding van de eerdergenoemde prestatie-eisen als relevant beschouwd verder uitgediept. Belangrijk is om te benadrukken dat onderstaande normen de nieuwe generatie Eurocodes zijn (prEN-en normen) zoals bekend als final draft.

Door de snelle groei van bouwen met hout, zijn de relevante NEN-normen momenteel vooral gebaseerd op beton, metselwerk en staal. In de toekomst zullen deze moeten worden aangepast om deze ook toepasbaar te maken voor grootschalige houtbouw. Hieronder een overzicht van de huidige stand van zaken.

3.3.1 NEN-EN 1991-1-2:2021 (prEN in ontwikkeling)

“Eurocode 1; Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand”. Deze Eurocode geeft methoden voor het bepalen van belastingen op constructies bij brand. Deel 1-2 is van toepassing op gebouwen, met een vuurlast die overeenkomt met het gebouw en het gebruik ervan. Dit deel behandelt de thermische en mechanische belastingen op constructies die zijn blootgesteld aan brand. De bedoeling is dit deel te gebruiken samen met de delen voor ontwerp (en berekening) bij brand prEN 1992 tot en met prEN 1996 en prEN 1999, die methoden geven voor de berekening van de brandwerendheid van constructies. Dit deel 1-2 van EN 1991 bevat thermische belastingen samenhangend met zowel nominale als fysische thermische belastingen. Meer gegevens en modellen voor op de fysica gebaseerde thermische belastingen zijn gegeven in bijlagen.

Voor de toepassing van de beoordelingsmethode met fysische thermische belastingen (natuurlijke branden) is behoefte aan het kwantificeren van het voor Nederland vereiste veiligheidsniveau c.q. de betrouwbaarheid. Dit geldt zowel voor gebouwen met een onbrandbare bouwconstructie, als voor houten gebouwen.

Nationale bijlage: NEN-EN 1991-1-2+C3:2019/NB:2019. In deze nationale bijlage zijn de keuzes vastgelegd uit de in NEN-EN 1991-1-2+C1:2011 gegeven mogelijkheden en zijn de

voor Nederland geldende waarden voor de nationaal bepaalde parameters vastgelegd. Hiermee kan worden aangetoond dat een bouwwerk het niveau van constructieve veiligheid bereikt zoals vereist in de Nederlandse Bouwregelgeving.

3.3.2 NEN-EN 1995-1-2:2011

“Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies- Deel 1-2: Algemeen – Ontwerp en berekening van constructies bij brand”. Norm voor ontwerpen en berekenen van gebouwen en civieltechnische houtconstructies bij brand. De norm focust vooral op ontwerpmethodes en berekeningen om de brandwerendheid van constructie-onderdelen te garanderen.

De norm uit 2011 is de actuele norm. Echter wordt momenteel geschreven aan een nieuwe versie van de norm, waar onder andere methoden voor het berekenen van CLT-elementen zal worden beschreven. Een officiële draftversie van het document is nog niet beschikbaar.

In een informatieve annex wordt een ontwerpmethode voor compartimentsbranden gegeven. Zoals verder besproken in 5.1.2, is de methode niet compleet en houdt geen rekening met een verhoogde vuurlast in door de betrokkenheid van een brandbare constructie.

3.3.3 NEN 6068:2020

“Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten”. Norm voor bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten. Met de NEN 6068 kan de warmtestraling op de gevel van een ander brandcompartiment worden bepaald. Dit betreft zowel compartimenten in het beschouwde gebouw, als compartimenten in naastgelegen gebouwen. Met het resultaat van de berekening kunnen aanvullende eisen worden gesteld aan gevels, daken en gevelopeningen. De norm kan worden gebruikt voor zowel nieuwbouw als bestaande bouw, en kan worden bepaald ongeacht het traject dat de brand moet afleggen. De norm focust vooral op brandoverslag. Voor branddoorslag berekeningen wordt verwezen naar NEN 6096 en NEN-EN 1995-1-2.

Er worden voorwaarden gegeven voor het gebruik van deze norm. Een belangrijke voorwaarde is dat gevels en dak niet in belangrijke mate mogen bijdragen aan de voortplanting van de brand, met gestelde eisen voor de brandklasse van gevel en dak materiaal. Daarnaast mag een dak niet brandgevaarlijk zijn, zoals kan worden bepaald volgens NEN 6063.

Annex A beschrijft een methode voor het modelleren van een brand in een ruimte. In dit model wordt de hoeveelheid brandbaar materiaal uitgedrukt als referentievuurbelasting in kg vurenhout per m², ingevoerd op basis van de eis uit de bouwregelgeving (meestal 20, 30 of 60 kg vurenhout/m²). De gemodelleerde brand wordt gebruikt om de brandoverslag verder te berekenen.

Hierbij moet worden vermeld dat de referentievuurbelasting in de bepalingmethode is afgestemd op gebouwen met een onbrandbare bouwconstructie, en de bepaling dus niet is toegesneden op gebouwen met een houten constructie.

3.3.4 NEN 6069+A1+C1:2019

“Bepaling en klassering van de brandwerendheid van bouwdelen en bouwproducten”. “Deze norm implementeert Europese normen voor beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouwdelen in Nederland. De norm regelt de aansluiting tussen het Bouwbesluit en de Europese normen voor die producten waarvoor het Bouwbesluit 2012 voor de bepaling van de brandwerendheid NEN 6069 direct of indirect (via NEN 6068+C1) aanwijst. Hierbij is voorzien in een tijdelijk duaal stelsel. Tot een nader vast te stellen moment kan voor de bouwregelgeving de brandwerendheid worden bepaald met zowel de bestaande Nederlandse beproevingsmethoden als met de Europese beproevingsmethoden. Hierbij hoeft slechts aan een van beide beproevingsmethoden te worden voldaan. In Europa heeft men dit traject afgesproken om zowel de nationale regelgevers als de industrie in staat te stellen zich in te stellen op gebruik van de Europese brandwerendheidsklassering en –beproevingsmethoden.”

Benadrukt dient te worden dat op dit moment een nieuwe versie van de NEN 6069 wordt geschreven. Deze wordt eind augustus 2022 gepubliceerd.

Voor de bepaling wordt gebruik gemaakt van standaard brandkrommen. Dit betekent dat bij de beproeving van de producten geen rekening wordt gehouden met het effect van de energiebijdrage van brandende elementen aan de brand zelf.

3.3.5 NEN 6075:2020

“Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten”. In deze norm is een methode beschreven voor het bepalen van de weerstand tegen rookdoorgang (WRD) tussen ruimten. De norm beschrijft twee methoden. In de eerste methode is de WRD uitgedrukt in minuten, waarbij de WRD is bepaald op basis van de brandwerendheid van de scheidende functie op het criterium vlamdichtheid van constructieonderdelen. In de tweede methode wordt de rookwerendheid bepaald op basis van de lekkage door constructieonderdelen, of een combinatie van lekkage en brandwerendheid van constructieonderdelen. Deze lekkage is uitgedrukt in klassen Ra en R200.”

3.3.6 NEN 6090:2017

“Bepaling van de vuurbelasting”. NEN 6090 geeft de methode voor de bepaling van de vuurbelasting. Deze norm is bedoeld te worden toegepast op de bepaling van zowel de permanente als de variabele vuurbelasting van en in bouwwerken. Hierbij wordt de bepaling van de permanente vuurbelasting beschreven in paragraaf 4.2. Hiervoor is onder andere de netto-verbrandingswaarde nodig. Deze kan worden bepaald met NEN-EN 1716, of bepaald door middel van het overzicht gegeven in appendix C. Appendix B geeft een overzicht van kengetallen voor het bepalen van de permanente vuurlast.

De variabele vuurbelasting wordt berekend door de vuurbelasting, bepaald volgens paragraaf 4.1, te verminderen met de permanente vuurbelasting, bepaald volgens 4.2. Daarnaast wordt verwezen naar andere documenten waar variabele vuurbelasting kan worden bepaald: NEN 6060, NEN-EN 1991-1-2 en Natural Fire Safety Concept. Zie ook paragraaf 3.2.1. voor de relatie tussen vuurbelasting en constructieve brandwerendheid.

3.3.7 NEN-EN 13501-1:2019

“Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen. Deel 1: Classificatie op grond van resultaten van beproeving van het brandgedrag.” In deze norm is de methode beschreven voor het classificeren van het brandgedrag van constructieonderdelen aan de hand van beproeving. Het document beschrijft criteria waar de getoetste onderdelen aan moeten voldoen om tot een bepaalde classificering te behoren. De methode van beproeving zelf wordt niet beschreven, echter slechts gerefereerd naar een aantal methoden, afhankelijk van het doel van de test:

EN ISO 1182: Bepaling van het brandgedrag van bouwproducten – Beproeving van de onbrandbaarheid

EN ISO 1716: Bepaling van het brandgedrag van bouwproducten – Bepaling van de verbrandingswarmte

EN 13823: Bepaling van het brandgedrag van bouwproducten – Bouwproducten, met uitzondering van vloerafwerkingen, blootgesteld aan een thermische aanval met een brandend voorwerp

EN ISO 11925-2: Brandgedragproeven – Ontvlambaarheid van bouwproducten bij directe blootstelling aan vlammen – Deel 2: Beproeving met vlammen uit één bron

EN ISO 9239-1: Bepaling van de bijdrage tot de brandvoortplanting van vloerbedekkingen – Deel 1: Bepaling van het brandgedrag met een warmtestralingsbron

3.3.8 NEN-EN 13501-2:2021

“Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen. Deel 2: Classificatie op grond van resultaten van brandwerendheidsproeven, behalve voor ventilatiesystemen”.

3.3.9 NEN-EN 1991-1-7+C1+A1:2015

“Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen”. De norm beschrijft methoden en regels voor het beschermen van gebouwen en andere civieltechnische werken tegen bekende en onbekende buitengewone belastingen. De norm beschrijft methoden gebaseerd op bekende buitengewone belastingen en beperken van de mate van lokaal bezwijken. In de methode wordt echter niet ingegaan op het bepalen van een buitengewone belasting door brand. Dit wordt beschreven in NEN-EN 1991-1-2 (icm. NEN-EN 1990).

In de bijlagen worden verdere informatie en methoden gegeven voor het ontwerp voor de gevolgen van lokaal bezwijken van gebouwen door onbekende oorzaak, risicoanalyse, dynamische berekening voor stootbelasting.

3.4 Hoogbouwrichtlijn

De handreiking Brandveiligheid in hoge gebouwen van SBRCURnet uit 2014 (‘hoogbouwrichtlijn’) geldt in Nederland als toetsingskader voor gebouwen hoger dan 70

meter en maximaal 200 meter hoogte. De handreiking is tot stand gekomen in samenwerking tussen marktpartijen, bevoegd gezag en Brandweer Nederland en biedt handvatten om een optimale brandveiligheid in hoge gebouwen te realiseren. In de handreiking is de risicobenadering als uitgangspunt gehanteerd.

3.4.1 Ontruimingsconcepten

Een belangrijk punt waarin een hoogbouwsituatie verschilt van de referentiesituatie volgens de publiekrechtelijke regelgeving, is de langere tijd die nodig is om in de hoogbouwsituatie te ontruimen.

Binnen deze handreiking worden vier verschillende ontruimingsconcepten onderscheiden:

A. volledige ontruiming met standaard ontruimingstijd;

Dit concept gaat uit van snelle volledige ontruiming van het gebouw. Uitgangspunt is dat het gebouw binnen 30 minuten na het ontstaan van brand volledig is ontruimd.

B. volledige ontruiming met verlengde ontruimingstijd;

Bij ontruimingsconcept B wordt ervan uitgegaan dat het gehele gebouw is ontruimd na 60 minuten.

C. gefaseerde ontruiming (met verlengde ontruimingstijd);

Ontruimingsconcept C (gefaseerde ontruiming) is een geavanceerde variant van ontruimingsconcept B. Hierin wordt eerst de bedreigde zone (calamiteitenzone) ontruimd.

D. gedeeltelijke ontruiming (calamiteitenzone ontruimen naar een veilige verdieping met voldoende opvangcapaciteit).

Ontruimingsconcept D (gedeeltelijke ontruiming) gaat ervan uit dat niet het gehele gebouw wordt ontruimd, maar alleen de bedreigde zone (calamiteitenzone).

Ten behoeve van een spoedige detectie en ontruiming worden een brandmeldinstallatie en ontruimingsinstallatie voor alle concepten voorgeschreven.

3.4.2 Sterkte bij brand

De algemene eis voor brandwerendheid met betrekking tot bezwijken van de bouwconstructie bedraagt 120 minuten. Hoogbouwconstructies behoren tot gevolgklasse 3 welke bestand dienen te zijn tegen elk voorzienbaar risico, conform NEN-EN 1990. Vanwege de grotere gebruiksoppervlakte die op de bouwconstructie is aangewezen, het grotere aantal personen dat aanwezig is en de langere ontruimingstijden die daaruit volgen moet het bezwijkrisico verkleind worden. Een automatische blusinstallatie is zeer efficiënt in het reduceren van de thermische belasting op constructies, waardoor tevens het bezwijkrisico ervan afneemt. Om die reden is een automatische blusinstallatie in hoogbouw *a priori* noodzakelijk verondersteld in de hoogbouwrichtlijn. Tevens dienen de bouwconstructie, brandscheidende voorzieningen, vluchtroutes en aanvalsroutes met een hoge mate van betrouwbaarheid te worden uitgevoerd.

Voor de constructieve eisen bij brand in hoge gebouwen kan gebruik gemaakt worden van de NEN-NTA 4614-deel 3. Convenant Hoogbouw – Deel constructieve veiligheid.

3.4.3 Aandachtspunt voor houtbouw

Wanneer er sprake is van houtbouw, bestaat de kans dat de ontruimingstijd toeneemt. Ook kan de brandduur en thermische belasting toenemen waardoor de kans op bezwijken toeneemt. Daarnaast beïnvloedt het brandgedrag van hout de mogelijkheden voor een binneninzet van de brandweer. Nader onderzoek, mogelijk leidend tot aanpassingen/aanvullingen aan de richtlijn en aan de NEN-NTA 4616 series zijn geadviseerd zodat de richtlijn ook toepasbaar is voor houten hoogbouw projecten.

3.5 Achtergronden en uitgangspunten

Bij het samenstellen van de achtergronden en uitgangspunten is naast de informatie beschikbaar in de toelichting bij de verschillende versies van het Bouwbesluit en bij het Besluit Bouwwerken Leefomgeving mede gebruik gemaakt van Noorman (1987) waarin de basis van het Bouwbesluit en Besluit Bouwwerken Leefomgeving is beschreven (NEN 3581) en van Straalen et al (2007) waarin de historie van het Bouwbesluit 2003 op een systematische wijze is vastgelegd.

De algemene uitgangspunten van de regelgeving zijn:

- Binnen 15 minuten na ontstaan van een brand moet deze zijn ontdekt, de door de brand bedreigde personen en de brandweer moeten zijn gealarmeerd.
- Binnen 15 minuten na die alarmering moeten de door brand bedreigde personen zonder hulp van de brandweer kunnen vluchten.
- De brandweer is aanwezig en operationeel binnen 15 minuten na het melden van de brand.
- De brandweer moet de brand binnen 60 minuten na ontstaan onder controle hebben, hetgeen inhoudt dat voorkomen wordt dat de brand verder uitbreidt. Op dat moment moeten de laatste door de brand bedreigde personen met behulp van de brandweer zijn gered.

3.5.1 Constructieve veiligheid bij brand

In paragraaf 4.2.2 van Besluit Bouwwerken leefomgeving zijn voor nieuwbouw de eisen voor constructieve veiligheid bij brand gesteld.

De eisen zijn daarbij uitgedrukt in de tijdsduur in minuten waarbij bezwijken van een bouwconstructie optreedt. Deze tijdsduur is gebaseerd op de brandwerendheidseis van 60 minuten onder gestandaardiseerde omstandigheden en is mogelijk gerelateerd aan een vuurbelasting van 60 kg vurenhout per vierkante meter zoals aangegeven in het basisboek voor brandveiligheid van het IFV (2022). Deze eis is gebaseerd op het volgende verloop van het brandscenario (Ministerie van Binnenlandse Zaken, 1994) (naast deze uitgave voor woningen en woongebouwen, zijn er in deze reeks ook nog uitgaven voor andere gebouwen met een overeenkomend brandverloop):

- De brand ontstaat (minuut 0)
- De brand is ontdekt (minuut 13)

- De brandweer is geïnformeerd (minuut 15)
- De brandweer is ter plaatse (minuut 23)
- De brandweer is operationeel (minuut 30)
- De brandweer heeft de brand onder controle (minuut 60)

De tijdsduur die volgt uit dit brandscenario is dus niet een-op-een gerelateerd aan de daadwerkelijke ontwikkeling van de brand in de tijd. Het is een rekengrootheid waarvan we op basis van de jarenlange ervaring vertrouwen hebben dat deze bruikbaar is voor de beoordeling van de constructieve veiligheid bij brand als ook bij de beperking van de branduitbreiding (paragraaf 2.5). De eisen van 90 en 120 minuten brandwerendheid moeten binnen deze context gezien worden als zwaardere eisen voor situaties waarin een hogere veiligheid vereist is, zonder dat deze ook daadwerkelijk een fysische betekenis hebben in de tijdsduur van een brand. Daarnaast is de lagere eis van 30 minuten (en 20 minuten voor bestaande bouw) ook een eis uitgedrukt in de rekengrootheid brandwerendheid die overigens niet in lijn is met bovengenoemde brandscenario.

De eisen met betrekking tot sterkte bij brand hebben tot doel om gebruikers van een gebouw de gelegenheid te geven zich na het uitbreken van brand tijdig naar buiten te begeven (Stb. 1991, 680) en voor de brandweer om veilig zijn werkzaamheden te kunnen uitvoeren. Bij de invoering van het Bouwbesluit in 1992 (fase 1) zijn de traditionele voorschriften opgenomen ten aanzien van de tijdsduur bij bezwijken van de bouwconstructie en de hoofddraagconstructie. Nog in fase 1 werden de wijzingen aangaande de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken en de grenswaarde met betrekking tot de permanente vuurlast (500 in plaats van 100 MJ/m²) van kracht (Stb. 1997, 34) die in het Besluit Bouwwerken Leefomgeving in Tabel 4.17a en artikel 4.17 lid 3 zijn opgenomen. Deze aanpassing was noodzakelijk omdat in de regelgeving voor het Bouwbesluit 1992 uitgangspunt was dat kozijnen, ramen en deuren niet meegenomen waren in de permanente vuurlast, terwijl na invoering van het Bouwbesluit 1992 ook NEN 6090 werd aangewezen die wel rekening houdt met deze extra vuurlast. Omdat uitgangspunt was dat de invoering van het Bouwbesluit 1992 beleidsneutraal zou zijn, is deze aanpassing in een later stadium doorgevoerd. Met ingang van 1 april 2012 werd niet langer over een hoofddraagconstructie gesproken, maar over een bouwconstructie die bezwijkt bij brand in een brandcompartiment waarin die bouwconstructie niet ligt (Stb. 2011, 416). Dit omdat de term hoofddraagconstructie uit NEN 6702 bij de invoering van de Eurocodes niet langer werd gebruikt. De motivatie bij de leden van artikel 4.17 (tijdsduur niet-bezwijken) is:

- 1.1 Lid 1, lid 2, lid 4 en lid 5: Voor een vloer, een trap en hellingbaan gelden alleen eisen ten aanzien van de tijdsduur van bezwijken als er een vluchtroute overheen loopt, of wanneer het een bouwconstructie betreft die bezwijkt bij brand in een brandcompartiment waarin de bouwconstructie niet ligt. Hiermee wordt gewaarborgd dat de gebruikers van het bouwwerk voldoende gelegenheid hebben om zich na het uitbreken van brand tijdig naar buiten te begeven. Ook krijgt de brandweer tijd om het bouwwerk te doorzoeken op eventueel daarin achtergebleven personen. De eisen zijn strenger naarmate de hoogte van de vloer ten opzichte van het meetniveau toeneemt. Het extra hoogtecriterium van 7 meter bij woonfuncties is gekozen om minder veilige situaties voor de brandweer te voorkomen. Achtergronden zijn te vinden in Scholten N.P.M., *Verzwarende eisen brandveiligheid woningbouw*, TNO rapport 2004-BPI- R008.

- 1.2 Lid 5: De eisen zijn strenger voor gebouwen waarin wordt overnacht.
- 1.3 Lid 3 en lid 6: De verhoging van de grenswaarde van 100 MJ/m² naar 500 MJ/m² is ontleend aan Scholten, N.P.M., *Bouwbesluit; permanente vuurbelasting*, TNO Bouw rapportnr. 94-BKR-R1448.
- 1.4 Lid 8: Voor bouwwerken geen gebouw zijnde geldt een functionele eis in plaats van een prestatie-eis. De reden is dat de aard van dergelijke bouwwerken sterk uiteenloopt, van bruggen tot tribunes en van zendmasten tot verdeelkasten voor de kabeltelevisie. De met het oog op het doel van de bepaling passende tijdsduur van de brandwerendheid met betrekking tot bezwijken zal dan ook sterk verschillen. Burgemeester en wethouders moeten de functionele eis voor het individuele geval kwantificeren.

Voor het bepalen van het bezwijken van een bouwconstructie wordt in artikel 4.18 (bepalingsmethode niet-bezwijken) verwezen naar de Eurocode. Voor de aan te houden belastingen betreft dit de buitengewone belastingen zoals omschreven in NEN-EN 1990, NEN-EN 1991-1-2 en voor houtconstructies betreft dit NEN-EN 1995-1-2 (rekentechnisch) en NEN 6069 (testen). Opgemerkt wordt dat er bij de publicatie van de huidige versie van de Eurocodes die door CEN zijn gepubliceerd in het eerste decennium van 2000, geen algemeen toegankelijke achtergronden zijn gepubliceerd. Achtergronden van de Nederlandse Nationale Bijlage zijn terug te vinden in Vrouwenfelder et al (2012).

Opgemerkt wordt dat in artikel 6.17 van het Besluit bouwwerken leefomgeving de eis is gesteld dat een aanvullende maatregel waarbij een constructieonderdeel alleen in de loop van de tijd kan voldoen aan de sterkte bij brand, of ook de brandvoortplanting, rookdichtheid, brandklasse en rookklasse, deze op adequate wijze onderhouden moet worden. Deze eis is toegevoegd om ervoor te zorgen dat een gebouweigenaar bewust onderhoudt pleegt om brandveiligheidsmaatregelen ook in de loop van de tijd op orde te houden. In het Bouwbesluit 2012 (Stb. 2011, 416) is een vergelijkbare eis gesteld met betrekking tot de brandwerendheid van doorvoeren.

3.5.2 Beperken branduitbreiding

In paragraaf 4.2.8 van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving zijn voor nieuwbouw de eisen voor beperking van uitbreiding van brand gesteld en in paragraaf 4.2.9 zijn voor nieuwbouw de eisen voor verdere beperking van uitbreiding van brand en beperking van rook gesteld.

3.5.2.1 Beperking van uitbreiding van brand

De gangbare eisen aangaande beperking van uitbreiding van brand zijn destijds opgenomen in het Bouwbesluit 1992 (Stb 1991, 680). Voor tot bewoning bestemde gebouwen, kantoor- en logiesgebouwen zijn indertijd prestatie-eisen geformuleerd en voor de overige gebruiksfuncties zijn indertijd alleen de functionele eisen geformuleerd. In 1998 (Stb. 1998, 618) zijn de functionele eisen voor de overige gebruiksfuncties, grotendeels als prestatie-eisen geformuleerd. Vervolgens zijn in Bouwbesluit 2003 (Stb. 2001, 410) voor alle gebruiksfuncties prestatie-eisen opgenomen. De

brandveiligheidseisen voor celfuncties zijn daarbij mede gebaseerd op de Regeling politiecellencomplex (Stcrt. 1998, 250 en Brandbeveiligingsconcept Cellen en cellingebouwen, Min BiZa, 1994). In Bouwbesluit 2012 (Stb. 2011, 416) en Besluit Bouwwerken Leefomgeving (Stb. 2018, 291) zijn de eisen overeenkomend.

Aangaande de achtergronden van de aangehouden eisen voor de brandwerendheid, zie paragraaf 3.2.1.

Artikelen 4.50, 4.51 en 4.52 van paragraaf 4.2.8 van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving gaan nader in op respectievelijk de ligging van het brandcompartiment, de omvang en een eventueel opvangcompartiment. In voorliggend rapport zijn geen verdere achtergronden gegeven, omdat verondersteld is dat in geval van houtbouw voor artikelen geen nadere overwegingen noodzakelijk zijn. Aangaande de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (artikel 4.53) is dit wel het geval. De motivatie bij de leden van artikel 4.53 is:

- Lid 1: Een algemene doelstelling is een brand binnen 60 minuten na het ontstaan onder controle te krijgen.
- Lid 2: Verlaging naar 30 minuten voor de situatie tussen een brandcompartiment en een besloten ruimte waardoor een extra beschermde vluchtroute voert is mogelijk vanwege het uitgangspunt dat na 30 minuten er niet langer gebruik wordt gemaakt van deze vluchtroute.
- Lid 3a en lid 7: Voor woningen met een betrekkelijk lage vuurbelasting (steenachtig materiaal) kan met een lagere tijdsduur (30 min.) worden volstaan (Scholten, N.P.M., *Bouwbesluit; permanente vuurbelasting*, TNO Bouw rapportnr. 94-BKR-R1448).
- Lid 3b en lid 7: Voor niet al te hoge vloeren (algemeen 5 m, woningen 7 m) kan volstaan worden met een lagere eis (30 min).
- Lid 4a, lid 5, lid 6 en lid 7: De motivatie van de bijkomende voorwaarde (op hetzelfde perceel liggen), is niet bekend. De betekenis van de eis is ook onduidelijk.
- Lid 4b, lid 5, lid 6 en lid 7: Voor niet al te hoge vloeren (algemeen 5 m, woningen 7 m) kan volstaan worden met een lagere eis (30 min).
- Lid 8, lid 9 en lid 10: Stelt de eis voor de weerstand voor de brandoverslag. Lid 8 is ook bedoeld voor woonwagens, echter die staan in het algemeen niet op een eigen perceel. Daarom is hier een afstand van 5 m voorgeschreven.

Artikel 4.54 stuurt de bijbehorende bepalingsmethode volgens NEN 6068 aan. De motivatie bij de leden is:

- Lid 1: Verwijzing naar de bepalingsmethode volgens NEN 6068.
- Lid 2, lid 3 en lid 4: Doel is gelijke rechten (en eisen) voor iedere burger met betrekking tot brandoverslag. Dit wordt bereikt door de aanwezigheid te veronderstellen van een denkbeeldig identiek gebouw, dat gespiegeld is ten opzichte van de perceelsgrens.

In artikel 6.16 van het Besluit bouwwerken leefomgeving is voor de toepassing van brandcompartimenten met een grotere omvang dan aangegeven in artikel 4.51 de mogelijkheid geboden om gebruik te maken van de bepalingsmethodes van NEN 6060 en NEN 6079. Met beide normen is al langere tijd ervaring opgedaan in de praktijk en de wetgever heeft bij de invoering van het Besluit bouwwerken leefomgeving besloten om naar deze normen te verwijzen.

3.5.2.2 Achtergronden NEN 6068

In het voorwoord van NEN 6068 (uitgave september 2020) is aangaande de achtergrond beschreven:

De bepalingsmethode in NEN 6068 is zo opgezet dat de weerstand tegen uitbreiding van een brand tussen ruimten, uitgedrukt in weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag, kan worden bepaald ongeacht het traject dat de brand moet afleggen tussen die ruimten. Dit geldt ook voor ruimten gelegen in afzonderlijke gebouwen. Hiermee wordt het mogelijk om bij het stellen van eisen af te zien van eisen aan individuele bouwdelen die in het branduitbreidingstraject tussen ruimten zijn gelegen.

De methode in NEN 6068 voor het bepalen van de weerstand tegen brandoverslag is afgestemd op het gewenste veiligheidsniveau voor nieuwbouw en bestaande bouw. Het vlammodel in NEN 6068 (gebaseerd op Law, 1978) is specifiek toegespitst op de daarbij behorende praktijksituatie voor brandoverslag, daarom is dit model niet direct geschikt voor andere toepassingen dan de bepaling van de weerstand tegen brandoverslag. Voor andere toepassingen (zoals bijv. de opwarming van externe constructiedelen bij brand of het in detail bepalen van warmtestralingsfluxen voor andere doeleinden dan brandoverslag) wordt verwezen naar de onderliggende modellen van de in deze norm beschreven rekenmethode, zoals verwoord in de publicatie die is opgenomen in de bibliografie.

Deze bibliografie omvat de volgende referenties waarin de nodige achtergronden van de bepalingsmethode van NEN 6068 zijn beschreven:

- Law, M. en O'Brien, T., *Fire safety of bare external structural steel*, Constrade, mei 1981
- *Herziening van de ontwerpnorm NEN 6068*, B92-413, TNO Bouw, maart 1992
- *Bepalingsmethode voor de brandoverslag via gevels*, IBBC B88-773 TNO, december 1988
- Oerle, N.J. van, *Achtergronden bij de aanpassing van NEN 6068*, C260-3, Peutz, 2003
- Oerle, N.L. van, *Aanpassingen NEN 6068*, CD-260-3-NO, Peutz 2017

Opgemerkt wordt dat in de voorwoorden van de achtereenvolgende versies van NEN 6068 (1991, 2001, 2004, 2008, 2016 en 2020) nadere toelichtingen worden gegeven over aanpassingen die zijn doorgevoerd in betreffende versie. Het fysisch model van Law (1978) is namelijk in NEN 6068:1991 aangepast, zodat de uitkomsten van berekeningen passen bij de bestaande bouwpraktijk voor het verhinderen van brandoverslag zoals dat voor 1992 acceptabel werd geacht (beleidsneutraal, gelijkblijvend veiligheidsniveau).

3.5.2.3 Verdere beperking van uitbreiding van brand en beperking van rook

Artikel 4.57 van paragraaf 4.2.9 van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving gaat in op de ligging van het subbrandcompartiment. Artikelen 4.58 en 4.59 van paragraaf 4.2.9 van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving gaan nader in op respectievelijk de ligging van

het beschermde subbrandcompartiment en de omvang. In voorliggend rapport zijn geen verdere achtergronden gegeven, omdat verondersteld is dat er voor houtbouw deze voor artikelen geen nadere overwegingen noodzakelijk zijn. Aangaande de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (artikel 4.60) is dit wel het geval. De motivatie van artikel 4.60 is terug te vinden in Calis, P.-W. van, Coppens, G., Achtergronden bij de voorschriften voor ontvluchting, PRC-rapport PRC-Wo450.01.18, 2009 (blz. 7). De hoogte van de eis, 20 of 30 minuten WBDBO bij nieuwbouw, is afhankelijk van het type gebruiksfunctie. De eis van 30 minuten WBDBO geldt voor die subbrandcompartimenten waarvoor deze eis in het Bouwbesluit 2003 (afdeling 2.14) ook aan subbrandcompartimenten werd gesteld. De eis van 20 minuten WBDBO komt in de plaats van de 30 minuten weerstand tegen rookdoorgang die in het Bouwbesluit 2003 aan rookcompartimenten werd gesteld. Ondanks dat in het Besluit bouwwerken leefomgeving is overgestapt op de Europese benadering van rookwerkendheid (Ra en R200), is de eis van 20 minuten WBDBO voor rookdoorgang in lid 2 van artikel 4.60 van het Besluit bouwwerken leefomgeving blijven staan.

De eis aangaande de weerstand tegen rookdoorgang is nader omschreven in artikel 4.61 voor een subbrandcompartiment en in artikel 4.62 voor een beschermd subbrandcompartiment. Bij de eis zijn twee niveaus onderscheiden: Ra en R200. Deze zijn bepaald volgens NEN 6075. In de Toelichting van deze artikelen van het Besluit bouwwerken leefomgeving blijkt dat de Europese rookwerendheidsklassen zijn overgenomen in lijn met het Advies van de normcommissie NEN 6075 Aansturing rookdoorgangscriteria over Sa/S200 dd. 11 mei 2014. In het Bouwbesluit 2012 is voor de weerstand tegen rookdoorgang de volgende gedachtegang gevolgd. De weerstand tegen rookdoorgang is de brandwerendheid in minuten, volgens het E-criterium maal anderhalf: $WRD = WBD \times 1,5$. Deze aanpak dekt echter niet de lading omdat koude rook wordt genegeerd. Vandaar dat deze bepalingsmethode van de rookwerendheid in het Besluit bouwwerken leefomgeving alleen voor bestaande bouw bruikbaar blijft. Voor nieuwbouw is de aanpak volgens NEN 6075 gevolgd.

3.5.2.4 Achtergronden NEN 6075

De rookwerendheid van een bouwdeel wordt niet meer uitgedrukt in minuten maar in rookklassen op basis van m^3 /uur lekverlies van een scheidingsconstructie. Bepalend is de mate waarin een constructieonderdeel rook doorlaat onder normale omstandigheden. Er worden twee klassen gedefinieerd: Ra is de rookdoorlatendheid bij 20°C (a = ambient temperature = omgevingstemperatuur) en R200 is de rookdoorlatendheid bij 200°C én bij 20°C. Deze worden middels testen bepaald op basis van de lekkage door de constructieonderdelen (voor Ra en R200), of op basis van een combinatie van de lekkage door de constructieonderdelen en de brandwerendheid van de constructieonderdelen (voor R200).

3.5.2.5 Vluchten

Bij het tot stand komen van het Bouwbesluit 2012 (Stb. 2011, 416) is een geredigeerde aanpak gevolgd bij de voorschriften voor ontvluchting (Calis, P.-W. van, Coppens, G., Achtergronden bij de voorschriften voor ontvluchting, PRC-rapport PRC-Wo450.01.18,

2009). Dit heeft geleid tot Afdeling 2.12 Vluchtroutes van het Bouwbesluit 2012, die is overgenomen in paragraaf 4.2.10 Vluchtroutes: verloop van Besluit bouwwerken leefomgeving (Stb. 2018, 291).

De motivatie van de aangehouden gecorrigeerde loopafstanden die voor bijna alle gebruiksfuncties op maximaal 30 m, hangt volgens de Artikelsgewijze toelichting van het Besluit bouwwerken leefomgeving samen met het uitgangspunt dat mensen 30 seconden met ingehouden adem een snelheid van 1 m/s door een ruimte met rook kunnen lopen.

Het Besluit bouwwerken leefomgeving stelt in artikel 6.20 een eis aan de hulpverlening bij brand. De Arbeidsomstandighedenwet regelt de hulpverlening bij brand voor werknemers en andere personen die in verband met arbeid aanwezig zijn. In het verleden riep dit discussies op over hulpverlening aan personen in een gebouw die niet in verband met arbeid aanwezig zijn in een gebouw. Om hieraan wel invulling te geven is artikel 7.11a aan het Bouwbesluit toegevoegd (Stb. 2015, 249). Daarin is een functionele eis toegevoegd die de hulpverlening bij brand regelt voor het evacueren van bijvoorbeeld cliënten in een zorginstelling, gedetineerden en bezoekers aan een discotheek. Invulling van deze functionele eis wordt overgelaten aan de eigenaar of gebruiker van het bouwwerk. Nadere achtergronden zijn terug te vinden in de Nota van toelichting van artikel 6.20 van het Besluit Bouwwerken Leefomgeving (Stb. 2018, 291).

3.5.3 Brandweerinzet en blusvoorzieningen

3.5.3.1 Brandweerlift

Doel van een brandweerlift is om de brandweer in staat te stellen langs een veilige weg een hoger gelegen verdieping te bereiken. In Bouwbesluit 1992 (Stb 1991, 680) zijn voor tot bewoning bestemde gebouwen en kantoren en logiesgebouwen prestatie-eisen opgenomen met betrekking tot het voorkomen van ongevallen bij brand. Voor de overige gebruiksfuncties geldt een functionele eis. In 1998 (Stb. 1998, 619) en (Stb. 1998, 618) zijn de eisen met geringe wijzigingen overgenomen. In Bouwbesluit 2003 (Stb. 2001, 4) zijn voor alle gebruiksfuncties prestatie-eisen opgenomen. In Bouwbesluit 2012 (Stb. 2011, 416) is daartoe de nadere eis gesteld dat voor elke verdieping vanaf de lifttoegang van een brandweerlift de boven gelegen verdieping te bereiken is via een extra beschermde vluchtroute (Bouwbesluit 2012 artikel 2.120, Besluit bouwwerken leefomgeving artikel 4.84). Tot ca. 20 m kan de brandweer, in verband met de verplichte aanwezigheid van trappen en vluchtwegen, het gebouw voldoende snel doorzoeken en materiaal aanvoeren zonder dat een brandweerlift aanwezig is. Daarboven is een (brandweer)lift noodzakelijk (Bouwbesluit 2012 artikel 6.39 en Besluit bouwwerken leefomgeving artikel 4.228).

3.5.3.2 Loopafstand

Voor de loopafstanden die aangehouden in verband met doorzoeken van een gebouw door de brandweer en het aanleveren van materialen, is de historische ontwikkeling in het Bouwbesluit gerelateerd aan die voor de brandweerlift. Doel is te voorkomen dat de brandweer te grote afstanden moet overbruggen om met geredde mensen een veilige plek

te kunnen bereiken of met het gangbare materieel een beginnende brand te kunnen blussen. De in Bouwbesluit 1992 en Bouwbesluit 2003 gegeven loopafstanden zijn bij de invoering van Bouwbesluit 2012 (Stb 2011, 416) vereenvoudigd tot 75 m tussen een punt in een gebruiksgebied en een trappenhuis en 120 m indien er een brandweerlift is. Een nader motivatie van deze afstanden is niet gegeven in de artikelsgewijze toelichting van Bouwbesluit 2012 (Stb 2011, 416) en Besluit bouwwerken leefomgeving (Stb. 2018, 291), maar verondersteld mag worden dat deze maximale afstanden door de brandweer als acceptabel worden geacht. In het Besluit bouwwerken leefomgeving zijn deze eisen terug te vinden in artikel 4.85.

3.5.3.3 Droge blusleiding

Een droge blusleiding is voorgeschreven voor gebouwen waarvan de vloer hoger ligt dan 20 m boven meetniveau. Deze grenswaarde komt overeen met die voor een brandweerlift. In Bouwbesluit 1992 (Stb. 1991, 680) zijn voor tot bewoning bestemde gebouwen en kantoren en logiesgebouwen prestatie-eisen opgenomen met betrekking tot droge blusleidingen. Voor de overige gebruiksfuncties geldt een functionele eis. In Bouwbesluit 2003 (Stb. 1998, 618) zijn de eisen voor droge blusleidingen voor alle gebruiksfuncties gesteld. In het Bouwbesluit 2012 (Stb 2011, 416) zijn deze eisen ongewijzigd overgenomen evenals dat dat het geval is in het Besluit bouwwerken leefomgeving (artikel 4.221 van Stb. 2018, 291).

3.5.3.4 Bluswatervoorziening

Alleen in geval van een wegtunnelbuis stelt het Besluit bouwwerken leefomgeving eisen aan de bluswatervoorziening bedoeld voor het aansluiten van een droge blusleiding. Voor de overige gebruiksfuncties zijn deze eisen verhuist naar het tijdelijk deel van het omgevingsplan van de gemeente (dit heet ook wel de 'bruidsschat'). Dit in tegenstelling tot het Bouwbesluit 2012 (artikel 6.30 van Stb. 2011, 416) die tevens eist dat een bouwwerk een toereikende bluswatervoorziening heeft, waarbij de afstand tot een brandweeringang ten hoogste 40 m is. Deze eisen hadden hun grondslag in het Besluit brandveilig gebruik bouwwerken (Gebruiksbesluit, Stb. 2008, 327)

3.5.4 Brandveiligheidsinstallaties

Het Besluit bouwwerken leefomgeving geeft in artikel 4.208 aan voor welke gebruiksfuncties een bepaald type brandmeldinstallatie noodzakelijk is en in artikel 4.209 wanneer doormelding vereist is. Deze eisen zijn overgenomen uit het Bouwbesluit (Stb. 2011, 416) die zijn grondslag had in het Besluit brandveilig gebruik bouwwerken (Gebruiksbesluit, Stb. 2008, 327)

Artikel 6.36 van het Besluit bouwwerken geeft uitsluitend aan dat in geval in het kader van gelijkwaardigheid een automatische brandblusinstallatie of een rookbeheersingssysteem is toegepast, deze voorzien is van een geldig inspectiecertificaat dat is afgegeven op grond van het CCV-inspectieschema. Deze eis in het Bouwbesluit 2012 (Stb. 2011, 416) opgenomen, die zijn grondslag had in het Besluit brandveilig gebruik bouwwerken (Gebruiksbesluit, Stb. 2008, 327), waarin gesproken werd over een

geldig door burgemeester en wethouders aanvaard document waaruit blijkt dat deze voorziening adequaat functioneert, wordt onderhouden en gecontroleerd. Er zijn dus geen specifieke eisen gesteld aan een automatische brandblusinstallatie of een rookbeheersingssysteem. Bij toepassing van dergelijke brandveiligheidsinstallaties zal men terug moeten vallen op het aantonen van gelijkwaardigheid.

3.6 Opties verkennen voor alternatieve aansluiting van aanvullende maatregelen (art. 1A lid 3 woningwet)

Artikel 1A lid 3 Woningwet stelt:

De eigenaar van een bouwwerk of degene die uit anderen hoofde bevoegd is tot het daaraan treffen van voorzieningen onderzoekt, of laat onderzoek uitvoeren naar, de staat van dat bouwwerk, voor zover dat bouwwerk behoort tot bij ministeriële regeling vast te stellen categorieën bouwwerken waarvan is vast komen te staan dat die een gevaar voor de gezondheid of de veiligheid kunnen opleveren. Bij ministeriële regeling worden voorschriften gegeven omtrent het onderzoek.

Op basis van dit artikel uit de Woningwet zijn reeds een aantal praktijksituaties die een gevaar voor de veiligheid kunnen opleveren, aanvullende bepalingen opgenomen in de regeling Bouwbesluit 2012. Dit betreft Hoofdstuk 5a. Onderzoeksverplichting zorgplicht waarin aandacht is besteed aan de veiligheid van bestaande galerijflats en zwembaden naar aanleiding van incidenten in het verleden.

Indien voor bepaalde categorieën houten bouwwerken een gevaar voor de veiligheid kan optreden in verband met het brandgedrag, dan geeft artikel 1A van de Woningwet de mogelijkheid om nadere voorschriften op te nemen in de Regeling Bouwbesluit. Na de invoering van de Omgevingswet betreft dit de Invoeringsregeling Omgevingswet (Stc. 2020, 64380). Omdat artikel 1A lid 3 Woningwet zich richt op de eigenaar van een bouwwerk, betekent dit dat er sprake is van een bestaand bouwwerk. Mocht een gemeente dit artikel willen inzetten in geval van nieuwbouw, dan zal zij duidelijk moeten maken dat zij aanvullende eisen stelt die de eigenaar van het gebouw moet nemen, wil deze het gebouw ook in gebruik kunnen nemen.

4 Aanvullende eisen en aandachtspunten

Naast de brand gerelateerde eisen beschreven in de BBL kunnen door verschillende stakeholders andere, aanvullende eisen worden gesteld. De aanleiding voor aanvullende eisen zijn bijvoorbeeld het beperken van schade en het streven naar bedrijfscontinuïteit, waarborg van de economische waarde, architectonische wensen, extra veiligheid, verzekerbaarheid en meer. Deze eisen worden over het algemeen uitgedrukt in functionele eisen, waarna de brandveiligheidsadviseur de extra veiligheid dient te waarborgen, door passend brandveiligheidsontwerp of de veiligheid te bewijzen.

Naast functionele eisen, kunnen ook concrete eisen worden gesteld aan de integratie van aanvullende brandveiligheidsmaatregelen, zoals het integreren van een “sprinklerinstallatie, brandwerende bekleding, overdimensionering van constructieonderdelen of het brandwerend behandelen van houten elementen”. Uit de praktijk volgt dat dit voornamelijk wordt vereist vanuit het bevoegd gezag en verzekeraars. De aanvullende eisen zijn project- en stakeholdersafhankelijk.

In de volgende paragrafen worden de meest gangbare aanvullende eisen en aandachtspunten voor houtbouw verder uitgediept, gefocust op beperken van de schade van een houten gebouw en de aanvullende eisen die de brandweer kan vragen voor veilige repressie.

4.1 Beperking schade gebouw

Wanneer de constructie van een gebouw van hout is, wordt het risico op branduitbreiding, grote schade en total-loss raken van het gebouw groter in geval van een brand (zie hoofdstuk 2.13). Om dit risico te verkleinen kunnen extra eisen worden gesteld aan de brandveiligheidsvoorzieningen en brandveiligheidsmaatregelen in een gebouw. Aanleidingen voor deze aanvullende eisen kunnen onder andere verzekerbaarheid, bedrijfscontinuïteit en waardebehoud zijn.

In de praktijk wordt ervaren dat extra veiligheidseisen met betrekking tot brand en in relatie tot schadebeperking voornamelijk worden gesteld door verzekeringsmaatschappijen. Hierbij kan de eis worden vertaald naar functionele eisen, zoals het brandbestendig zijn van een gebouw (fire resilience), maar ook naar aanvullende brandveiligheidsmaatregelen zoals het integreren van een automatische blusinstallatie, het verhogen van de brandwerendheid van brandscheidingen, overdimensionering van constructieonderdelen of het brandwerend behandelen van houten elementen. Iedere verzekeringsmaatschappij hanteert eigen acceptatierichtlijnen en stelt eigen aanvullende voorwaarden en eisen, mede afhankelijk van de risico's en (herbouw)waarde van het gebouw.

4.2 Extra eisen voor repressie

Ook de repressieve diensten kunnen aanvullende eisen stellen voor gebouwen met hout. Uit de praktijk volgt dat onderstaande eisen de belangrijkste punten zijn die gewaarborgd moeten blijven.

Een aantal voorbeelden hiervan zijn:

- Bereikbaarheid buiteninzet brandweer d.m.v. laddervoertuig
- Bereikbaarheid gebouw rondom
- Bluswatercapaciteit
- Veilige aanvalsroute (beton)
- Intact blijven van vloeren t.b.v. redwerkzaamheden
- Branduitbreiding verticaal beperken. Geen brandcompartimenten over meer dan 1 bouwlaag.

In Parijs heeft de brandweer/politie een doctrine met richtlijnen gepubliceerd (Prefecture de Police, 2021), die praktisch gezien moet worden gehandhaafd. De richtlijnen bevatten strikte begrenzingen voor het blootstellen van hout, welke in meer detail zijn besproken in 5.9.

4.3 Doorstaan van uitbrandscenario's

In een aantal landen wordt het doorstaan van uitbrand scenario's of een periode van een natuurlijk brandverloop voor een bepaalde periode expliciet benoemd als prestatie-eis. Deze regels worden besproken in 5.9.

5 Ontwerpen en maatregelen voor ontwerp houten gebouwen

5.1 Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand

5.1.1 Inschatting brandverloop

Mits de houtconstructie volledig is afgeschermd, zodat hout niet als een brandstof kan dienen gedurende de gehele brand, kan het brandverloop ingeschat worden met conventionele methodes, zoals de standaardbrandcurve (EN 1363-1, 2020), parametrische brandcurves (EN 1991-1-2, 2002), zone modellen (*e.g.* Cadorin en Franssen, 2003) en numerieke CFD-analyses.

Voor een relevante inschatting van het brandverloop in compartimenten met significante zichtbare oppervlaktes van de houtconstructie kan het meenemen van de permanente brandbelasting belangrijk zijn. Parametrische brandcurves zijn voorgesteld door Barber *et al.* (2016) en Brandon (2018a). In beide modellen is de energiebijdrage van de houtconstructie geïncorporeerd door middel van een iteratieve methode. Brandon stelt voor om tussen 0% en 70% van de houtverbranding buiten te laten plaatsvinden tijdens een gelimiteerde periode van de volledig ontwikkelde brand, om te simuleren dat een deel van de verbranding buiten plaats vindt mits de brand ventilatie-gecontroleerd is.

Twee zone modellen zijn gepubliceerd waarin de energiebijdrage van een massief houten constructie meegenomen kan worden. Het eerste model (Brandon, 2016) is een paar keer verbeterd en opnieuw gepubliceerd door Hopkin *et al.* (2017), Brandon en Andersson (2018) en Brandon *et al.* (2021d). Wade (2020) ontwikkelde een twee-zone model dat de bijdrage van massief houten constructies meeneemt.

Een aantal van deze modellen zijn gebruikt om delaminatie te voorkomen. Echter, de modellen zijn niet geschikt om het effect van delaminatie of het vallen van gipslagen te modelleren.

Het aantal benodigde gipslagen om verkolen achter gips of het wegvallen van gips te voorkomen kan worden ingeschat door middel van de modellen Brandon (2018) en Brandon *et al.* (2021d). Het principe is ook beschreven in het Structural Fire Safety Engineering Handbook door LaMalva en Hopkin (2021), waarbij de temperaturen aan de koude zijden van gips lagen als bezwijkcriterium worden gebruikt. Just (2010) en Sultan (2008) geven informatie over de bezwijktemperaturen achter gips met type F of type X (Amerikaanse classificering) in een grote serie van brandwerendheidsproeven. Bezijken van gips zonder brandclassificering, wordt over het algemeen aangenomen als de inbrandingstemperatuur aan de koude zijde bereikt is (EN1995-1-2, 2004).

5.1.2 Eurocode berekening

Huidige versie

Eurocode 5 (1995-1-2:2004) bevat vooral berekenings- en ontwerpmethodes gerelateerd aan de brandwerendheid van bouwdelen met constructiehout. Voor brandwerendheidsberekeningen voor massieve houten elementen worden er in totaal drie methodes gegeven:

- gereduceerde doorsnede methode, waarbij de doorsnede wordt verkleind door middel van het substraheren van een verkoolde laag en een nul-sterkte-laag. Verschillende onderzoekers concludeerden dat de nul-sterkte-laag in Eurocode 5 van 7 mm te klein is, en tot niet-conservatieve resultaten leidt.
- gereduceerde eigenschappen methode, waarbij de gehele doorsnede een verlaagde sterkte krijgt.
- geavanceerde methode (Annex B), waarbij de houttemperaturen op een groot aantal locaties worden berekend door middel van een numerieke methode (meestal eindig elementen methode), op basis van de temperaturen wordt de lokale materiaal sterkte en stijfheid bepaald. Constructieve berekeningen met de aangepaste sterkte voorspellen dan de capaciteit van de constructie.

Naast methodes voor de standaard ISO 834 temperatuurcurve die gebruikt wordt in brandwerendheidsproeven (EN1363-1, 2020), biedt Eurocode 5 in Annex A ook een methode om de inbrandingsdiepte te bepalen voor de parametrische brandcurves van Eurocode 1. De parametrische brandcurves geven een inschatting van het brandverloop in een brandcompartiment gebaseerd op de brandbelasting, en parameters gerelateerd aan warmteverliezen. Annex A geeft echter alleen de inbrandingssnelheid voor de gereduceerde doorsnede methode.

Gap-analyse

Annex A voor parametrische branden geeft geen waarden voor de nul-sterkte laag, welke groter zou moeten worden in de afkoelfase door warmteherverdeling. Lange *et al* (2015), Brandon *et al.* (2017), Huc (2021) presenteren benodigde diktes voor de nul-sterkte laag voor parametrische brandcurves. Het is echter belangrijk te beseffen dat bij toepassing van de parametrische brandcurve kennis van de brandbelasting benodigd is. Zoals benoemd in 5.1, zijn er twee methodes voorgesteld in de literatuur, om de brandenergie van de houtconstructie in acht te nemen in de parametrische brandcurve (Barber *et al.*, 2016; Brandon, 2018a). Brandon stelt ook een aanpassing van de geavanceerde Eurocode 5 methode voor, met het doel om de methode voor parametrische brandcurves te gebruiken.

Ontwerpberekeningen en methodes voor CLT zijn niet behandeld in Eurocode 5 (EN1995-1-2:2004). De huidige berekeningsmethodes, kunnen niet voor CLT gebruikt worden omdat het effect van delaminatie niet in acht wordt genomen en de nul-sterkte-laag een versimpeling is gebaseerd op een homogene doorsnede.

Toekomstige versie

De laatste conceptversie van de komende Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022) bevat de volgende verschillen die relevant zijn voor de bovengenoemde onderwerpen:

- De nul-sterkte-laag voor brandwerendheidsberekeningen is vergroot gebaseerd op onderzoek door (Schmid, 2015).
- De gereduceerde sterkte methode is geschrapt vanwege inconsistentie met andere methodes en proeven.
- De inbrandsnelheid van CLT volgens de methode van Klippel (2017) is opgenomen en is afhankelijk van het delamineer gedrag van CLT.
- Het delamineergedrag van CLT kan experimenteel beoordeeld worden volgens een methode door Brandon, Klippel en Frangi (2022).
- De aanpassing voor de parametrische brandcurve van Eurocode 1 (1992-1-2:2002) om de verbrandingsenergie van de constructie in acht te nemen, volgens Brandon (2018a), is opgenomen in Annex A.
- De gereduceerde doorsnede methode voor berekeningen met de parametrische brandcurve is aangepast volgens de methode van Brandon *et al.* (2017). Alternatief kan een temperatuur accumulatiemethode door Werther (2016) gebruikt worden,

5.1.3 Weerstand tegen delamineren

Zoal benoemd in 5.1.3 bevat de laatste conceptversie van de toekomstige Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022) een brandproef om te identificeren welke massief houten materialen delaminatiebestendig zijn, in verband met brandwerendheid en de branddynamiek. De delaminatie bestendigheid is niet alleen afhankelijk van de toegepaste lijm, maar ook van de dikte van de uiterste lamellen laag van gelijmde houtmaterialen (Klippel et al 2018).

Zonder een eis om uitbranding te weerstaan, zou het wel toegestaan zijn om CLT te gebruiken dat kan delamineren, mits een hogere verkolingssnelheid in rekening wordt gebracht. In de Verenigde Staten en Canada zijn grootschalige kamer brandproeven en kleinschalige proeven met een Bunson brander vereist om delaminatie te reguleren in de CLT Product Standaard ANSI/APA PRG 320 (2019).

5.1.4 Inbrandsnelheid en nul-sterkte laag

De inbrandsnelheid is traditioneel gezien gebruikt om de sterkte van massieve houten elementen in de brandwerendheidsproef (ISO 834) te bepalen vanwege een eenvoudige correlatie met de capaciteit van deze elementen. Frangi en Fontana(2003) concluderen dat het temperatuurprofiel van het hout dat nog niet ingebrand is, vrijwel constant is na ongeveer 20 minuten, wat verklaard dat er een constante nul-sterkte-laag in acht is genomen na 20 minuten in EN1995-1-2 (2004). De inbrandsnelheid van CLT kan tijdelijk verdubbelen als er delaminatie plaats vindt (Klippel *et al.*, 2016) of een gipslaag wegvalt (Just, 2010).

De inbrandsnelheid voor een andere mate van brandblootstelling zoals een parametrische brand of een compartimentsbrand kan significant hoger zijn (Hadvig 1981, Hox en Baker 2016). De relevantie van de inbrandingssnelheid is echter gereduceerd in de afkoelfase, omdat de correlatie tussen inbranding en draagcapaciteit

verslechterd en de nul-sterkte laag variabel zou moeten worden genomen om dit op te vangen.

De nul-sterkte-laag is een vereenvoudiging waarbij de verzwakking door een relatief dikke door temperaturen beïnvloedde laag in acht genomen wordt (1) door middel van het volledig weghalen van een dunnere laag en (2) voor het overige materiaal de volledige sterkte te berekenen. In een brand met een afkoelfase is het temperatuurprofiel van het hout vanaf de verkoolde laag niet constant (Brandon, 2017). De warmte die aanwezig is in het hout gedurende de afkoelperiode herverdeelt zich in het hout, waardoor het materiaal dieper in het element nog opwarmt. Dit resulteert in een langer doorlopende verzwakking zelfs nadat de inbranding stopt. Bartlett *et al.* (2019) voert aan dat dit de reden was voor het instorten van het plafond dat 29 uur na een van hun compartiment proef werd ontdekt. Echter, verlengde temperatuurmetingen door Brandon *et al.* (2021a) gaven geen indicatie van verzwakking nadat het na 4 uur resterende smeulen lokaal werd gedoofd met watermist.

5.1.5 Equivalente brandduur

Het concept van equivalente brandduur, is bedoeld om verwachte brandscenario's in gebouwen te vertalen naar een brandwerendheidseis (Buchanan 2010). Vaak is het doel voor deze methode om de volledige duur van compartimentsbranden te doorstaan zonder bezwijking. Als de focus ligt op het voorkomen van bezwijken in een natuurlijke brand, dan kan de equivalente brandduur gedefinieerd worden als:

De tijd van een brandwerendheidstest die nodig is om dezelfde constructieve schade te veroorzaken als een volledig brandverloop in een specifiek compartiment.

Met deze definitie is het alleen mogelijk om een equivalente brandduur te bepalen voor compartimenten waar de constructieve beschadiging daadwerkelijk stopt. Om de methode te gebruiken is het dus van belang om eerst zeker te stellen dat de brand zal doven.

De oudste equivalente brandduur methode bekend bij de auteurs was ontwikkeld door Ingberg (1924), waarbij het oppervlak onder de temperatuurcurves gelijk moest zijn met equivalente brandscenario's. Deze methode is achterhaald en niet meer toegepast vanwege het ontbreken van de wetenschappelijke verklaringen en correlatie.

Een nieuwere maximumtemperatuur methode (Buchanan, 2000) is conventioneel voor staalconstructies, waarbij kan worden aangenomen dat het zwakste moment van de constructie het moment is waarin de staaltemperaturen het hoogst zijn. De equivalente brandduur is dan de tijd die benodigd is in een brandwerendheidsploef om de staaltemperatuur gelijk te krijgen met de verwachte maximale staaltemperatuur in een compartimentsbrand. Voor hout werkt deze methode echter niet, omdat het zwakste moment aan het eind en zelfs een periode na de brand is, vanwege de onherstelbare inbranding en de warmtegolf diep in het hout.

Om voor houtconstructies een equivalente brandduur te bepalen is om die reden kennis van het gehele brandverloop van belang. Als hout is blootgesteld is het brandverloop echter alleen te bepalen met kennis van de inbranding. Met kennis van de inbranding en verhitting is ook de draagcapaciteit te bepalen. Om dit te verduidelijken zijn de volgende relaties aangegeven:

- De vuurlastbijdrage van de houtconstructie is afhankelijk van de inbranding.
- De inbranding is afhankelijk van het brandverloop.
- Het brandverloop is afhankelijk van de vuurlastbijdrage van de houtconstructie.
- De constructieve schade is afhankelijk van de inbranding (en verhitting).

Al voor het bepalen van de equivalente tijdsduur is er kennis van de constructieve schade benodigd. Methodes om deze kennis te verkrijgen zijn beschreven in 5.1. Met behulp van de bepaalde constructieve schade kan dan teruggerekend worden welke brandwerendheidduur erbij hoort. In contrast met methoden voor staalconstructies kunnen equivalente tijdsduur methoden voor hout dus niet worden gebruikt om op een versimpelde manier de draagcapaciteit te kunnen berekenen. Wel is de methode van belang voor:

- Het, met behulp van een geschikte brandwerendheidseis, identificeren van producten zoals doorvoeringen, verbindingen, brandstops, branddeuren etc. die geschikt zijn om een volledige brandduur te doorstaan.
- Het bepalen van geschikte brandwerendheidseisen die statistisch gezien voor de meeste branden in bepaalde gebouwen voldoen, mits er ook aan andere eisen wordt voldaan. Dit is de basis van de relatie tussen uitbranden en brandwerendheidseisen besproken in 5.10.2.

De enige studie gericht op het verkrijgen van algemeen bruikbare informatie voor een equivalente brandduur in constructies met blootgestelde houten delen is de studie van Brandon *et al.* (2021a). Een probabilistische analyse suggereerde dat de verwachte schade na 85% van echte flashover-branden die niet geblust worden, kleiner is dan de verwachte schade van de beproefde brandscenario's. De inbrandingsdieptes kwamen overeen met die van 60 minuten tot meer dan 120 minuten brandwerendheidstest-blootstelling, afhankelijk van de hoeveelheid blootgesteld hout en de locatie van het blootgestelde element. In alle proeven was de verkolingsdiepte het laagst in het blootgestelde plafond. Een overzicht wordt verder gegeven in paragraaf 5.10.2

Methodes die dienen voor het bepalen van het brandverloop en ook voor het berekeningen van de constructie capaciteit (zie 5.1) zijn potentiële hulpmiddelen om de equivalente brandduur te bepalen. Er zijn echter geen publicaties over validering en limiteringen van een dergelijke methode.

5.1.6 Brandproeven

Om een gebouwwontwerp te ondersteunen kan er besloten worden om brandproeven uit te voeren. Deze worden in de meeste gevallen gedaan volgens NEN-EN 1363 (2020) om aan te tonen dat er aan de brandwerendheidseisen voldaan wordt. In sommige gevallen betreft dit het beproeven van details zoals verbindingen (Barber 2017) of beproeven van constructieonderdelen in een oven waarbij na de test een afkoelfase wordt toegepast (Andersen, 2017). Recentelijk zijn er ook een aantal compartimentsbrandproeven uitgevoerd in relatie met gebouw ontwerpen, voorbeelden hiervan zijn Hox (2015), Hopkin et al (2022) en Chaumont en Brandon (nog niet gepubliceerd).

Zoals vermeld in 5.1.5 kan zonder kennis van de equivalente brandduur een brandwerendheidsproef niet gebruikt worden om nakoming van prestatie-eisen zoals het weerstaan van een volledige natuurlijke brandduur aan te tonen. In enkele gevallen zijn

er compartmentsbrandproeven uitgevoerd als deel van het valideringsproces in de ontwerpfase. Omdat deze proeven gewoonlijk niet gepubliceerd worden, zijn er geen referenties beschikbaar.

5.1.7 Toepassing van sprinklers

Er zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd naar sprinklers in compartimenten met houten constructies. Frangi en Fontana (2005) **G3**, Zelinka *et al.* (2018) **G18** en Ko en Nour (nog niet gepubliceerd) rapporteren proeven met sprinklers in compartimenten met blootgestelde houten oppervlaktes. Al deze studies laten een succesvolle beperking van de brandontwikkeling zien.

Als een automatische sprinklerinterventie succesvol is, kan de brand zich niet significant ontwikkelen en wordt voldaan aan alle mogelijk relevante constructieve prestatiedoelen. Als de sprinklerinterventie niet succesvol is, moeten de gevolgen redelijkerwijs alsnog acceptabel zijn. In plaats van een deterministische visie kunnen de effecten van sprinklers daarom beter worden bekeken aan de hand van statistische gegevens. Omdat bezwijken door brand zeer zeldzaam is, is het onmogelijk om genoeg data te krijgen om een oordeel te geven over de statistische invloed van sprinklers op de constructieve veiligheid. Wel is er relevante statistische informatie over het effect van sprinklers op branduitbreiding, persoonlijke veiligheid en financiële schade in geval van houtconstructies met meerdere verdiepingen. Deze worden besproken in 5.5.4

Het in acht nemen van sprinklers kan volgens Eurocode 1 (EN1991-1-2:2002) en de Britse standaard PD6688-1 2:2007 door middel van een reductiefactor van 0.61 voor de vuurlast. Deze factor is bepaald op basis van de aannames dat (1) een sprinkler ineffectief is in 2% van de gevallen en (2) de kans op een flashover brand $2.2 \cdot 10^{-5}$ is in 55 jaar in een compartiment met een oppervlak van 1000 m² (Wade en Frank, 2019). Het is vermeldenswaard dat gepubliceerde betrouwbaarheidsstatistieken aanzienlijk verschillen tussen bronnen. Frank *et al.* 2013, vermelden dat gepubliceerde betrouwbaarheidcijfers variëren tussen 70% en 99.5% effectiviteit. Wade en Frank (2019) stellen alternatieve reductie factoren voor waarbij een lagere sprinklerbetrouwbaarheid wordt aangenomen. Deze verschillende reductiefactoren zijn bepaald voor systemen met één waterleiding of twee onafhankelijke waterleidingen.

De besproken factors zijn bepaald door middel van aannames van de kans op flashover. Echter, zoals besproken in 2.4.2 is de kans op een flashover vergroot bij het blootstellen van onbehandelde houten oppervlaktes. Dit duidt erop dat het gebruik van de factors niet geschikt is voor constructies met blootgestelde (onbehandelde) houten delen. Omdat de permanente vuurlast in het geval van massieve houtconstructies afhankelijk is van het brandscenario, is er ook onduidelijkheid over het in acht nemen van een reductiefactor voor de permanente vuurlast. Er is geen literatuur gevonden een reductie factor die een scenario-afhankelijke permanente vuurlast in acht neemt.

5.1.8 Herhaalbaarheid van een fire safety engineering gebaseerde aanpak

Het nemen van een fire safety engineering gebaseerde aanpak kan veel vragen van de competentie van ingenieurs. Sommige landen gebruiken een fire safety engineering gebaseerde aanpak in hun bouwregelgeving in plaats van het gebruik van voorschriften

en classificatiesystemen. Voor een beoordeling van een dergelijke aanpak die de veiligheid kan garanderen, is het van belang om de herhaalbaarheid ervan in kaart te brengen.

Round robin studies waarbij professionele brandingenieurs dezelfde opdracht kregen om de branddynamiek in een gespecificeerde ruimte te bepalen met fire safety engineering methodes zijn gepubliceerd door Rein *et al.* (2009) en Johansson (2021). De resultaten laten aanzienlijke verschillen zien tussen de voorspellingen. Johansson concludeert dat de resultaten problematisch zijn voor de betrouwbaarheid van fire safety engineering.

Een klein aantal methoden, zoals de zone-modellen besproken in 5.1 om de fysieke brand en de vuurlast bijdrage van hout in beschouwing te nemen, resulteert vaker in redelijk nauwkeurige voorspellingen van compartimentbrandproeven en kunnen in veel gevallen gebruikt worden om uitbrandscenario's te voorspellen. Omdat zulke modellen relatief ingewikkeld zijn, limieten hebben en gevoelig kunnen zijn voor de keuze van parameters, kan er ook bij het gebruik van zone-modellen fouten verwacht worden. Daarom is het beschikbaar stellen van uitgebreide regels en richtlijnen van belang.

5.2 Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw

Een aantal methodes om de mate van blootstelling aan brand in te schatten zijn besproken in 5.1.1, welke niet herhaald worden in dit hoofdstuk. Dit betreft, de inschatting van een brandverloop, equivalente brandduur, de inbrandsnelheid en het in aanmerking nemen van sprinklers.

5.2.1 Voorkomen van “super spreaders”

Zoals besproken in 2.13, suggereert een kwalitatieve studie van grote schade branden in gebouwen met een houtconstructie en meer dan drie verdiepingen (Brandon *et al.*, 2021) dat er een select aantal paden van brandspreiding zorgen voor de meerderheid van branden met excessieve schade. Deze paden zijn:

- brandspreiding langs de gevel, welke vaak over gaat naar het dak en de zolder;
- brandspreiding door verbonden holle ruimtes met brandbare materialen, welke vaak over gaat naar de zolder;
- brandspreiding door de zolder, waarna de brand zich terug spreidt naar grote delen van het gebouw.

De onderzoekers concluderen dat een focus moest worden gelegd op het verhinderen van brandspreiding langs deze paden om excessieve materiele schade te voorkomen. Dit omvat een focus op het dakvoet detail, dat vaak ventilerend is en een focus op brand barrières in holle ruimtes, en van holle ruimtes naar de zolder.

Incidenten met brandspreiding langs en door gevels hebben in het verleden tot grote incidenten met vele doodsvallen geleid (Spearpoint *et al.* 2019). Om deze reden is het

limiteren en vertragen van gevel brandspreiding van groot belang. Brandspreiding langs de gevel is verder besproken in 5.2.4.

5.2.2 Doorbranden brandscheidingen

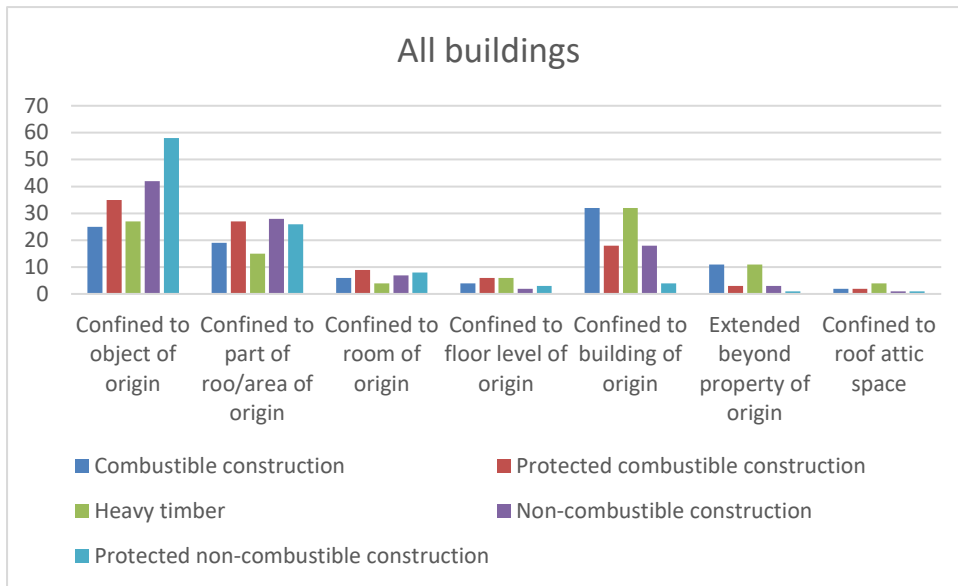
Zoals vermeld in 2.5 is het risico voor brandspreiding vooral bepaald door verbindingen en doorvoeringen door installaties. Zoals beschreven in 2.5 duiden studies met verbindingen die representatief zijn voor de huidige bouwpraktijk erop dat brandspreiding plaats kan vinden door hoekverbindingen, welke zelden getest worden. Studies waarin representatieve details succesvol waren in het voorkomen van brandspreiding zijn gepubliceerd door Brandon *et al.* (2018b) die opzwellende tape gebruikten, Su *et al.* (2018b) **G19** die een brandsealant gebruikten en Brandon *et al.* (2021a) **G22** die verschillende methodes gebruikten. In de laatste studie is geconcludeerd dat voldoende geometrische tolerantie van de methode om luchtdichtheid te creëren van belang is. In de studie leidde een (getolereerde) hoogteverspringing van ongeveer 1 tot 2 mm aan de bovenzijde van twee wandelementen tot het doorbranden van een verbinding, die in locaties zonder deze geometrische imperfectie adequaat functioneerde. Het toepassen van constructie tape aan de koude zijde om verbindingen luchtdicht te maken gaf goede resultaten in alle geteste details, omdat het ook een relatief grote geometrische tolerantie met zich meebrengt.

Bij het doorbranden van brandscheidingen in houtconstructies kan het noodzakelijk zijn om rekening te houden met een eventuele verhoogde vuurlast. Weerstand tegen doorbranding van brandscheidingen wordt normaalgesproken aangetoond met onbelaste brandwerendheidsproeven volgens EN 1364, of door middel van berekeningen volgens Eurocode 5 (EN 1995-1-2, 2004). Om rekening te houden met een verhoogde vuurlast bij deze methodes is kennis van de equivalente brandduur noodzakelijk, waarvoor, zoals besproken in 5.1.5, de huidige kennis gelimiteerd is. Tevens is het in echte compartimenten zo dat de inbrandingssnelheid lokaal verhoogd kan zijn door een zuurstofrijke luchtstroom en stralingsinteracties tussen blootgestelde houten delen (Su *et al.* 2018b **G19**; Brandon *et al.* 2021a **G22**), op zulke locaties kan doorbranding eerder verwacht worden.

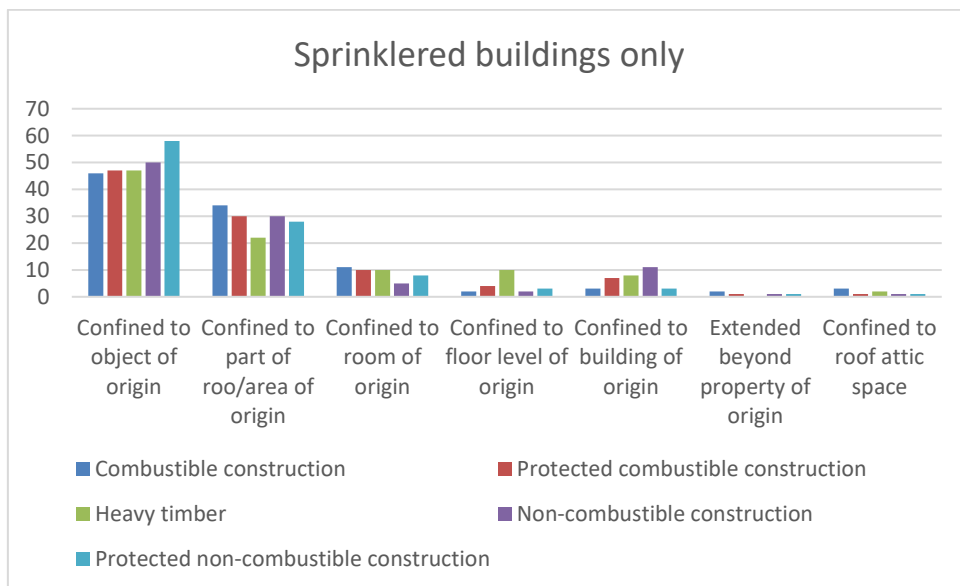
5.2.3 Het effect van sprinklers op branduitbreiding en schadebeperking

Het meest uitgebreide onderzoek naar het statistische effect van sprinklers op de branduitbreiding in gebouwen met een houten constructie is uitgevoerd door Garis en Clare (2014). In de vergelijkende studie tussen gebouwen met een houtconstructie en niet-brandbare gebouwen is vastgesteld dat in gebouwen van 1 tot 4 verdiepingen een significant hogere frequentie van grote branduitbreiding optreedt (zie figuur). Door dezelfde vergelijking uit te voeren voor enkel gebouwen met sprinklers wordt dit verschil echter geëlimineerd. Ook is te zien dat brandoverslag naar andere gebouwen significant minder vaak optreedt als sprinklers zijn geïnstalleerd.

Dit geeft aan dat sprinklers overmatige branduitbreiding sterk kunnen beperken en het effect van de extra vuurlast van hout op de branduitbreiding teniet kunnen doen.



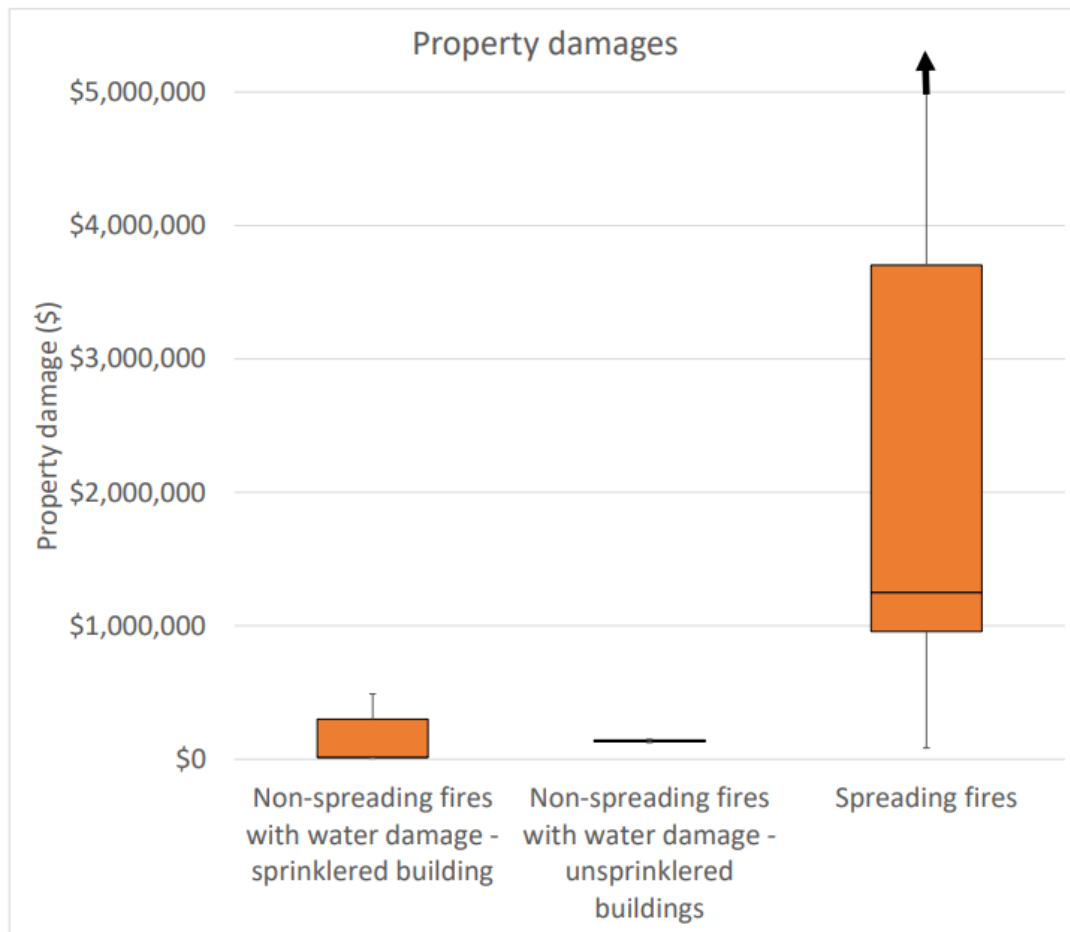
Figuur 7: Mate van branduitbreiding in gebouwen van 1 tot 4 verdiepingen. Overgenomen uit Garis en Clare (2014)



Figuur 8: Mate van branduitbreiding in gebouwen van 1 tot 4 verdiepingen met sprinklers. Overgenomen uit Garis en Clare (2014)

Een vergelijking van incidenten als gevolg van branden in houten gebouwen met grote financiële schade wees uit dat het verspreiden van branden tot aanzienlijk hogere financiële schade kan leiden dan branden die door sprinklers worden beperkt en wel tot significante waterschade leidden, zie Figuur 9 (Brandon *et al.* 2021b).

De conclusies van Garis en Clare (2014) samen met de observaties van Brandon *et al.* (2021b) geven een indicatie dat, sprinklers niet alleen het aantal gevallen van branduitbreiding significant kunnen verminderen, maar ook het aantal gevallen van excessieve financiële schadegevallen kunnen verminderen.



Figuur 9: Incidenten met grote financiële schade onderverdeeld in gevallen van brandspreiding en gevallen van waterschade door succesvolle interventie. Uit Brandon et al (2021b).

5.2.4 Brandoverslag naar bovenliggende verdiepingen

De eisen, de beproevingsmethodes en de beoordelingscriteria die de brandveiligheid van gevels garanderen, verschillen significant in verschillende landen (Anderson *et al.*, 2018). In de EU is er een initiatief gaande om een geharmoniseerde proefmethode te realiseren (Anderson *et al.* 2021). Een studie met een focus op een hoge maar realistische blootstelling aan brand van de gevel, voor compartimenten met gedeeltelijk blootgestelde massiefhouten constructies (Sjöström *et al.* 2021), geeft aan dat de voorgestelde EU proef en de Britse gevelproef BS 8414 (2015) de meest representatieve blootstelling hebben.

Brandoverslag door uitslaande vlammen die op bovenliggende niet-brandwerende-ramen inslaat, kan enkel worden ontweken door architectonische begrenzingsen (Thomas en Law, 1966 & Law en Kanellopoulos, 2020). Law en Kanellopoulos (2020) suggereren dat deze vorm van brandspreiding praktisch gezien is toegestaan in het Verenigd Koninkrijk. Voor massieve houtconstructies met blootgestelde oppervlaktes wordt het risico voor deze vorm van brandspreiding verhoogd. Zonder een duidelijke prestatie-eis in het buitenland is het niet duidelijk hoe met dit extra risico omgegaan moet worden. In Nederland worden hiervoor brandwerendheidseisen gegeven en is er een bepalingsmethode beschreven in de NEN 6068 gebaseerd op vlamvormen. Het is niet duidelijk hoe dit model moet worden aangepast voor het gebruik bij blootgestelde

massieve houtconstructies. Een eerste model voor externe vlamhoogte voor compartimenten met blootgestelde houten vlakken door Hopkin en Spearpoint (2021) kan mogelijk een eerste stap zijn naar een aanpassing. Dat geeft aanknopingspunten voor een fysieke beschouwing. Echter daarbij moet de vertaling van het oorspronkelijke fysieke model van Law (1978) naar het regelgeving-aangepaste model van NEN 6068:1991 niet uit het oog worden verloren.

5.3 Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen

De straling naar nevenstaande gebouwen was onderzocht in een tal van studies. Het is echter in de meeste gevallen niet duidelijk of het brandscenario gunstig of ongunstig is. Sjöström *et al.* (2021) die de brandcompartimenten en de openingsafmetingen hebben gebaseerd op statische data van appartementen en de intentie hadden een statistisch ongunstig brandscenario te testen, waarbij een significant deel van de massieve bouwdelen blootgesteld waren, concluderen dat op 4.8 m afstand de maximale warmtestraling in een aantal proeven net hoger was dan de geoorloofde straling naar nevenstaande gebouwen in Zweden (15 kW/m²). Op een afstand van 8 meter was de straling maximaal 9 kW/m² welke ruim voldoet aan de acceptatiecriteria van Zweden, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten (12.5kW/m²).

5.4 Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw

Zoals aangegeven in 2.6 is het stromen van hete gassen door details als verbindingen geïdentificeerd als de hoofdaanleiding van branduitbreiding door zulke details. De stroom van hete gassen door de houtconstructie is gemakkelijk te identificeren door de rookproductie die ermee gepaard gaat. In 5.2.2 is besproken dat de stroom van gassen tegen kan worden gegaan door middel van luchtdichte details. Deze maatregel zal ook de rookverspreiding limiteren.

5.5 Veilig vluchten

5.5.1 Hulp bij ontruiming bij brand

In de internationale literatuur zijn geen beschouwingen gevonden die nader ingaan op het effect van een hogere brandlast op hulp bij ontruiming bij brand. De beschikbare tijd om veilig te kunnen ontruimen zullen beperkter zijn vanwege de toename van rook.

Wereldwijd zijn er wel verschillende opvattingen over de te hanteren ontruimingsconcepten. Een belangrijk voorbeeld hiervan is de discussie omtrent het 'stay-put' scenario. In Nederland worden verschillende ontruimingsscenario's voorgeschreven vanuit de Handreiking Hoogbouw van de SBR uit 2014. In hoeverre de

scenario's toepasbaar is bij houtbouw, is afhankelijk van vele factoren. Nader onderzoek en een integrale ontwerpaanpak is hierbij geadviseerd.

5.5.2 Lengte vluchtroutes

In de internationale literatuur zijn geen beschouwingen gevonden die nader ingaan op het effect van een hogere brandlast op de aan te houden lengte van de vluchtroutes.

5.5.3 Brandklasse vluchtroutes

In de internationale literatuur zijn geen beschouwingen gevonden die nader ingaan op het effect van een hogere brandlast op de aan te houden lengte van de vluchtroutes.

5.5.4 De invloed van houtconstructies op veilig vluchten

Garis (2019) voerde een analyse uit van brandstatistieken in Brits Colombia. Hij vergeleek brandbare constructietypen (houtskelet en massief hout) met niet-brandbare constructietypen. In gebouwen tot 4 verdiepingen zonder sprinklers concludeert Garis dat er een significant hoger sterftcijfer is voor brandincidenten in gebouwen met een brandbare constructie.

Voor gebouwen zonder sprinklers van 5 en 6 verdiepingen is er geen statistisch verschil tussen brandbare en niet-brandbare constructie. Garis stelt dat alle brandbare gebouwen van deze hoogte relatief nieuw zijn, wat niet het geval is voor de niet-brandbare gebouwen van deze hoogte. Dit duidt erop dat de ontwikkelingen in Canada de persoonlijke veiligheid in gebouwen met een houtconstructie hebben verbeterd. De gegevens voor laagbouw wijzen er echter op dat de aanwezigheid van een houten constructie kan leiden tot verminderde persoonlijke veiligheid en mogelijk veilig vluchten bemoeilijken.

5.5.5 Sprinklers en veilig vluchten

Een analyse van brandstatistieken in Brits Colombia door Garis en Clare (2014) voor gebouwen tot 4 verdiepingen geeft aan dat sprinklers de levensveiligheid in alle Canadese constructietypes, dus houtskeletbouw en massief hout verhogen. Er waren geen doden gevallen door brand in alle 1754 geanalyseerde branden in gebouwen met sprinklers. Sprinklers leiden dus ook in houtconstructies tot een verhoogde levensveiligheid en mogelijk tot een verhoogde kans om veilig te vluchten.

5.6 Brandveiligheid tijdens bouw en uitvoering

Zoals aangegeven in 2.10 is het erkent dat houtconstructies vergrootte brandrisico's gedurende de bouwfase met zich meebrengen. Richtlijnen zijn gegeven door Bregulla *et al.* (2010), the UK Timber Frame Association (UKTFA, 2008), Just *et al.* (2016) en American Wood Council (Sumathipala, 2015). Daarbij ligt de focus op praktische oplossingen, waarbij de nadruk is gelegd op het zo snel mogelijk installeren van brandbescherming tijdens de bouw om de ventilatie en blootgestelde houten oppervlaktes te limiteren. Ook is er een nadruk gelegd op het verminderen van de kans

op ontsteking. De richtlijnen van de UKTFA en de American Wood Council, hebben beide een focus op het managementproces.

In de Verenigde Staten en Canada zijn aanvullende eisen gesteld in de bouwregelgeving, die specifiek gelden voor houtconstructies. Voorbeelden zijn eisen aangaande het installeren van standpijpen voor de bouwconstructie, een constructietype-specifieke watertoevoer en het brandwerend afschermen van lagere verdiepingen voordat een nieuwe verdieping gebouw mag worden (International Fire Code 3303.5; ICC, 2021). Een overzicht van deze regels is gegeven in 5.9.

Een mogelijke verkleining van risico's op de bouwplaats van massief houten constructies kan worden bereikt door het al lijmen van een gips laag als deel van de CLT-productie. Een lopend project tussen leidende partijen in de CLT-industrie (Brandon *et al.*, 2022) toont aan dat de beschermtijden van gelijmd gips hoger kan zijn dan de beschermtijden gegeven in de conceptversie van de toekomstige Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022). In het project worden voordelen en nadelen afgewogen. De verwachting is dat er sprake van een significante kostenbesparing kan zijn, omdat de hoge kosten van brandbescherming (zie Chaggaris *et al.* 2021) veel ruimte geeft voor verbeterde efficiëntie.

5.7 Uitvoeren van reddingswerkzaamheden

De meest uitgebreide literatuurstudie gericht op brandweer inzet in moderne houten gebouwen (met meer dan twee verdiepingen) is een Zweeds rapport door Vylund en Palmkvist (2017). Vylund en Palmkvist leggen de nadruk op het gebruik van thermische camera's om branden te lokaliseren omdat branden kunnen plaatsvinden in onzichtbare locaties. Bijvoorbeeld als de brand zich in de constructie ontwikkelt of als de verbranding gelimiteerd is tot smeulen. Ze adviseren op basis van een master thesis van Gudmundsson en Studahl (2015) verschillende specifieke zoekpatronen te gebruiken met een thermische camera van buitenaf en binnenuit. Gudmundsson en Studahl concluderen dat het soms noodzakelijk is om te wachten totdat een verhoogde temperatuur te zien is op de camera.

Zoals aangegeven in 2.13, is bluswater een regelmatig voorkomende aanleiding tot grote waterschade. Hox en Saeter Boe (2017) onderzochten methodes om branden in holle ruimtes in houtskelet constructies, en in compartimenten te blussen met relatief weinig water door middel van experimenten. Zij concluderen dat het openbreken/zagen van de constructie om de brand te bereiken averechts werkt. Het openen van de constructie kan leiden tot het aanwakkeren en verder verspreiden van de brand. De methode die verreweg het minste water nodig had betrof een thermische camera en een snijblusser (type Cobra Coldcut), welke watermist spuit met een druk van 200 tot 260 bar. Voor het blussen van branden in verstopte holle ruimtes maakten de brandweermannen in het experiment kleine gaten waardoor ze de brand met de snijblusser konden blussen (Figuur 10). De methode was eerder al gebruikt door de Noorse Brandweer en Vylund en Palmkvist (2017) rapporteren oefeningen met deze methode door de brandweer van Gothenborg.

Brandon *et al.* (2021a) blusten het smeulen dat resteerden na een 4 uur durende brand met een snijblusser (type Fire Stop Cristiani), die watermist met 200 bar uitwerpt. Het

doel van deze methode is om minder bluswater te gebruiken en het blussen in hogere gebouwen mogelijk te maken³. Het smeulen van houten delen achter gipslagen bluste niet uit zichzelf in één van de proeven. Het door gips snijden met een de snijblusser stopte het smeulen in de eerste geïdentificeerde locaties. Tijdens een tweede check met een thermische camera, twee uur later, was smeulen in een aantal andere locaties ontdekt welke automatisch blusten nadat het gips handmatig verwijderd werd.

De hoeveelheid water dat gebruikt was in beide experimentele studies, is vele malen kleiner dan de hoeveelheid die gebruikt wordt voor een conventionele blusactie.



Figuur 10: Het lokaliseren en blussen van een brand in een verstopte holle ruimte d.m.v. een thermische camera en een snijblusser, uit Hox en Saeter Boe (2017).

5.8 Integraal Plan Brandveiligheid voor totale oplossing

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van oplossingen en aanpak van brandveiligheidsvoorschriften en ontwerpen in het buitenland en in Nederland.

Zoals benoemd in deze literatuurstudie is de vuurlast bijdrage van houtconstructies afhankelijk van:

- de eigenschappen, dikte en bevestigingsmethodes van brandbeschermende lagen;
- de kwantiteit van blootgesteld hout;
- delaminatiegevoeligheid van de blootgestelde massiefhouten bouwelementen;

³ De druk verminderd met 1 bar per meter hoogte. Blussystemen met een hoge druk hebben daarom een hogere reikwijdte.

- en locaties of configuraties van blootgesteld hout.

Blootgesteld hout kan leiden tot:

- vergrootte rookontwikkeling;
- versnelde brandontwikkeling;
- versnelde branduitbreiding binnen grote compartimenten;
- langere brandduur en/of hogere brand temperaturen;
- verhoogde gevelblootstelling, verhoog risico van brandoverslag naar bovenverdiepingen en verhoogde blootstelling van andere gebouwen aan brand.

Hout dat gedurende de brand betrokken raakt in de brand en massief hout dat delamineert, kunnen leiden tot:

- een (vaak significant) verlengde brandduur en verhoogde temperaturen;
- een verhoogde blootstelling van de gevel aan brand.

Door de brandbaarheid van de constructiematerialen zijn houtconstructies:

1. gevoelig voor brandspreiding door holle ruimtes in de constructie, welke vooral frequent aanwezig zijn in lichte houtconstructies;
2. gevoeliger voor branddoorslag door verbindingen en langs doorvoeringen.

Wat verder in acht genomen moet worden in het gebouwontwerp is een eventueel verhoogd risico op verhinderde evacuatie en risico's van een eventuele stay-put strategie. Vooral om financiële schade te beperken kunnen vergemakkelijkt brandweerinzet en reparatie van belang zijn.

De mate waarop rekening gehouden moet worden met de bovengenoemde effecten is afhankelijk van de potentiële consequenties, welke vaak gerelateerd worden aan de bouwhoogte en de gebouwfunctie. Een klein aantal landen hebben hun bouwregelgeving aangepast om de invloed van een groot deel van de bovengenoemde effecten te limiteren of elimineren. Een overzicht van maatregelen in het buitenland zijn besproken in 5.9.

5.9 Doorstaan van uitbrandscenario's in buitenlandse regelgeving

Regels om uitbrandscenario's te doorstaan zijn beschreven in de bouwregelgeving van enkele landen. Voorbeelden zijn Zweden (EKS 11) en Denemarken (Bolig och Planstyrelsen, 2020) waar het beschouwen van een natuurlijk brandverloop optioneel is. In de Zweedse EKS 11 is een verband gegeven tussen vuurlast, brandwerendheid en het mogelijk doorstaan van een natuurlijk brandverloop. Een verwijzing naar een correcte berekening van de vuurlast voor houtconstructies is echter niet gegeven.

Vanuit de Zweedse praktijk zijn een groot aantal onbeantwoorde vragen over naleven van de regelgeving voor houtconstructies samengesteld door de Vereniging voor Brandingenieurwetenschappen (BIV, 2022). Uit de vragen blijkt dat het volstrekt onduidelijk is hoe de regels van EKS 11 moeten worden toegepast voor massiefhouten constructies.

In Denemarken is het beschouwen van een natuurlijk brandverloop met behulp van fire safety engineering een van de alternatieven van voorgeschreven oplossingen, omdat de voorgeschreven oplossingen de hoogte van gebouwen met een houtconstructie sterk begrenzen (vaak tot 12 m). Als er gekozen wordt om een natuurlijk brandverloop te gebruiken, is de prestatie-eis gesteld in de regelgeving (Bolíg och Planstyrelsen, 2020) dat het gebouw het volledige natuurlijke brandverloop moet kunnen doorstaan. De regelgeving verwijst daarbij naar Eurocode 1, waar echter geen methodes voor de vuurlastberekening voor houtconstructies zijn gegeven.

Het beschouwen van een natuurlijk brandverloop wordt in Denemarken echter zelden toegepast. Volgens Deense industriepartners wordt in veel gevallen gekozen voor een route waarbij een gelijkwaardigheid aan geaccepteerde oplossingen moet worden getoond. Deze is wellicht sterk afhankelijk van engineering judgement.

In Denemarken wordt de regelgeving als voldoende adequaat beschouwd voor houtconstructies. De *Danish Government Agency for Buildings* onderneemt stappen om een verbetering van de bouwregels voor houtbouw in verband met brandveiligheid in gebouwen hoger dan 4 of 5 verdiepingen te realiseren. De geplande opdracht heeft twee fases:

- het maken van een overzicht van de regelgeving in andere Europese landen;
- een voorstel van verbeterde regels.

In de opdracht wordt gesproken over zelfdovendheid en wordt een aantal landen genoemd als referentie. Echter, minstens een deel van de genoemde landen is momenteel zelf bezig met veranderingen van de regelgeving om dezelfde redenen.

Ook in het Verenigd Koninkrijk was er onduidelijkheid over de interpretatie van de regelgeving, met name over regel B3(1) in de Building Regulations 2010, die luidt:

“B3.—(1) The building shall be designed and constructed so that, in the event of fire, its stability will be maintained for a reasonable period.”

Onzekerheden over de brandveiligheid van gebouwen met brandbare materialen hebben geleid tot veel discussies tussen belanghebbenden in het Verenigd Koninkrijk. De interpretatie van regel B3-(1) was een belangrijk discussiepunt. Om deze reden publiceerde de Structural Timber Association (STA, 2020) recentelijk richtlijnen om te voldoen aan regel B3(1). Deze richtlijnen worden onder andere door de Londense brandweer gehandhaafd en geven aan dat een adequate waarschijnlijkheid van het weerstaan van uitbranding nodig is voor: hoogbouw (*i.e.* de hoogste vloer >18m), middelhoogbouw waarin mensen eventueel slapen, gebouwen gebruiksfuncties waar vluchten langzaam verloopt en gebouwen waar een binneninzet van de brandweer noodzakelijk is. Rekenmethodes zijn niet gegeven in de richtlijnen. Op basis van de ervaring van de hoofdauteur van dit rapport als third party reviewer van meerdere hoogbouw ontwerpen in het Verenigd Koninkrijk, is te stellen dat de toegepaste rekenmethodes sterk uiteenlopen. Verschillende ingenieursbureaus gebruiken een significant verschillend brandverloop en zelfs significante verschillen in de definitie van een volledige brandduur.

Uit de bovengenoemde prestatie-eisen met betrekking tot het doorstaan van een natuurlijk brandverloop uit regelgevingen, kan gesteld worden dat er grote

onduidelijkheid is met betrekking tot de regels en methodes voor het gebruik van een natuurlijk brandverloop.

In een aantal landen is er een set van voorschriften specifiek voor massiefhouten constructies die erop zijn gericht dat gebouwen uitbrandscenario's kunnen doorstaan. Zulke landen zijn de Verenigde Staten en Canada. Een overzicht van de specifieke voorschriften en de achtergrondinformatie is gegeven in 5.11. In de Verenigde Staten is dit een uitgangspunt voor alle gebouwen vanaf 6, 8, of 9 verdiepingen (afhankelijk van de gebruiksfunctie). Voor gebouwen lager dan 6 tot 9 verdiepingen is dit niet het geval en kan 100% van de wanden en het plafond zichtbaar gelaten worden. Het is van belang op te merken dat sprinklers verplicht zijn en CLT delaminatie in de Verenigde Staten en Canada geen of een minimale rol speelt vanwege significant strengere eisen voor de houtlijmprestatie in brand in de ANSI/APA PRG 320 (2019). Weerstand tegen delaminatie in brand is niet vereist in Europa.

In Australië zijn de voorschriften aangepast en laten massiefhouten gebouwen 25 m hoog toe (NCC 2019). Volgens de voorschriften is een passieve brandbescherming van 30 minuten (brandwerendheid) vereist, met het doel de brandweer genoeg tijd te geven om een significante betrokkenheid van de houtconstructie tegen te gaan.

Ondanks de grote verschillen tussen landen zijn er een aantal zaken overeenkomsten, namelijk:

- Tot een bepaalde hoogte, vaak 6 tot 9 verdiepingen (en in geen geval hoger dan 9 verdiepingen) is het doorstaan van uitbrandscenario's vaak niet vereist. Dit komt ongeveer overeen met de reikhoogte van de brandweer.
- Het vereisen van het doorstaan van uitbrandscenario's is gerelateerd aan de mogelijkheid dat de brandweer besluit geen binneninzet uit te voeren (om veiligheidsredenen). Aangezien het volledig uitbranden een langdurig proces is, heeft het wellicht weinig verband met de relatief kleine verschillen in de opkomsttijd.
- Voor het doorstaan van een natuurlijk brandverloop in de Verenigde Staten en Canada is een tijdsgrens van de natuurlijke brand van 4 uur gebruikt als basis van de bouwregels. Overblijvend smeulen na deze periode is geaccepteerd.
- Geen enkel van de genoemde landen heeft voorgeschreven oplossingen waarbij zichtbaar hout boven 12 verdiepingen wordt geaccepteerd.
- Er is geen regelgeving gevonden waarbij de eis voor het doorstaan van een natuurlijk brandscenario vervalt door de toepassing van een sprinklersysteem.

5.10 Relatie tussen brandwerendheid & het doorstaan van uitbrandscenario's

Zoals uitgelegd in paragraaf 5.1.5 is de relatie tussen de brandwerendheid en de capaciteit van een gebouw om uitbrandscenario's te doorstaan niet eenvoudig. Dit geldt des te meer voor gebouwen met een brandbare constructie. De gevonden literatuur die dit verband aangeeft is hieronder besproken voor onbrandbare constructies en voor massief houten constructies.

5.10.1 Onbrandbare constructies

De brandwerendheid die nodig is om een volledige natuurlijke brand te doorstaan is afhankelijk van het verloop van de natuurlijke brand, welke afhankelijk is van factoren zoals de vuurlast en de ventilatiecondities. Daarnaast speelt een risicoafhankelijke veiligheidsmarge een rol. Het enige overzicht dat is gevonden dat een relatie aanduidt tussen (1) de brandwerendheidseis, (2) vuurlast, (3) risico's en (4) een prestatie-eis is gevonden in de Zweedse regelgeving EKS11 (2020). Tabel 6 laat dit verband zien voor gebouwen tot en met 16 verdiepingen met uitzondering van gebouwen met gebruiksfuncties met een verhoogd risico (*e.g.* ziekenhuizen en gevangenissen). Ook zijn eventueel gereduceerde brandwerendheidseisen voor gebouwen met sprinklers aangegeven. Net als in andere Europese landen wordt over het algemeen de Eurocode 1 reductie-coëfficiënt van 0.61 gebruikt om de vuurlast te verlagen in het geval het doorstaan van een natuurlijke brand moet worden aangetoond in brandcellen met sprinklers.

Brandveiligheidsklassen gelden per constructief element gerelateerd aan het risico, bijv. de hoofdconstructie kan een hogere eis hebben dan de secundaire constructie. De brandveiligheidsklasse van een constructief element is ook afhankelijk van de bouwklasse, welke in sommige gevallen wordt bepaald door de gebruiksfunctie.

Tabel 6: Brandwerendheidseisen en alternatieve prestatie-eisen voor gebouwen over het algemeen tot en met 16 verdiepingen hoog, in de Zweedse regelgeving, EKS11

		Optie 1: constructieve brandwerendheid (minuten)			Optie 2: prestatie-eis
Brand-veiligheids-klasse	Voorbeelden van constructieve elementen met indicatie van gebouw hoogte	Normale vuurlast ≤ 800 MJ/m ²	hoge vuurlast ≤ 1600 MJ/m ²	erg hoge vuurlast > 1600 MJ/m ²	eis voor een natuurlijk brandverloop
1	• Dakvoet ≤ 4 verdiepingen	-	-	-	-
2		R 15	R 15	R 15	15 minuten
3	• Dakvoet > 4 verdiepingen (EI 30 i.p.v. R 30) • Losstaande balkons	R 30 (R 15*)	R 30 (R 15*)	R 30 (R 15*)	30 minuten
4	• Kolommen en balken van de hoofddraagconstructie 3-4 verdiepingen • Vloeren en muren van de hoofdraagconstructie 4-8 verdiepingen	R 60	R 120 (R 90*)	R 180 (R 120*)	Volledig brandverloop
5	• Kolommen en balken in de hoofddraagconstructie > 4 verdiepingen • Vloeren en muren in de hoofddraagconstructie > 8 verdiepingen	R 90 (R 60*)	R 180 (R 120*)	R 240 (R 180*)	Volledig brandverloop vuurlast verhoogd met 50%

* Verlaagde brandwerendheidseis geldt voor gebouwen met sprinklers

Hoewel de achtergrond van de tabel nog niet achterhaald is door de auteurs, zijn er een aantal interessante observaties te maken op basis van de tabel. De Zweedse regelgeving gaat er namelijk vanuit dat:

- dat in gebouwen vanaf 5 verdiepingen de hoofddraagconstructie over het algemeen een volledige brand moet kunnen doorstaan;
- het voldoen aan een 60 minuten brandwerendheid bij een normale vuurlast equivalent is aan het doorstaan van een volledig brandverloop.
- een verhoging van de vuurlast met 50% resulteert in een acceptabele veiligheidsmarge voor de meeste gebouwen tot en met 16 verdiepingen hoog
- bezwijken van kolommen een hoger risico en hogere eisen met zich meebrengt dan het bezwijken van andere delen van de hoofddraagconstructie.

Een aanname dat 60 minuten brandwerendheid leidt tot het doorstaan van een volledig brandverloop is ongeveer in lijn met resultaten van zone-model berekeningen van statistisch krachtige branden in gebouwen met een woonfunctie door Brandon *et al.* (2021d). Het is echter te stellen dat dat niet altijd geldt voor gebouwen met een houtconstructie. Compartimentsbrandproeven met een normale vuurlast die in (vaak significant) meer schade resulteerden dan een 60 minuten brandproef zijn bijvoorbeeld gepubliceerd door McGregor (2014), Hoehler *et al.* (2018), Su *et al.* (2018b).

5.10.2 Brandbare constructies

Een probleem met het bepalen van een over het algemeen geldende equivalente brandduur (*i.e.* de brandwerendheidsduur die in dezelfde schade leidt als een volledig natuurlijk brandverloop), is dat een natuurlijk brandverloop in werkelijkheid sterk kan variëren. Een willekeurige brand kan dus niet worden gebruikt om een equivalente brandduur voor algemeen gebruik te bepalen,

De enige studie die hier een antwoord geeft is gepubliceerd door Brandon *et al.* (2021a). Deze studie heeft hetzelfde jaar geleidt tot een versoepeling van de Amerikaanse regelgeving (zie 2024 IBC G147-21 in Tabel 8). In tegenstelling tot voorgaande brandproeven zijn de brandproeven door Brandon *et al.* (2018a) ontworpen met doel om een brand te veroorzaken die krachtiger is dan de overgrote meerderheid van branden die verwacht kunnen worden in echte gebouwen. De testparameters waren bepaald door middel van een Monte-Carlo analyse en een model door Brandon (2018) welke in de conceptversie van de toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022) is opgenomen, waarbij ventilatie eigenschappen van meer dan 700 bestaande brandcompartimenten werden gebruikt als input. Om die redenen geven de proefresultaten in Tabel 7 een indicatie van een algemeen toepasbare equivalente brandwerendheid.

Opmerking(!): Enkel de verkoolde laag geeft niet het hele plaatje. Na dat de verkoolde laag stopt gaat de verzwakking van de rest van de doorsnede een tijd door.

Onderscheid is gemaakt tussen onbeschermde plafonds en onbeschermde wanden, omdat significant meer schade waargenomen was in wanden. De onderste laag van de wanden is gebruikt voor het bepalen van de equivalente brandduur voor wanden omdat de constructieve schade daar het grootst was.

Opmerking(!): De toepassing van Tabel 7 voor algemeen gebruik kan niet worden verantwoord zonder het uitsluiten van een significante toename van de vuurlast tijdens de brand, welke het gevolg kan zijn van delaminatie, wegvallende passieve bescherming, significante verkoling achter gips en het wegvallen van brandscheidingswanden. Een geschikte regelgeving kan gepaard gaan met extra eisen voor lijmen zoals voorgesteld door Brandon, Klippel en Frangi (2021e) en prEN 1995-1-2:2025(E), 2022 en vereiste k-klassen voor bescherming. Het is ook van belang te realiseren dat het voortzetten van lokaal smeulen in de praktijk moeilijk te voorkomen is. Langdurig smeulen kan uiteindelijk doorbranding of instorting veroorzaken (*e.g.* Mindeguie *et al.* 2019). Als dat niet acceptabel is, is doven van het smeulen noodzakelijk.

Tabel 7: equivalente brandwerendheid gebaseerd op enkel de verkoolde laagdikte, afgeleid van proeven door Brandon *et al.* 2021a.

Representatief voor gebruiksfunctie	Zichtbare hout oppervlakte in verhouding tot vloeroppervl.	Gemiddelde dikte verkoolde laag		Equivalente brandduur* gebaseerd op gem. verkoolde laagdikte		Toegepast gips op beschermde houtdelen
		plafond	muren (45 cm van vloer)	plafond	muren (45 cm van vloer)	
Wonen	112% (Test 1)	36 mm	nvt	55 minuten	nvt	2 x 15.9 mm brandgips
	190% (Test 2)	44 mm	76 mm	67 minuten	116 minuten	3 x 15.9 mm brandgips
	200% (Test 3)**	47 mm	88 mm	>71 minuten	>136 minuten	3 x 15.9 mm brandgips
	203% (Test 5)	50 mm	80 mm	77 minuten	123 minuten	3 x 15.9 mm brandgips
Kantoor***	162% (Test 4)	28 mm	65 mm	42 minuten	100 minuten	2 x 15.9 mm brandgips

* Het gebruik van enkel een verkoolde laag geeft geen volledige indicatie over de verzwakking van de constructie. In EN 1995-1-2 (2004) bijvoorbeeld wordt naast een verkoolde laag ook een nul-sterktelaag van de doorsnede afgetrokken om een effectief dragende doorsnede te berekenen. Deze nul-sterktelaag kan groter zijn in een natuurlijk brandverloop (Lange *et al.*, 2015, Brandon *et al.*, 2017). In de studie door Brandon *et al.* 2021a, was de nul-sterkte laag niet bepaald (maar kan alsnog bepaald worden doormiddel van extra data-analyses).

** De verbranding in Test 3 begon te versnellen na een afkoelfase van een paar uur. De brand is vroegtijdig geblust (na 3.5 uur).

*** Het kantoorcompartiment was niet ontworpen met het doel om een hogere schade te ondervinden dan de grote meerderheid van branden in kantoorgebouwen. In plaats daarvan was het ontworpen om representatief te zijn voor bestaande hoge kantoorgebouwen met een massiefhouten constructie.

De versoepeling van de Amerikaanse regelgeving in de 2024 IBC (ICC, 2021) met betrekking tot zichtbaar hout in gebouwen van 6 tot 12 verdiepingen hoog is gebaseerd op Test 1. De resultaten van Test 1 (welke ontworpen was om schadelijker te zijn dan 85% van de verwachte flashover branden met een volledig natuurlijk brandverloop) geven een indicatie dat een brandwerendheid van 60 minuten in de grote meerderheid van gevallen voldoende is voor een onbeschermd massief houten plafond:

- Massiefhouten wanden zijn beschermd.
- Significante verlenging van de brand door delaminatie, van wegvallend gips van de wanden, verkolen van beschermd hout kan worden tegengegaan.

Het toepassen van twee 15.9mm dikke lagen van brandgips en niet-delaminerend CLT was in dit geval voldoende om dit te voorkomen. De 2024 IBC en de ANSI/APA PRG 320 (2019) CLT productstandaard vereisen soortgelijke maatregelen (zie Tabel 8). Voor gebouwen van 6 to 12 verdiepingen is een significante veiligheidsmarge opgenomen wat betreft de draagfunctie, waar een brandwerendheid van 120 minuten is vereist in plaats van de 60 minuten die benodigd is om het overgrote deel van branden te doorstaan.

Test 1, ondersteund door berekeningen, geeft aan dat een verdere vergroting van de zichtbare houtoppervlakte, meer gipslagen vereist om significante inbranding tegen te gaan. Verschillende partijen van de industrie geven aan dat het vereisen van meer dan twee lagen gips nadelen heeft wat betreft de klimaatimpact en de kosten (Chaggaris *et al.* 2021). Opmerkelijk is echter dat in alle vervolgtesten (Test 2, 3, 4, en 5) minder gips was gebruikt, omdat het toepassen van een derde laag gips het mogelijk maakte om veel minder oppervlakte te beschermen en alsnog een volledig brandscenario te doorstaan.

5.11 Voorgeschreven oplossingen in het buitenland

Het meest complete overzicht van bestaande voorschriften is gemaakt door Östman (2022), die de resultaten van een uitgebreide enquête rapporteert. Het overzicht van de regelgeving in 40 landen bevat informatie over:

- De maximale gebouwhoogte van houtconstructies met sprinklers.
- De maximale gebouwhoogte van houtconstructies zonder sprinklers.
- De maximale gebouwhoogte van houtconstructies met behandelde zichtbare houtoppervlaktes.
- De maximale gebouwhoogte van houtconstructies met behandelde zichtbare houtoppervlaktes.
- Eventuele toelating van een op fire-safety-engineering gebaseerde aanpak.

Östman legde haar focus op de zogenaamde reaction-to-fire klassen en de brandwerendheidseisen. De reaction-to-fire classificering wordt onder andere gebruikt voor het (zichtbare) oppervlaktemateriaal. Het doel van vereiste reaction-to-fire classes van het oppervlaktemateriaal is het limiteren van de bijdrage tijdens the beginfase van de brand. Verder worden in een aantal landen lagere reaction-to-fire classes niet toegestaan in specifieke bouwdeelen. Voorbeelden hiervan zijn, het uitsluiten van brandbaar materiaal in de buitenwand van gebouwen over 18m hoog in het Verenigd Koninkrijk en het vereisen van gevelbrandproeven mits alle gevelmaterialen van klasse A of B zijn in Zweden.

Landen, waar de bouwregeling is aangepast op een groot aantal effecten van een mogelijk vergrootte vuurlast, zijn de Verenigde Staten, Canada en Australië. Eisen die zijn aangepast om met deze effecten rekening te houden, hebben onder andere betrekking op de brandwerendheid, passieve brandbescherming, actieve brandbescherming en andere limiterende factoren om versnelde brandontwikkeling tegen te gaan, de prestatie van de

gevel en externe wanden, de evacuatie, de prestatie van houtverbindingen, blusvoorzieningen, en brandveiligheid in de bouwfase. Een overzicht van de constructiemateriaal-afhankelijke eisen gerelateerd hieraan is gegeven in Tabel 8 en Tabel 9.

In Parijs heeft de brandweer zelf een document opgesteld met richtlijnen (prefecture de police, 2021), die tot een onenigheid heeft geleid. Als resultaat pleitte een tiental organisaties voor het versnellen van de bouwregelgeving.

In andere landen zoals Zweden wordt gewerkt aan nieuwe regelgeving. In verband daarmee heeft de vereniging van brandingenieurs (BIV, 2022) een lijst van meer dan 250 vragen opgesteld afkomstig van verschillende stakeholders zoals de brandweer, verzekeraars en ingenieurs, die op dit moment niet beantwoord worden in de regelgeving volgens hen.

In de volgende paragrafen worden de veranderingen van regels en richtlijnen en de achtergrondinformatie die heeft geleid tot deze veranderingen besproken.

Tabel 8: Houtconstructie-gerelateerde eisen in de Verenigde Staten, Canada en Verenigd Koninkrijk

Land	Verenigde staten				Canada	Australië
Bouwregelgeving	IBC 2021			G147-21	2020 NBC	NCC 2019
Bouwklasse	Type IV A	Type IV B	Type IV C	Type IV B	Encaps. MT	Type B or C
Hoogte beschrijving	≤18 verd.	≤12 verd.	≤6, 8 of 9 verd.	≤12 verd.	≤12 verd.	<25m
Brandwerendheidseis (b.w.e.)	vlr. 120 min dak 90 min rest 180 min	dak 60 min, rest 120 min			vlr. 120 min	60, 90 of 120 min hoogte afh.
Brand-bescherming	max. van: - 80 min - 2/3 * b.w.e.	max. van: - 80 min - 2/3 * b.w.e.	Niet afhankelijk van constructie materiaal	max. van: - 80 min - 2/3 * b.w.e. bv. 2x 15.9 mm Type X, laag van 1" op vloer	50 min bv. 2 x 12.7mm type X gips bv. 38mm beton op vlr.	>3 verd.: 30 min bv. Bv 1 x 16mm brandgips Bovenzijde vlr. onbeschermd
Maximaal opp. blootgesteld hout	0%	20% plaf. of 60% van 2 verd.	100%	100% plaf. of 60% van 2 verd.	35% van alle wanden	>3 verd: 0%
Onderlinge afstand blootgestelde vlakken	n.v.t.	4.6 m tussen alle vlakken	geen begrenzing	4.6 m tussen wanden	opp. zelfde richting	n.v.t.
Delaminatie weerstand	PRG 320 (2019) Annex B & 6.2.1-b geclassificeerd				Niet gegeven	
Limitatie van brandontwikkeling	NFPA 13 sprinklers >36m, 2 ^e watertoevoer & 100% inkapseling	NFPA 13 sprinklers >36m, 2 ^e watertoevoer & gedeeltelijke inkapseling	NFPA 13 sprinklers	NFPA 13 sprinklers >36m, 2 ^e watertoevoer & gedeeltelijke inkapseling	Sprinklers & gedeeltelijke inkapseling	Sprinklers

* Tot deze klasse behoren bijv.: hotels met over 4 verd.; Scholen over 1 verd.; Kantoren over 4 verd. en alle gebouwen met de bovenste vloer boven 18 m.

Tabel 9: Houtconstructie-gerelateerde eisen in de Verenigde Staten, Canada en Groot-Brittannië (vervolg)

Land	Verenigde staten				Canada	Australië
	IBC 2021			G147-21		
Bouwregelgeving	Type IV A	Type IV B	Type IV C	Type IV B	2020 NBC	NCC 2019
Bouwklasse	≤18 verd.	≤12 verd.	≤6, 8 of 9 verd.	≤12 verd.	Encaps. MT	Type B or C
Hoogte beschrijving					≤12 verd.	<25m
Limitatie Branddoorslag Verbindingen	Branddichting met ASTM C920 sealant, of ASTM D3498 lijm				Onafh. van materiaal	16mm brandgips
Limitatie brandspreiding holle ruimtes	geen blootgesteld hout in verborgen ruimtes, een onbrandbare bescherm laag is vereist				• brandstops • lengte ≤ 20 m	brandstops voor houtskeletbouw
Blusvoorzieningen	• >36m, 2^e watertoevoer sprinklers • > 4 verd., standpijp*				> 3 verd., Standpijp*	Alleen sprinklers
Brandveiligheid gedurende de bouwconstructie	• Standpijpen en watervoorziening • > 6 verd.: ten alle tijden gips op alle verd. m.u.v. de bovenste vier verd. voordat een nieuw verdieping kan worden gebouwd • > hydranten met een materiaalspecifieke vloei-eis				hydranten met specifieke watervloei	Geen materiaalafh. maatregelen
Eisen gevel	Onbrandbare gevel & 40 min bescherming tussen de gevel en massief hout, bv. 15.9 mm gips van type X				tot 6 verd., ≥90% onbrandb. bekleding of CAN/ULC-S134 test	>3 verd.: alleen onbrandbaar. (niet materiaalafh.)
Evacuatie gerelateerde eisen	• Afstand tot een trappenhuis of uitgang ≤122 m • Bovenste vloer > 23m, volledige onbrandbare constructie voor exit enclosures en liftschachten				onbekend	Geen materiaalafh. maatregelen

* Standpijpen in de Verenigde Staten en Canada zijn afhankelijk van het materiaal. Echter, deze informatie is toegevoegd omdat het van belang kan zijn om een risico van voortdurende branden te mitigeren.

** Tot deze klasse behoren bijv.: hotels met over 4 verd.; Scholen over 1 verd.; Kantoren over 4 verd. en alle gebouwen met de bovenste vloer boven 18 m.

5.11.1 Verenigde Staten

In de Verenigde Staten is de bouwregelgeving afhankelijk van het constructiemateriaal. Zware houtconstructies, vaak kolom-balk constructies behoren tot Type IV, en lichte houtconstructies behoren tot Type V. Deze types van constructie hebben strengere limiteringen dan andere types. De 2021 IBC (International Building Code) van de Verenigde Staten, introduceerde nieuwe constructie types: IV-A, IV-B, IV-C voor massiefhouten constructies en categoriseerde het traditionele constructie type als IV-HT. Tot welke type een gebouw met massiefhout behoort is vooral afhankelijk van de bouwhoogte en voor een deel afhankelijk van de gebruiksfunctie. De verandering betekent dat het bouwlimiet van houtconstructies van 5 verdiepingen is verhoogd naar 18 verdiepingen. Achtergrondinformatie van deze veranderingen is beschikbaar gemaakt op de website van de International Code Council (ICC, 2015) Tall Wood Building Ad-hoc Committee, die in 2015 door de ICC samen was gesteld.

De volgende prestatie-doelen zijn opgesteld door de commissie en vormen de basis voor beslissingen wat betreft de hoogte (Breneman *et al.*, 2019):

- 1 Geen instorting onder redelijke scenario's van volledige verbranding van vuurlast zonder dat automatische sprinklerbeveiliging wordt overwogen.
- 2 Geen ongewoon hoge blootstelling aan straling van het betreffende gebouw naar aangrenzende eigendommen om een risico op ontsteking te vormen bij redelijk ernstige brandscenario's.
- 3 Geen ongebruikelijke reactie van typische stralingsblootstelling van aangrenzende eigendommen om een risico op ontsteking van het betreffende gebouw te vormen onder redelijk ernstige brandscenario's.
- 4 Geen ongebruikelijke toegangsproblemen met de brandweer.
- 5 Evacuatie systemen die zijn ontworpen om de aanwezige personen in het gebouw te beschermen tijdens de ontwerp-ontsnappingstijd met een veiligheidsmarge.
- 6 Zeer betrouwbare brandblussystemen om het risico op instoringen tijdens redelijkerwijs te verwachten brandscenario's te verminderen; de mate van betrouwbaarheid moet in verhouding staan tot de evacuatie tijd (hoogte van het gebouw) en het instortingsgevaar.

De studie door Zelinka *et al.* (2018) samen met ontwikkelingen om van de CLT-productstandaard (ANSI/APA PRG 320, 2018) om CLT delaminatie tegen te gaan, door (op chronologisch volgorde van experimenten) Su *et al.* (2018a), Brandon en Dagenais (2018), Janssens (2017) en Su *et al.* (2018b), spelen een belangrijke rol in het formuleren van de 2021 IBC regels. Een overzicht van de constructiemateriaal-afhankelijke eisen is gegeven in Tabel 8 en Tabel 9.

Onafhankelijk van het constructiemateriaal bevat de IBC 2021 ook eisen voor hooggelegen zolders, waarbij sprinklers, onbrandbaar constructiemateriaal of onbrandbare isolatie zijn vereist. Dit is van belang vanwege de punten besproken in 2.5, 2.13 en 5.2.1.

Voorgestelde aanpassingen G147-21 (ICC, 2021) zijn goedgekeurd door de drie stemrondes van de goedkeuringsprocedure van de International Code Council, en worden geïncorporeerd in de 2024 versie van de IBC. De verandering houdt in dat het gehele plafond blootgesteld mag zijn en geen afstand tussen blootgestelde plafond

oppervlaktes noodzakelijk is. Deze verandering is gebaseerd op meerdere publicaties van een studie door Brandon *et al.* (2021a), te verkrijgen via de RISE website (RISE, 2021). De goedgekeurde veranderingen zijn weergegeven in Tabel 8 en Tabel 9.

Commentaar op de IBC 2021 is gecommuniceerd naar de auteurs van deze literatuurstudie⁴ en betreft de excessieve kosten van gipsbekleding in vooral constructie type IV-A, welke in kaart zijn gebracht door Chaggaris *et al.* (2021), de excessieve kosten en reductie van efficiency gerelateerd aan de eis om massiefhouten elementen voordat CLT-constructie af is, en het bekleden van alle houtoppervlaktes in verstopte ruimtes is een onduidelijke eis en vaak onpraktisch.

5.11.2 Canada

Nadat de 2021 IBC voorstellen waren goedgekeurd in 2019, werden ook Canadese voorstellen goedgekeurd. 2020 NBC (National Building Code Canada), bevat een nieuw type constructie genaamd *encapsulated mass timber construction*. Dit type constructie mag tot 12 verdiepingen toegepast worden, wat twee keer zo hoog is als het constructietype waaronder lichte houtconstructies vallen. De wetenschappelijke achtergrond van de verandering is vergelijkbaar met de verandering in de Verenigde Staten eerder dat jaar. De dunnere vereiste brandbescherming van die studie is afkomstig uit de studie van Su *et al.* 2018b. In hun compartimentsproeven van die studie was er significante inbranding in de met gips beschermde houtconstructie, die de afkoeling van een brand vertraagde. De goedkeuring van het voorstel duidt erop dat deze inbranding acceptabel was bevonden tot een hoogte van 12 verdiepingen, in combinatie met alle andere maatregelen. De Canadese regels zijn weergegeven in Tabel 8 en Tabel 9.

5.11.3 Parijs

De Brandweer in Parijs heeft een set van eigen richtlijnen opgesteld met de bedoeling die te handhaven in Parijs (Prefecture de police, 2021). De regels suggereren dat enkel in gebouwen van 8 meter of lager (2 verdiepingen) geen specifieke eisen nodig zijn. Voor gebouwen hoger dan 8 meter moeten de verticale vluchtroutes geconstrueerd zijn met onbrandbare materialen. Van 8 meter tot en met 18 meter is of een inkapseling vereist of een actieve brandbescherming vereist (zoals sprinklers). Voor gebouwen hogere gebouwen nemen de maatregelen stap voor stap toe.

5.12 Voorbeeld praktijkaanpak in Nederland

Alle projecten en gebouwontwerpen zijn anders. Ook zijn er verschillende manieren om de brandveiligheid te waarborgen. Door de brandveiligheidsrisico's van bouwen met hout is een integrale, multidisciplinaire ontwerpaanpak vereist. Een voorbeeld van het brandveiligheidsontwerp in een houten gebouw is beschreven door een korte samenvatting van de maatregelen in het gebouw HAUT in Amsterdam. HAUT is een

⁴ Er zijn geen geschreven referenties en de auteurs willen de personen die het commentaar hebben geuit niet benoemen. Desondanks is het commentaar toegevoegd omdat het van belang kan zijn voor de ontwikkeling van een haalbare regelgeving.

woontoren van 73 m hoog, van ontwikkelaar Lingotto en architectenbureau Team V dat is opgeleverd in Januari 2022.

Het brandveiligheidsontwerp van HAUT is gedaan door Ingenieursbureau Arup. Het ontwerp is tot stand gekomen door een integrale ontwerpaanpak. Om een zo compleet mogelijk beeld te verkrijgen van de brandscenario's en de bijbehorende risico's, zijn verschillende berekeningsmethoden gebruikt en zijn er verschillende gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. De resultaten zijn met internationale experts geanalyseerd. Op basis hiervan is in overleg met de opdrachtgever en het ontwerpteam een passend maatregelenpakket voorgesteld met onder andere een watermist sprinklerinstallatie, woning scheidende hybride houten vloeren met een brandwerendheid van 90 minuten en melamine verlijming en het brandwerend beschermen van CLT wanden. Voor de bescherming van deze wanden en het effect van de verlijming van het CLT is uitvoerig onderzoek gedaan en zijn de verwachtingen gevalideerd door middel van brandproeven.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Stand van zaken

De opkomst van moderne hogere gebouwen met een houten constructie heeft geleid tot vragen over de brandveiligheid van deze gebouwen. Dergelijke vragen richten zich op constructieve veiligheid, vluchtveiligheid en het vermogen om branduitbreiding te beperken.

In de afgelopen 17 jaar is het bekende hoogterecord van houten gebouwen gestegen van 5 naar 25 verdiepingen. Het aantal hogere gebouwen nam toe en de omzet van de houtbouwsector is in die tijd exponentieel gegroeid.

Tot ongeveer 10 jaar geleden was veel van het brand gerelateerde houtonderzoek gericht op brandwerendheid. Het gebruik van het bestaande brandwerendheidsraamwerk was voor hout tot die tijd geaccepteerd. Echter, tot die tijd bestonden houten gebouwen meestal niet uit meer dan drie of vier verdiepingen.

Het toenemende aantal houten gebouwen vanaf die tijd met hogere risico's heeft geleid tot vragen over de brandveiligheid. Het afgelopen decennium is een aanzienlijk aantal onderzoeksprojecten uitgevoerd om antwoorden te vinden op vragen over het brandverloop en het veiligheidsniveau in houten gebouwen. Het aantal onbeantwoorde vragen is echter nog steeds groot.

Dit rapport presenteert een literatuurstudie om brandveiligheidsrisico's, mogelijke oplossingen, bepalingsmethoden en hiaten in de regelgeving te identificeren. De belangrijkste bevindingen zijn hier samengevat. Tevens zijn er ook aanbevelingen gegeven voor een totale aanpak.

6.2 Algemene conclusie

In opdracht van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) en in overleg met de werkgroep 351 007 00 07 'Brandveiligheid en bouwen met hout', heeft RISE met medewerking van Arup en TNO een literatuurstudie uitgevoerd. Deze literatuurstudie is een eerste van meerdere te nemen stappen om antwoord te kunnen geven op vragen en motie nr. 28325-220 d.d. 20 april 2021 van de Tweede Kamer. In de motie wordt geconstateerd dat er voor nieuwe hoogbouw steeds vaker nieuw of hernieuwd bouw materiaal, zoals hout, wordt gebruikt waarop het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving nog niet is toegerust. De regering wordt verzocht om te bezien of het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving toevoeging behoeft, en zo ja welke, zodat ook aan het gebruik van nieuwe bouwmaterialen adequate brandveiligheidseisen worden gesteld.

De werkgroep van NEN heeft een onderzoeksvoorstel opgesteld dat bestaat uit drie stappen met het doel antwoord te geven op de volgende vragen:

- Welke rol kan Fire Safety Engineering (FSE) spelen bij de aanpak van het extra brandgevaar van houten gebouwen?

- Is het uitbrandscenario scenario zoals we dat nu kennen 1:1 van toepassing op houten constructies?
- Welke beheersmaatregelen kunnen op korte termijn worden geïmplementeerd?

Dit literatuuronderzoek (stap 1) heeft als doel specifieke punten te identificeren die aandacht behoeven om te zorgen voor brandveilige houtconstructie. Het onderzoek geeft op basis van literatuur inzicht in nut, achtergronden, noodzaak en relevantie van gebruik van bestaande beoordelingsmethoden en de uitgangspunten daarin.

De vervolgstappen 2 en 3 van het onderzoeksvoorstel omvatten in de literatuurstudie geïdentificeerde punten die aandacht behoeven: aanpassing van de Nederlandse bouwregelgeving en bestaande normen, zoals NEN 6068, NEN 6069 en de Eurocodes 1995-1-2, 1991-1-2 en de in de Eurocode 1995-1-2 aangeduide bepalingsmethode, NEN-EN 13381-7.

Uit deze literatuurstudie blijkt:

1. De huidige brandveiligheidseisen uit het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving zijn niet in alle situaties adequaat voor de massieve houtconstructies.
2. De prestatie-eisen uit het Bouwbesluit / Besluit Brandveiligheid Leefomgeving zijn niet altijd geschikt voor het gebruik van massieve houtconstructies.
3. De prestatie-eisen houden onvoldoende rekening met eventueel verhoogde risico's van het bouwen met grote hoeveelheden brandbare houten bouwmaterialen. Deze verhoogde risico's zijn hieronder samengevat:
 - a. De houten bouwconstructies dragen bij aan de hogere vuurlast en een langere brandduur met een hoger vermogen en intensiteit.
 - b. Het doorbranden van de bouwconstructie tijdens de brand.
 - c. Het doorbranden van de brandscheidingen tijdens de brand.
 - d. Het risico op brandoverslag via uitslaande vlammen.
4. Wanneer de huidige prestatie-eisen uit het Bouwbesluit en BBL worden toegepast voor gebouwen met de nieuwe houten bouwsystemen dan levert dit voor die gebouwen een mogelijke onderschatting van het bereikte veiligheidsniveau, en wordt er niet altijd aan de functionele eisen van het Bouwbesluit en BBL voldaan.
5. De wijze van testen en classificering voor brandwerendheid van constructies is gebaseerd op het standaardbrandverloop welke niet altijd representatief is voor een werkelijke brand in een houten gebouw.
6. Het blussen van een brand vergt mogelijk extra inzet, middelen en aandacht van de brandweer voor wat betreft het blussen en volledig doven van smeulende resten in het gebouw en in de bouwconstructie. Gebouwen met een veelal houten bouwconstructie en andere brandbare onderdelen zoals gevels en isolatie hebben, zonder begrenzend maatregelen, een aanzienlijk hogere vuurbelasting.
7. Het huidige bouwbesluit en de inzet en middelen van de brandweer gaan ervan uit dat de brand beperkt blijft tot het brandcompartiment gedurende de brand.

Met behulp van een fire safety engineering aanpak kunnen op een integrale wijze passende beheersmaatregelen worden gevonden voor de verhoogde brandrisico's in gebouwen met een massieve houtconstructie waarmee kan worden voldaan aan de gestelde functionele eisen uit de bouwregelgeving ten behoeve van veiligheid van personen, de brandweer en belendende percelen. Dit vergt echter een gedegen

inspanning en kennis bij zowel de aanvrager als de toetsende instanties. Hiervoor dienen aanvullende richtlijnen te worden uitgewerkt. Als alternatief kan er een integraal raamwerk worden opgesteld waarbij specifieke eisen en bepalingsmethodes en/of voorgeschreven oplossingen worden gegeven die in het overgrote deel van de gebouwen zullen voldoen aan de functionele eisen. In het raamwerk, zullen naast brandwerendheidseisen ook eisen voor brandbescherming en de prestatie van de massiefhouten materialen gesteld moeten worden.

6.3 Verhoogde risico's en extra uitdagingen

Verhoogde risico's en extra uitdagingen gerelateerd aan hout die in het literatuuronderzoek zijn geïdentificeerd, zijn afhankelijk van het constructietype. Bij het overzicht in dit hoofdstuk is een indicatie van relevante typologieën gegeven.

6.3.1 Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand

Een analyse van de bouwregelgeving in verschillende landen laat zien dat het voorkomen van uitbrandscenario's vaak een vereiste is voor gebouwen die binneninzet van de brandweer nodig kunnen hebben (bijv. omdat het hoger is dan 6 tot 8 verdiepingen). Ook voor lagere gebouwen met mogelijk hogere consequenties en risico's (zoals ziekenhuizen, gevangenissen, gebouwen met kolommen als hoofddraagconstructie) kunnen aanvullende prestatie-eisen gelden.

De volgende risico's en uitdagingen met betrekking tot het voorkomen van uitbrandscenario's zijn geïdentificeerd:

- Het voorkomen van uitbrandscenario's kan niet worden gegarandeerd met alleen een brandwerendheidseis. Dit komt doordat de brandwerendheidseis geen begrenzing van de energiebijdrage (*i.e.* vuurlast) van de constructie garandeert. Ook een vereiste brandklasse van het blootgestelde oppervlak garandeert geen beperkte brandstofbijdrage van de constructie in het geval van flashover.
- CLT delaminatie kan ervoor zorgen dat (a) een brand op een intens niveau voortduurt, of (b) een brand opnieuw verheft na een periode van afkoeling.
- Wegvallend gips kan ervoor zorgen dat een brand op een intens niveau voortduurt of de brand opnieuw verheft.
- Te veel blootgesteld hout kan ervoor zorgen dat de brand niet dooft. In dat geval is de energiebijdrage van het hout dusdanig dat hoge temperaturen blijven en inbranding zich voortzet. Hoeveel hout zichtbaar kan worden gelaten is sterk afhankelijk van de grootte van ventilatieopeningen.
- Na de brand en na het verkolen wordt de constructie verder verzwakt door het doorwarmen, dit is vooral significant bij kolommen.
- Sprinklers kunnen een significante brandontwikkeling voorkomen en daarmee het beperken van uitbrandscenario's realiseren. Er is echter geen consensus over hoe rekening kan worden gehouden met de betrouwbaarheid van sprinklers in gebouwen met een houtconstructie. In geen van de geanalyseerde bouwregelgevingen van andere landen vervalt de eis om uitbrandscenario's te weerstaan door het toepassen van sprinklers.

- Constructietypologieën: Het weerstaan van uitbrandscenario's is het meest onderzocht voor massief houten constructies. Het doorstaan van uitbrandscenario's in houtskeletbouw constructies is in veel mindere mate onderzocht. Wellicht zal het aantal houtskeletbouw constructies dat buiten de reikhoogte van de brandweer valt gelimiteerd zijn.
- Functie typologieën: Onderzoek heeft zich vooral gericht op gebouwen met een woonfunctie. De laatste twee jaar zijn er onderzoeken uitgevoerd die zich richten op gebouwen met een kantoorfunctie. Onderzoeken voor de meeste andere functies zoals een winkelfunctie zijn niet uitgevoerd.

6.3.2 Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw

De volgende risico's en uitdagingen met betrekking tot het begrenzen van verdere branduitbreiding buiten het compartiment en het begrenzen van schade zijn geïdentificeerd:

- Brandvoortplanting via de gevel in hoge gebouwen heeft tot een groot deel van de meest significante brandongevallen geleid. Brandvoortplanting via de gevel is ook geïdentificeerd als één van de hoofdoorzaken van excessieve financiële brandschade. In gebouwen met een verhoogde vuurlast (dus mogelijk houtbouw), kan het blootstellen van de gevel aan brand verhoogd worden. Relevante data zijn beschikbaar. Ook is er een vergelijking met bestaande standaard gevel proeven gemaakt. Deze vergelijking resulteerde in een recentelijk voorgestelde gevelbrandtestmethode t.b.v. een verdere harmonisering binnen Europa
- Een gevelsysteem dat zonder houtconstructie wordt getest kan toegepast worden op een houtconstructie. Zonder een eis van de isolatiewaarde van een gevelsysteem of bescherming tussen het gevelsysteem en de houtconstructie, is er geen garantie dat de houtconstructie niet bijdraagt aan de externe vuurlast.
- Het risico voor brandoverslag naar andere gebouwen of naar de bovenliggende verdieping (vlamoverslag die op ramen of andere delen inslaat) kan vergroot worden door de extra vuurlast. Onderzoekers hebben aangetoond dat het voorkomen van brandoverslag door niet-brandwerende-ramen van bovenliggende verdiepingen enkel kan worden bereikt door middel van strikte architectonische begrenzingen. Omdat in veel gevallen geen van beiden wordt toegepast is het indirect toegelaten dat de brand kan overslaan. Het risico voor brandoverslag naar bovenliggende verdiepen wordt vergroot met een grotere vlamuitslag. In Nederland wordt dit risico geanalyseerd op basis van de NEN 6068:2020. Het is onduidelijk of deze extra vuurlast binnen deze norm valt. Aanvullend zal door het mee kunnen branden van de constructie een andere brand dynamiek optreden dan het model als basis hanteert.
- In compartimenten met een houtconstructie kan de vuurlast significant toenemen. Dit vergroot de uitdaging om de brandwerendheid van scheidingswanden te verbeteren om uitbrandscenario's te weerstaan. Als een scheidingswand instort, leidt dit mogelijk tot een nieuwe vuurlast in het originele compartiment. Onderzoek wijst uit dat een dergelijke toename van de vuurbelasting tijdens de brand de kans op het weerstaan van een uitbrandscenario verkleint.

- Er is geen standaard brandwerendheidsproef voor hoekverbindingen, wellicht vanwege de lagere blootstelling aan brand in deze locatie voor onbrandbare constructies. Compartmentproeven van massieve houtconstructies wijzen er echter op dat branduitbreiding buiten het compartiment relatief makkelijk plaatsvindt via hoekverbindingen. Onderzoek duidt erop dat dit veroorzaakt wordt door een stroom van hete gassen, die lokaal in de verbinding op den duur verbranding veroorzaken. Daarom is het, nog meer dan in conventionele bouw, van belang is om een luchtdichte verbinding te realiseren.
- Er is een bekend risico voor een versnelde brandspreiding in grote compartimenten met blootgesteld hout. Dit is mogelijk ook een realistisch scenario voor een atrium met blootgesteld hout. Omdat atriums meerdere verdiepingen verbinden is er een mogelijk kans op significante branduitbreiding. Er zijn geen onderzoeken gedaan hiernaar.
- Branduitbreiding door holle ruimtes is geïdentificeerd als een van de hoofdoorzaken van excessieve schade in vooral houtskeletbouw. Deze vorm van branduitbreiding was vooral geobserveerd in brandincidenten van stick built (1D) en modulaire (3D) houtskeletbouw. In modulaire houtskeletbouw was de branduitbreiding door modules waargenomen. In veel van de gevallen waarbij een significante branduitbreiding door holle ruimtes was geïdentificeerd ging het gehele gebouw verloren.
- Analyse duidt erop dat een van de meest significante katalysatoren voor branduitbreiding, brandvoortplanting door een gedeelde zolder is. De brand ontstaat zelden op de zolder, maar plant zich vaak voor via een balkon of gevel door de dakvoet, via het dak zelf of via holle ruimtes naar de zolder. Brandstops in de dakvoet, in holle ruimtes en tussen holle ruimtes en de zolder zijn daarom belangrijk om excessieve branduitbreiding te voorkomen.
- Een materiaalafhankelijke analyse van gevallen van progressive collapse in middelhoog en hoogbouw veroorzaakt door brand, duidt erop dat er een sterke correlatie is met een grote branduitbreiding. Dit duidt erop dat het begrenzen van branduitbreiding indirect het risico van progressive collapse vermindert. Er zijn echter geen bepalingsmethoden gevonden om dit mee te nemen.
- De branduitbreiding in gebouwen met een houtconstructie is in een aantal studies vergeleken met de branduitbreiding in gebouwen met andere constructies. Deze vergelijkingen duiden erop dat de conclusies verschillen per land. In alle waarschijnlijkheid zijn verschillen in bouwregelgeving en bouwcultuur hier een oorzaak van.
- In een aantal landen maar niet alle landen, is een significant grotere branduitbreiding in houtbouw geïdentificeerd. Dit verschil was echter niet significant voor gebouwen hoger dan 4 verdiepingen. In de analyses van hogere gebouwen worden echter een groep met relatief jonge gebouwen vergeleken met een groep van gemiddeld oudere gebouwen.
- De Canadese statistieken duiden erop dat een eventueel statistisch verschil insignificant is als wel of geen sprinklers worden toegepast.
- De verzekeraarsbranche geeft aan bang te zijn voor waterschade die aangericht kan worden door sprinklers. Uit een Amerikaanse database van brandincidenten die tot grote schadegevallen of dodelijke slachtoffers hebben geleid, is de financiële schade na ongevallen vergeleken. Ondanks het begrensde aantal incidenten, duidt de analyse op relevante conclusies:
 - Geen verschil kan worden aangetoond tussen de financiële schade in (1) compartimenten met sprinklers en gerapporteerde significante waterschade en

- (2) compartimenten zonder sprinklers waarbij de brand niet buiten het compartiment was gespreid en een significante waterschade was gerapporteerd.
- Een vergelijking toonde een extreem groot verschil aan tussen de financiële schade in (1) compartimenten met sprinklers en gerapporteerde significante waterschade, en (2) compartimenten zonder sprinklers waarbij de brand significant uitbreidde. Dit duidt erop dat door het aangetoonde vermogen van sprinklers om brandspreiding te verminderen, de toepassing van sprinklers extreem grote financiële schade (tot honderden miljoenen dollars per incident) kan vermijden.
- In de Zweedse data-analyse zijn gebouwen van hetzelfde hoogtedomein (3 tot 8 verdiepingen) en dezelfde leeftijd vergeleken. Ondanks enkele uitschieters van branduitbreiding in houtbouw was er geen statistisch significant verschil van het risico op branduitbreiding buiten het brandcompartiment aan te tonen. Wel duidt een individuele analyse van een aantal van deze uitschieters erop dat de branduitbreiding te maken heeft met de aanwezigheid van brandbaar materiaal in de constructie.
- Constructie typologieën: Brandspreiding door holle ruimtes kan in elk gebouw met brandbare materialen in holle ruimtes gebeuren. Houtskeletbouw bevat vaak meerdere van zulke holle ruimtes en is daarom gevoeliger voor deze vorm van branduitbreiding. Dit geldt ook voor modulaire constructies waarbij holle ruimtes aanwezig kunnen zijn tussen geprefabriceerde modules.

6.3.3 Voorkomen brandoverslag naar derden en buurpercelen

Onderzoek toont aan dat de bijdrage van de permanente vuurlast, de warmtestraling naar nevenstaande gebouwen verhoogd. Op een afstand van 8 meter was de gemeten straling voor statistisch krachtige brandscenario's waarbij massief hout werd blootgesteld ruim onder de kritische waarden van een aantal landen.

6.3.4 Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw

Het stromen van hete gassen door verbindingen, doorvoeringen en andere details met houten bouwdeelen, kan naast rookverspreiding ook leiden tot extra rookproductie en brandverspreiding. Proeven toonde aan dat luchtdichtheid in zulke details een belangrijke rol speelt in het beperken van rookverspreiding.

6.3.5 Veilig vluchten

De volgende risico's en uitdagingen met betrekking tot het begrenzen van brandontwikkeling en veilig vluchten zijn geïdentificeerd:

- Het risico voor flashover wordt verhoogd en de tijd tot flashover wordt mogelijk verkort door de aanwezigheid van onbehandeld blootgesteld hout.
- In compartimenten met zichtbaar onbehandeld hout is de brandontwikkeling mogelijk significant sneller dan is aangenomen in Eurocode 1. Dit kan vooral het geval zijn voor grote compartimenten.

- Een groot compartiment (ook bijv. een atrium) met blootgesteld hout zal om die reden grote risico's met zich mee kunnen brengen. Echter weinig onderzoek is uitgevoerd naar grote compartimenten met blootgesteld hout. Met een blootgesteld plafond kan een brand zich binnen een aantal seconden spreiden door een groot compartiment. Dit zal de beschikbare evacuatie tijd verlagen. Het is niet bekend hoe dit meegenomen moet worden in ASET-RSET analyses. Onderzoek naar veilige compartimentafmetingen zijn nog niet uitgevoerd.
- De betrokkenheid van hout in brand kan de rookontwikkeling beïnvloeden. Sprinklers kunnen effectief zijn om de rookontwikkelingbijdrage van de houten constructie te begrenzen.
- De invloed van een impregnering, brandvertragende lak of opschuimende verf, op de verdere branduitbreiding in geval van een flashover (die ook veroorzaakt kan worden door de variabele vuurlast) in massief houten brandcompartimenten is niet onderzocht. Ondanks dat worden ze in de praktijk wel toegepast met het doel een snelle branduitbreiding in een compartiment te voorkomen.
- Sprinklers helpen om brandontwikkeling tegen te gaan. Slechts 1 nog niet gepubliceerd onderzoek naar de effectiviteit van sprinklers met blootgesteld massief hout is geïdentificeerd.
- Er is geen onderzoek gedaan naar branduitbreiding in vluchtroutes met blootgesteld houten oppervlakte dat voldoet aan de gesteld brandklasse.
- Constructietypologie: Een vergroot risico op een versnelde brandontwikkeling is aanwezig in alle compartimenten met onbehandelde houten elementen. Dit wordt regelmatig toegepast in gebouwen met massiefhouten constructies.
- Gebruiksfuncties: Omdat binnen het brandcompartiment de beschikbare tijd om veilig te vluchten kan verkorten bij toepassing van onbehandelde houten elementen is het van belang om deze vermindering in acht te nemen. Dit speelt vooral een rol bij compartimenten waarin de mogelijkheden van evacuatie beperkt zijn (bijvoorbeeld in grote compartimenten met een lange route naar de uitgang; compartimenten met één uitgang, en compartimenten met een gezondheids- of cel functie).

6.3.6 Uitvoeren van reddingswerkzaamheden

De volgende risico's en uitdagingen met betrekking tot repressie zijn geïdentificeerd:

- De eventueel verhoogde vuurlast in gebouwen met houtconstructies kunnen leiden tot een versnelde brandontwikkeling, een krachtigere brand, een langere brandduur en eventueel het niet constructief kunnen weerstaan van uitbrandsenario's. Voor succesvolle brandweerinzet is het van belang hier rekening mee te houden.
- In massief houten constructies is het mogelijk dat een tweede flashover ontstaat door delaminatie of het wegvallen van gips. Dit zou brandweerinzet kunnen bemoeilijken.
- Ook als er ontworpen is voor het doorstaan van uitbrandsenario's, is het waarschijnlijk dat de constructie blijft smeulen in sommige details. Smeulen kan zich lang voortzetten en op de lange duur leiden tot doorbranden of bezwijken. Als dit niet acceptabel is, is een

check op nasmeulen noodzakelijk. Dit kan worden gedaan door middel van infraroodcamera's.

- Voortgezet smeulen na de brand is in onderzoeken vaker geobserveerd achter brandbescherming (incl. holle ruimtes) en in verbindingen.
- Prestatie-eisen gerelateerd aan het doorstaan van uitbrandscenario's zijn vaak verbonden aan de reikhoogte van de brandweer.
- Bij branden in holle ruimtes van de constructie is de brandweerinzet zeer uitdagend vanwege de met het oog onzichtbare locatie en de onbereikbaarheid. Een volledige brandweer inzet voor zulke brandincidenten heeft bij verschillende branden in de praktijk enkele uren tot meer dan een dag geduurd.

6.3.7 Brandveiligheid tijdens bouwconstructie en uitvoering

De volgende risico's en uitdagingen met betrekking tot de impact tijdens de bouwfase zijn geïdentificeerd:

- Een significant verhoogd risico op extreem grote brandvoortplanting en -uitbreiding is aangetoond in een statistisch onderzoek waarin een vergelijking is getrokken tussen brandschade gevallen tijdens de bouwconstructie van (1) houtbouw en (2) conventionele bouw.
- Er zijn voorbeelden waarbij de brand oversloeg op nevenstaande gebouwen

6.4 Aanbevelingen voor ontwerpen en maatregelen voor ontwerp houten gebouwen

6.4.1 Algemene aanbeveling voor het voldoen aan relevante prestatiedoelen met een integrale aanpak

Zoals besproken in hoofdstuk 2, is de (verhoogde) vuurbelasting die een houtconstructie kan bijdragen afhankelijk van meerdere factoren, zoals de oppervlakte van het blootgestelde hout, de bescherming van het niet-blootgestelde hout, de ventilatieomstandigheden, enz. Deze verhoogde vuurlast kan verschillende gevolgen hebben, zoals een vermindering van de beschikbare evacuatie tijd, meer constructieve schade, verhoogd risico op branduitbreiding, en een verhoogde blootstelling aan externe gebouwen en de gevel.

Relevante prestatiedoelen geïdentificeerd in de regelgeving van een aantal andere landen zijn:

(1) zowel de brandwerende scheidingen, alsmede de brandwerendheid van de draagconstructie moeten **het volledige uitbrandscenario kunnen weerstaan, rekening houdend met de extra vuurbelasting in de permanente draagconstructie. Het gaat om het weerstaan van uitbrandscenario's**, welke volgens de analyse in 5.9 in meerder landen wordt toegepast voor gebouwen waarbij

binneninzet van de brandweer benodigd kan zijn om de brand te blussen, zoals bij hoge gebouwen vanaf ongeveer zes tot acht verdiepingen en grote gebouwen.

(2) er dient vooraf en bij de vergunningaanvraag met het bevoegd gezag te worden afgestemd voor welke gebruiksfuncties, omvang van brandcompartimenten en gebouwhoogtes, de brandweer op basis van zijn huidige ervaringen en capaciteit, de aanvullende risico's van het bouwen met hout een brand kan beheersen. Er dient **voldoende tijd aan de brandweer te worden geboden om in te grijpen en in de tussentijd de brand voldoende onder controle te houden**, welke volgens de analyse in 5.9 in meerdere landen wordt toegepast voor gebouwen waarbij de brand van buitenaf bereikt zou kunnen worden.

Zoals besproken in 3.5 duidt de achtergrondinformatie op prestatiedoelen die erop gericht zijn om volledige brandscenario's te doorstaan en een de brand beperkt houden tot een vooraf bepaald gebied (brandcompartiment). Hierbij dient de mogelijkheid geboden te worden aan de brandweer om de brand binnen 60 minuten onder controle te krijgen.

Een prestatiedoel dat niet aan bod komt in de regelgeving van een aantal andere landen, maar die wel van belang is voor een totale aanpak, is gericht op het beperken van het risico van brandoverslag naar een bovenliggende verdieping door vlamuitslag. Zoals besproken in 2.4.2 is er geen duidelijkheid over een geaccepteerde uitkomst.

Om prestatiedoelen te kunnen bereiken, is een balans nodig tussen het beperken van de bijdrage van hout aan de vuurlast en het weerstaan of opvangen van de effecten ervan. Dit betekent dat meerdere brandveiligheidsmaatregelen simultaan moeten worden geïmplementeerd om zodanig de van belang zijnde prestaties te bereiken.

Bij een efficiënte totaalaanpak hoeft het gebouw idealiter niet altijd ontworpen te zijn voor het meest extreme scenario. Zo zouden voor een beperkte vuurlast bijdrage van hout ook minder maatregelen nodig moeten zijn om de effecten van de beperktere extra vuurlast te weerstaan.

Een adequate totaaloplossing hoort ook rekening houden met verhoogde risico's met grotere veiligheidsmarges.

De totaaloplossing moet ook de voordelen van automatische blusinstallaties meenemen en tegelijkertijd rekening houden met de betrouwbaarheid van de werking.

Als de prestatiedoelen duidelijk zijn, kan door middel van onderzoek worden bepaald welke set van voorschriften nodig zijn om deze doelen te behalen. In 5.10.2 is een voorbeeld gegeven waarbij een prestatiedoel vertaald is naar een set van eisen. Dit voorbeeld omvat een probabilistische aanpak die suggereert dat het voorkomen van uitbrandsenario's in de overgrote meerderheid van de verwachte branden de bijvoorbeeld de volgende combinatie vereist:

(1) Beperking van de brandstofbelasting, door

- Het gebruik van delaminatiebestendig CLT
- Alleen het plafond bloot te stellen
- De muren bedekken met twee brandwerende gipsplaten van 15,9 mm of gelijkwaardig

(2) En het beperken van structurele schade, door:

- 60 minuten brandwerendheid

Aangezien een dergelijke eis over het algemeen relevant is voor hoge gebouwen, en bezwijken hoge consequenties kan hebben, wordt een significante veiligheidsmarge aanbevolen. Het bovengenoemde voorbeeld is de basis voor de versoepelingen van de Amerikaanse regelgeving die in 2021 geaccepteerd was voor gebouwen van 6 tot 12 verdiepingen. Daarom laat de nieuwe regelgeving een zichtbaar plafond toe, vereist het gebruik van delaminatiebestendig CLT en een brandbescherming van 80 minuten (wat equivalent is aan twee brandwerende gipsplaten van 15.9mm). De vereiste brandwerendheid van 120 minuten is echter significant hoger dan blijkt uit de studie welke een ruime veiligheidsmarge aanduidt. Ook is het toepassen van sprinklers verplicht, wat de risico's vermindert en een compensatie biedt voor de mogelijk versnelde brandontwikkeling met een blootgesteld plafond.

Een dergelijke aanpak wordt aanbevolen voor het begrenzen van brandoverslag naar bovenstaande verdiepingen. Echter, consensus over een geschikt prestatiedoel ontbreekt hiervoor.

Mogelijke maatregelen die kunnen worden getroffen om aan prestatiedoelen te voldoen is verder besproken in 6.4.3.

6.4.2 Bepalingsmethoden

Een aantal methoden om een natuurlijk brandontwikkeling te voorspellen is gepubliceerd. Deze modellen zijn onder te verdelen in:

- Een aangepast versie van de parametrische brandcurve, ook inbegrepen in de conceptversie van Eurocode 5, (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022).
- Zone modellen.

Met deze methoden kan een inschatting worden gemaakt van het natuurlijk brandverloop waarbij de vuurlast van hout wordt meegenomen. De methoden kunnen ook worden gebruikt om de draagcapaciteit te bepalen. Hierbij wordt rekening gehouden met de hittegolf die laat tijdens de brand door het hout gaat, maar er is geen rekening gehouden met het eventueel voorzetten van smeulen. Ook houden de modellen geen rekening met lokale versterkte interactie tussen blootgestelde elementen die dicht bij elkaar staan.

De modellen kunnen ook gebruikt worden om te bepalen hoeveel gips nodig is om een oppervlak te beschermen gedurende een volledig brandverloop, en eventuele doorbranding van massief houten elementen voorspellen.

Het bepalen van brandoverslag wordt gedaan op basis van de NEN 6068. Het is onduidelijk of het toevoegen van zichtbaar hout in het brandcompartiment ondervangen is met dit model.

Methoden ontbreken ook voor het meenemen van het effect van impregneren, brandvertragende verf en opschuimende verf.

Gepubliceerde methoden voor het bepalen van de beschikbare tijd voor evacuatie (ASET) in ruimtes met blootgesteld hout zijn niet gevonden. Resultaten van een recent onderzoek duidt erop dat dit een belangrijk aspect is voor grote compartimenten.

6.4.3 Brandveiligheidsmaatregelen

6.4.3.1 Volledig brandwerend beschermen

- Het brandwerend beschermen van de houtconstructie verhoogd de constructieve veiligheid en kan, afhankelijk van onder andere het materiaal, de bijdrage aan de brandontwikkeling en rookvorming verlagen, de beschikbare evacuatietijd verhogen, het risico op brandoverslag verminderen, en de brandblootstelling aan de gevel verminderen.
- Het doorstaan van uitbrandscenario's kan worden gewaarborgd door bescherming gedurende het gehele natuurlijke brandverloop.
- Bescherming gedurende een kortere periode kan worden voorgeschreven om de brandweer voldoende tijd te geven om in te grijpen. Het op den duur neervallen van gips kan echter leiden tot een voortdurende brand of een tweede flashover mits de brandtemperaturen voldoende hoog zijn.

6.4.3.2 Gedeeltelijk brandwerend beschermen

- Het gedeeltelijk brandwerend beschermen van de houtconstructie kan onder andere de bijdrage van de vuurlast van de houtconstructie beperken, het risico op brandoverslag beperken en de brandblootstelling aan de gevel begrenzen. Het is mogelijk om uitbrandscenario's te doorstaan zolang de vuurlast bijdrage van het blootgestelde hout begrensd is en de constructie de extra vuurlast aan kan.
- Het gedeeltelijk brandwerend beschermen van de houtconstructie kan de interactie tussen blootgestelde houtelementen reduceren. Daarmee is het mogelijk het voorkomen van uitbrandscenario's te realiseren. Er is echter weinig kennis over geschikte afstanden tussen blootgestelde delen die benodigd zijn, om deze interactie insignificant te maken.

6.4.3.3 Delaminatiebestendigheid

- Delaminatiebestendigheid kan plotselinge toenames van de vuurlast gedurende een brand voorkomen. Delaminatiebestendigheid kan essentieel zijn om uitbrandscenario's te kunnen voorkomen.
- Delaminatiebestendigheid kan behaald worden door het toepassen van een houtlijm met een hoge brandprestatie en het toepassen van lamellas met een toereikende dikte (maar niet in alle gevallen). De laatste conceptversie van Eurocode 5 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022) bevat een beschrijving van lijmen waarbij delaminatiebestendigheid aangenomen mag worden en beschrijft een proef om delaminatiebestendigheid mee aan te tonen.
- Delaminatie heeft niet altijd significante gevolgen. Dit is vooral het geval in vrij open brandcompartimenten met relatief grote warmteverliezen.

6.4.3.4 Automatische blusinstallatie

Er zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd naar sprinklers in compartimenten met houten constructies. Het ging onder meer om compartimenten met houten oppervlaktes. Alle studies laten een succesvolle beperking van de brandontwikkeling zien en één studie

toont aan dat de leefbaarheidscriteria (met uitzondering van zicht, zie 5.5.5) werden gehandhaafd met behulp van verschillende soorten sprinklers.

Als een automatische sprinklerinterventie succesvol is, kan de brand zich niet noemenswaardig ontwikkelen en wordt voldaan aan alle mogelijk relevante prestatiedoelen. Als de sprinklerinterventie niet succesvol is, moeten de gevolgen nog acceptabel zijn. In plaats van een deterministische visie kunnen de effecten van sprinklers beter worden bekeken aan de hand van statistische gegevens.

Veilig vluchten en persoonlijke veiligheid

Het is aangetoond dat sprinklers het risico op slachtoffers verkleinen. Een Canadese studie toont aan dat dit ook het geval is voor houtconstructies en dat er geen statistisch significant verschil is tussen het risico op doden en gewonden in houten gebouwen met sprinklers en niet-brandbare gebouwen met sprinklers.

Branduitbreiding beperken

Een Canadees onderzoek toont aan dat branduitbreiding statistisch signifikanter kan zijn in houten gebouwen dan in gebouwen van onbrandbare constructie in gebouwen tot 4 verdiepingen hoog. Uit hetzelfde onderzoek blijkt dat dit niet het geval is als alleen gebouwen met sprinklers worden meegenomen. Dit geeft de effectiviteit van sprinklers aan om branduitbreiding te beperken.

Brandschade beperken

Incidenten met hoge financiële schade in gebouwen hoger dan 3 verdiepingen met een houtconstructie zijn vergeleken. De financiële schade is vergeleken voor incidenten met:

- A) sprinkler installaties, gerapporteerde significante waterschade en geen branduitbreiding naar andere compartimenten;
- B) geen sprinkler installaties, gerapporteerde significante waterschade (door brandweer inzet) en geen branduitbreiding naar andere compartimenten;
- C) geen sprinkler installaties, gerapporteerde brandspreiding naar andere compartimenten.

Er is geen statistisch verschil aantoonbaar tussen A en B, maar een erg significant verschil in financiële schade tussen A en C. Samen met de conclusie van de vorige subsectie, geeft dit enige indicatie dat sprinklers significant meer financiële schade kunnen beperken dan veroorzaken. Tevens leiden alternatieve blusmethodes ook tot mogelijke waterschade.

6.4.4 Brandvertragende verf/impregneren

Brandvertragende verf en impregneren kan de bijdrage van de houtconstructie aan de brand- en rookontwikkeling verminderen. Desondanks is er naast het gedrag in de SBI

test weinig bekend over het gedrag van geïmpregneerd of geverfd hout in massief houten compartimenten.

6.4.5 Belangrijke details met betrekking tot het begrenzen van branduitbreiding

Een aantal belangrijke bouwdetails met betrekking tot het voorkomen van excessieve brandspreiding en brandschade zijn:

- De dakvoet en holle ruimtes in de dakconstructie
- Brandstops in holle ruimtes
- Een brandstop tussen holle ruimtes en de zolder

6.5 Wettelijk kader

6.5.1 Constructieve veiligheid en instandhouding draagconstructie bij brand

Het Besluit Bouwwerken Leefomgeving beschrijft in artikel 4.17 een brandwerendheidseis van 60 minuten als tijdsduur in minuten waarbij bezwijken van een bouwdeel optreedt. Echter, deze zou ter discussie moeten worden gesteld voor die situaties waarin de brand pas na langere tijd dooft. Vervolgens zal ook nagegaan moeten worden wat dat dan betekent voor de huidige eisen van 30, 90 en 120 minuten. Daarbij zijn in ieder geval de volgende opties te onderscheiden om daar invulling aan te geven:

- Uitgaan van de achtergrond van de eis voor 60 minuten die uitgaat van het brandscenario (Ministerie van Binnenlandse Zaken, 1994; Instituut Fysieke Veiligheid, 2022). Optie daarbij is om een keuze te maken na hoeveel tijd de brandweer de brand onder controle heeft.
- Een benadering die daadwerkelijk het brandverloop in beschouwing neemt en uitgaat van een probabilistische risicobenadering waarin ook de extra vuurbelasting wordt meegenomen.
- Nader onderzoek naar de effecten van een automatische blusinstallatie mee te nemen in een houten gebouw.
- Accepteren dat een bouwconstructie vroegtijdig bezwijkt bij brand als onderdeel van een integrale aanpak, waarbij de veiligheid van personen en omgeving is geborgd.

Daarbij is wel de opmerking te maken dat er weliswaar een rekenmethode in de Eurocode is opgenomen, maar dat een onderbouwde relatie met de eisen uit het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving nog altijd ontbreekt. Een beschouwing in lijn met de betrouwbaarheidsfilosofie die ten grondslag ligt aan de NEN-EN 1990 (JCSS, 2001) zal nog moeten worden uitgewerkt.

6.5.2 Het beperken van het maximale uitbreidingsgebied van brand binnen het gebouw

De WBDBO (met name. artikel 4.53 van Besluit bouwwerken leefomgeving) is gebaseerd op de brandwerendheidseis van 60 minuten die uitgaat van het brandscenario (Ministerie van Binnenlandse Zaken, 1994). Dit zou ter discussie moeten worden gesteld voor die situaties waarin de brand pas na langere tijd dooft. Daarbij zijn in ieder geval de volgende twee opties te onderscheiden om daar invulling aan te geven:

- Uitgaan van de achtergrond van de eis voor 60 minuten die uitgaat van het brandscenario (Ministerie van Binnenlandse Zaken, 1994). Optie daarbij is om een keuze te maken na hoeveel tijd de brandweer de brand onder controle hebben welke middelen daarvoor benodigd zijn.
- Een benadering die daadwerkelijk het brandverloop in beschouwing neemt en uitgaat van een fire safety engineering aanpak en probabilistische risicobenadering. Daarbij zal nog wel nader onderzoek noodzakelijk zijn die inzicht geeft in het aan te houden criterium. Voor het doel persoonlijke veiligheid wordt daartoe over het algemeen het individuele risico (IR) als criterium genomen en zijn analyses gebaseerd op ASET-RSET berekeningen. Echter daarbij zal wel meegenomen moeten worden welk aandeel van het IR toegekend kan worden aan de maatregelen die genomen worden bij de compartimentering van ruimten (kans dat compartimentering faalt).

Opgemerkt wordt dat dit ook consequenties kan hebben voor de rekenregels voor grote brandcompartimenten volgens NEN 6060 en NEN 6079.

Daarnaast zullen de uitgangspunten van de berekeningsmethode volgens NEN 6068 beschouwd en zo mogelijk herzien moeten worden, waarin de impact van houten wanden en vloeren wordt meegenomen.

6.5.3 Het beperken van rookverspreiding binnen het gebouw

Nagegaan zal moeten worden in hoeverre het brandverloop in geval van houtbouw een grotere rookproductie tot gevolg heeft en wat dit voor consequenties heeft voor de rookwerendheidseisen Ra en R200 volgens NEN 6075 (artikel 4.61 van het Besluit bouwwerken leefomgeving).

6.5.4 Veilig vluchten

Het is te verwachten dat, in geval van houtbouw, er in een vroeg stadium van de brand waarbij wordt gevlucht er meer rook zal zijn dan in de traditionele situatie. De gecorrigeerde loopafstanden (artikel 4.66 van het Besluit bouwwerken leefomgeving) zijn voor een 30 m gecorrigeerde loopafstand gebaseerd op situatie dat mensen gedurende 30 s adem in kunnen houden. Er wordt aanbevolen om aandacht aan de beperking van de zichtlengte te besteden en wat een eventuele invloed daarvan op het vluchten is. Daartoe kan gebruik worden gemaakt van een ASET-RSET aanpak binnen

de context van een integrale fire safety engineering aanpak met een kwantitatieve risicoanalyse.

Ingeval van hulpverlening bij brand is het van belang de toename van de rook mee te nemen. De beschikbare tijd om veilig te kunnen ontruimen zullen beperkter zijn. Dit heeft echter geen gevolgen voor de functionele eis (artikel 6.20 van het Besluit bouwwerken leefomgeving), maar mogelijk dus wel op de prestatie-eisen en feitelijke uitwerking in de praktijk, waarbij een integrale fire safety engineering afweging moet worden gemaakt tussen verschillende ontruimingsconcepten en bijbehorende alarmering in het gebouw.

Wereldwijd zijn er wel verschillende opvattingen over de te hanteren ontruimingsconcepten. Een belangrijk voorbeeld hiervan is de discussie omtrent het 'stay-put' scenario. In Nederland worden verschillende ontruimingsscenario's voorgeschreven vanuit onder andere de Handreiking Hoogbouw van de SBR. In hoeverre de verschillende ontruimingsconcepten toepasbaar zijn bij houtbouw, is afhankelijk van vele factoren. Nader onderzoek en een integrale ontwerpaanpak is hierbij benodigd.

6.5.5 Uitvoeren van reddingswerkzaamheden

Een langere duur van de brand heeft gevolgen voor de inzet van de brandweer. Dit kan mogelijk consequenties hebben voor de eisen aangaande de brandweerlift, de loopafstand en de droge blusleiding (respectievelijk artikelen 4.228, 4.85, 4.221 van het Besluit bouwwerken leefomgeving). Daarnaast zijn in het Bouwbesluit / Besluit Regeling Bouwwerken alleen eisen gesteld aan de afstand tussen de brandweeringang en de bluswatervoorziening. Daarbij is blijkbaar impliciet verondersteld dat de hoeveelheid bluswater voldoende is. In geval van een brand in een houten bouwwerk kan het overigens zo zijn dat een grotere capaciteit gewenst is op bepaalde locaties en mogelijk zelfs op meerdere verdiepingen gelijktijdig dan voor een brand in een regulier bouwwerk. Ook dit zal moeten worden meegewogen.

6.5.6 Brandveiligheidsinstallaties

Bij houtbouw kan sprake zijn van meer rookproductie tijdens het begin van een brand. Vraag is of er daarom ook andere eisen moeten worden gesteld aan brandmeldinstallatie en ontruimingsalarminstallatie (artikel 4.208 van het Besluit bouwwerken leefomgeving). Dit moet nader worden uitgezocht.

Het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving stelt geen specifieke eisen aan een automatische blusinstallatie en aan een rookbeheersingssysteem. Vraag is evenwel hoe daarbij rekening te houden met ander brandgedrag en rookproductie bij houtbouw. Vervolgens is de vraag hoe dit kan worden geregeld in normen en eventueel in het Bouwbesluit / Besluit Bouwwerken Leefomgeving.

6.6 NEN-EN 1991-1-2

6.6.1 Constructieve brandveiligheid bij brand

Eurocode 1 biedt geen methodes om de vuurlast van houtconstructies in rekening te brengen. Hierdoor is een geschikte beoordeling van de constructieve veiligheid van houtconstructies niet mogelijk. Een oplossing met gelimiteerde toepassingsmogelijkheden wordt geboden in de conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022).

De reductie van de vuurlast ter compensatie van sprinklers is niet gebaseerd op de aanwezigheid van een houtconstructie. Er is geen algemene overeenkomst over een geschiktere reductie.

Eurocode 1 biedt geen methodes die zich richten op zelfdoving van branden in houtconstructies. Als zelfdoving niet gegarandeerd kan worden, wordt er of op blusacties gerekend of het wordt geaccepteerd dat het gebouw op den duur in kan storten. Een oplossing met gelimiteerde toepassingsmogelijkheden wordt geboden in de conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022).

6.6.2 Beperken uitbreiding brand

Een verhoogde vuurlast kan leiden tot een vergrote kans op branduitbreiding door scheidingsconstructies, verbindingen en installaties. Omdat een berekening van de verhoogde vuurlast voor houtconstructies mist in Eurocode 1, geeft Eurocode 1 geen oplossing. Een oplossing met gelimiteerde toepassingsmogelijkheden wordt geboden in de conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022).

Een verhoogde vuurlast kan ook leiden tot een vergrootte kans op, of versnelde, brandoverslag naar externe objecten of bovenliggende verdiepingen. Dit wordt niet meegenomen in Eurocode 1 of Eurocode 5.

6.6.3 Overig gebruik

Om veilig vluchten te garanderen worden vaak ASET RSET analyses uitgevoerd, waarbij regelmatig de brandgroeisnelheden van Eurocode 1 worden gebruikt als basis. De brandgroeisnelheden in Eurocode 1, zijn echter niet in lijn met recentelijke resultaten van Kotsovinos et al (2022). Vooral in grote brandcompartimenten met zichtbare, onbehandelde houten oppervlaktes kan dit leiden tot een significante onderschatting van de brandontwikkeling en een overschatting van de beschikbare tijd om te vluchten.

6.7 NEN-EN 1995-1-2

6.7.1 Constructieve brandveiligheid bij brand

De conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022), biedt mogelijkheden om de extra vuurlast van de constructie mee te nemen. De methode gaat uit van een ventilatie gecontroleerde brand en is in veel gevallen conservatief voor dat type branden. Omdat het interactiegedrag tussen zichtbare houten verticale elementen (zoals wanden) niet volledig begrepen is, geldt er een minimale afstand van 3.5 meter tussen zichtbare vlakken (ook tussen haakse vlakken).

6.7.2 Beperken uitbreiding brand

Een verhoogde vuurlast kan leiden tot een vergrote kans op branduitbreiding door scheidingsconstructies, verbindingen en installaties. Een oplossing met gelimiteerde toepassingsmogelijkheden wordt geboden voor scheidingsconstructies in de conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022). Opmerking: voor verbindingen en installaties is echter een vertaling van de schade van een natuurlijk/parametrisch brandverloop naar de standaardbrandcurve nodig, omdat het gedrag van verbindingen, installaties en andere producten gereguleerd wordt d.m.v.. brandwerendheidseisen. Een methode van equivalente brandduur is hiervoor nodig, maar is niet beschreven in Eurocode 5.

Een verhoogde vuurlast kan ook leiden tot een vergrootte kans op, of versnelde, brandoverslag naar externe objecten of bovenliggende verdiepingen. Deze aspecten worden niet behandeld in Eurocode 5 en zijn over het algemeen gereguleerd in de nationale regelgeving.

6.7.3 Overig gebruik

Het toepassen van brandbescherming (zoals gips) is een effectieve manier om de brandwerendheid te verhogen. Na een beschermingsperiode, begint het hout in te branden, maar de constructieve functie en/of scheidende functie wordt voor een langere periode behouden. Echter als beschermd hout begint in te branden gedurende een echte brand, is er een kans dat het inbranden niet uit zichzelf stopt. Als dat niet toelaatbaar is, is een (relatief moeilijke) blusactie noodzakelijk.

De conceptversie van het toekomstige Eurocode 5 deel 2 biedt een methode om te ontwerpen voor een dovende brand (prEN 1995-1-2:2025(E), 2022). De methode overschat het aantal benodigde gipsplaten voor beschermd hout in veel gevallen. Dit leidt tot hoge kosten (Chaggari *et al.*, 2021) en een vergrote CO₂ uitstoot. Het kunnen waarborgen dat een brand zelf dooft, wordt in een aantal landen als acceptatiecriterium gebruikt voor gebouwen die niet binnen de externe reikhoogte van de brandweer vallen (zoals Verenigde Staten en Verenigd Koninkrijk).

6.8 NEN 6068

NEN 6068 geeft bepalingsmethoden voor de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag. Voor de bepaling voor het doorbranden van brandscheidingen wordt in de norm verwezen naar NEN 6069 en materiaal gerelateerde Eurocodes, voor de conclusies op dit gebied zie hoofdstuk 6.3 en 6.5.

Uit de literatuur volgt dat het risico op brandoverslag in een houten compartiment vergroot. Het volgende is waargenomen waar rekening mee gehouden dient te worden:

- De brandpluim uit ventilatieopeningen kan significant hoger zijn wanneer er blootgesteld hout in een compartiment is.
- De brandpluim kan abrupt groter worden wanneer gips van de constructie valt bij een volledig beschermd compartiment.
- Het moment wanneer glas van bovenstaande verdiepingen bezwijkt kan korter zijn voor een compartimentsbrand met hout in het zicht.

De bepalingsmethode is gebaseerd op een methode beschreven in Annex A van NEN 6068 voor het modelleren van een brand in een ruimte. Hierbij is de referentievuurbelasting afgestemd op gebouwen met een onbrandbare bouwconstructie. Het is dus van belang om de bijdrage van een houten constructie op de vuurbelasting nader te bepalen. Daarnaast is in het achterliggende model (Law en O'Brien, 1978) een belangrijk uitgangspunt dat de wanden en plafonds van onbrandbaar materiaal zijn.

Omdat de huidige bepaling niet is toegespitst op gebouwen met een houten constructie, is het van belang de methode verder te ontwikkelen om te kunnen gebruiken voor het bepalen van de brandoverslag in houtbouw.

6.9 NEN 6069

NEN 6069 is een norm voor beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouwdeelen en bouwproducten.

De brandwerendheidproef voor de klassering van de brandwerendheid neemt de eventuele extra blootstelling aan brand door een hogere vuurlast van een houtconstructie niet mee. Om rekening te houden met een verhoogde vuurlast bij de bepaling van de brandwerendheid is kennis van de equivalente brandduur noodzakelijk, waarvoor, zoals besproken in 3.1.6, de huidige kennis gelimiteerd is. Een methode om de bepaling voor houten gebouwen toch te kunnen gebruiken is het limiteren van de vuurlastbijdrage van het hout door het stellen van extra eisen. Een zodanige aanpak is gekozen in de ontwikkeling van de huidige bouwregels in de Verenigde Staten en Canada.

Tevens is het in echte compartimenten zo dat de inbrandingssnelheid lokaal verhoogd kan zijn door een zuurstofrijke luchtstroom en stralingsinteracties tussen blootgestelde houten delen, op zulke locaties kan doorbranding eerder verwacht worden. Dit creëert een extra risico waar rekening gehouden dient te worden bij de bepaling van de brandwerendheid van een houten element.

Daarnaast volgt uit paragraaf 2.3 dat het risico van brandspreiding in houten gebouwen vooral wordt bepaald door verbindingen en doorvoeringen van installaties. Dit komt

doordat het stromen van hete gassen langs houten oppervlaktes in een verbinding of ander detail kan leiden tot pyrolyse en een versnelde verhitting in het detail waardoor het risico groter wordt. Dit fenomeen dient nader onderzocht te worden.

6.10 NEN 6075

NEN 6075 beschrijft de bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten. De norm beschrijft 2 methoden voor de bepaling.

Zoals vermeld in 2.5 is het risico voor brand- en rookspreading vooral bepaald door verbindingen en doorvoeringen door installaties. Omdat de rookdoorlatendheid wordt bepaald op basis van standaardtesten zou het van belang kunnen zijn om rekening te houden met een eventuele verhoogde vuurlast wanneer het gaat om rookuitbreiding in houtconstructies.

6.11 NEN 6090

NEN 6090 beschrijft de bepaling van de vuurbelasting. Hierbij wordt uitgegaan van een permanente vuurbelasting op basis van een onbrandbare constructie. Om deze norm in houtbouw te kunnen gebruiken moet worden bepaald op welke wijze constructief hout onderdeel vormt van de permanente vuurbelasting.

6.12 Woningwet artikel 1a lid 3; aansturing via regeling

Weliswaar biedt artikel 1 A lid 3 Woningwet de optie aan gemeente om bij een vergunningaanvraag aanvullende eisen te stellen aan de brandveiligheid van houtbouw, maar het is de vraag of deze route in de praktijk gewenst is. Dit zal moeten worden overwogen.

6.13 Aanbeveling vervolgstappen

De prestatiedoelen gerelateerd aan de brandweerinzet zijn gebaseerd op historie, verworven rechten en ervaring. In Nederland wordt houtskeletbouw met name toegepast in gebouwen met een hoogte van 4 à 5 bouwlagen en grondgebonden woningen. Hierbij kan worden gekozen voor toepassing van brandwerende platen om aan de prestatie-eisen te voldoen. Het blijft belangrijk om ook voor deze gebouwen aan de prestatie-eisen te voldoen.

Gebouwen met een relatief hoge variabele vuurlast en gebouwen met een lage consequentieklaas, zoals industriegebouwen, kunnen in worden Nederland toegestaan op basis van gelijkwaardigheid met grote brandcompartimenten. De permanente vuurlast voor deze gebouwen moeten in de gelijkwaardigheid worden meegenomen. Door de relatief hoge variabele vuurlast is het van minder belang om de permanente vuurlast in detail te berekenen.

Er is nog onvoldoende ervaring opgedaan voor gebouwen met massieve houtconstructies, onbeschermd hout of hogere gebouwen. Ook gebouwen met hogere gevol klassen en niet zelfredzame mensen of slaapfuncties verdienen meer aandacht.

Referenties

American Wood Council (2015) Technical Design Guide Basic Fire Precautions During Construction of Large Buildings, US, 2015

Anderson J, Boström L, Chiva R, Guillaume E, Cowell S, Hoffmann A, Tóth P (2021). European approach to assess the fire performance of façades. *Fire and Materials*. 2021;45:598-608. <https://doi.org/10.1002/fam.2878>.

Anderson J, Boström L, McNamee R, Milovanovic B (2018). Experimental comparisons in façade fire testing considering SP Fire 105 and the BS 8414-1, *Fire and Materials* 2018;42:484-492

ANSI/APA (2019) PRG 320 : Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. ANSI and APA standard.

Babrauskas, V., & Williamson, R. B. (1978). Post-flashover compartment fires: basis of a theoretical model. *Fire and materials*, 2(2), 39-53.

Barber D. (2017) Softwood Lumber Board - Glulam Connection Fire Test - Summary Report. Arup USA. Inc, Job number 246190.

Barber, D, Crielaard, R and Li, X 2016. "Towards Fire Safety Design of Exposed Timber in Tall Timber Buildings." In Proceedings of WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering. Vienna Austria.

Barker N (2021) Senior LFB officer wrote note warning of 'significant threat' of facade fires just weeks before Grenfell fire. Inside Housing, via: <https://www.insidehousing.co.uk/news/news/senior-lfb-officer-wrote-note-warning-of-significant-threat-of-facade-fires-just-weeks-before-grenfell-fire-72728>.

Bartlett, A. I., McNamee, R., Robert, F., & Bisby, L. A. (2020). Comparative energy analysis from fire resistance tests on combustible versus noncombustible slabs. *Fire and Materials*, 44(3), 301-310.

Bartlett, A., Law, A., Jansson McNamee, R., Zehfuss, J., Mohaine, S., Tessier, C., & Bisby, L. (2019). Heat fluxes to a façade resulting from compartment fires with combustible and non-combustible ceilings. In *3rd international symposium for fire safety of Façades, Paris*.

BBC News (2015) *University of Nottingham laboratory fire caused by electrical fault, says report*. Via: <https://www.bbc.com/news/uk-england-nottinghamshire-30751431>.

Beitel J, Iwankiw N (2008) *Analysis of Needs and Existing Capabilities for Full-Scale Fire Resistance Testing*. National Institute of Standards and Technology, NIST GCR 02-843-1 (Revision).

Berg, T. (2021). Statistical analysis of firefighting and damage caused by fire in mid-rise timber-framed residential buildings compared to other construction types.

BIV (2022) Sammanställning av frågeställningar kring trähus och trähusbyggande från föreningen för Brandteknisk Ingenjörsvetenskaps medlemmar. BIV Rapport 2022:1.

Via: https://sfpe-biv.se/wp-content/uploads/2022/04/BIV-Rapport-2022_1.pdf
(accessed 10/08/2022)

Bolig och Planstyrelsen (2020) Hovedkapitlerne i bygningsreglementets vejledning til kapitel 5 – Brand <https://brandogkonstruktioner.dk/Brandforhold-Krav-og-vejledninger/Brandforhold#> (accessed 10/08/2022)

Brandon D., Stapf G., Schaper J., Krenn H., Blondeau R., Schmid S., Wabl A. (2022) Factory-bonded gypsum on CLT – A quest to improve quality & efficiency. In: *Wood Rise 2022 Renovation Restauration & Rehabilitation of Urban Buildings Using Wood Based Technologies*, InnoRenew, Slovenia.

Brandon, D. (2018a). *Fire safety challenges of tall wood buildings–Phase 2: Task 4-Engineering Methods*. NFPA report: FPRF-2018-04, NFPA National Fire Protection Association, Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA.

Brandon, D. (2018b). *Engineering methods for structural fire design of wood buildings– structural integrity during a full natural fire*. BRANDFORSK 2018:2, Brandforsk, Stockholm, Sweden. ISBN 978-91-88695-83-3

Brandon, D. (2020). *Collection of Façade Fire Tests Including Timber Structures*. RISE Rapport 2020:50, Research Institutes of Sweden, Lund, Sweden. ISBN: 978-91-89167-33-9

Brandon, D., & Dagenais, C. (2018). *Fire safety challenges of tall wood buildings–Phase 2: Task 5–Experimental study of delamination of cross laminated timber (CLT) in fire*. NFPA report: FPRF-2018-05, NFPA National Fire Protection Association, Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA.

Brandon, D., & Just, A. (2018). Fire Safety of CLT Buildings with Exposed Wooden Surfaces. In *4th Forum World Building Nordic*. Linnaeus University, Växjö, Sweden

Brandon, D., & Östman, B. (2016). *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings-Phase 2: Task 1-Literature Review*. NFPA report: FRPF-2016-22, NFPA National Fire Protection Association, Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA.

Brandon, D., Just, A., & Tiso, M. (2017). Parametric fire design–zero-strength layers and charring rates. In *INTER International Network on Timber Engineering Research Proceedings. August 2017, Kyoto, Japan*. ISSN 2199-9740.

Brandon, D., Just, A., Anderson, P., & Östman, B. (2018b). Mitigation of fire damages in multi-storey timber buildings: Statistical analysis and guidelines for design. *Brandforsk 2018:2:2, Brandforsk, Stockholm, Sweden*

Brandon, D., Klippel, M., & Frangi, A. (2021e). Glue line Integrity in Fire. *RISE Report 2021:107 Research Institutes of Sweden, Lund, Sweden*. ISBN: 978-91-89385-98-6

Brandon, D., Schmid, J., Su, J., Hoehler, M., Östman, B. *et al.* (2018a) Experimental Fire-Simulator for Post-Flashover Compartment Fires In: *Structures in Fire 2018 - The 10th International Conference on Structures in Fire*, Belfast, UK

Brandon, D., Sjöström, J., & Kahl, F. (2021c). *Post-Fire Rehabilitation of CLT*. RISE report 2021:67. Research Institutes of Sweden, Lund, Sweden. ISBN: 978-91-89385-57-3

Brandon, D., Sjöström, J., Temple, A., Hallberg, E., & Kahl, F. (2021a). *Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings—compartment fire testing*. RISE Rapport ; 2021:40. Research Institutes of Sweden, Borås, Sweden. ISBN: 978-91-89385-26-9

Brandon, D., Temple, A., & Sjöström, J. (2021d). *Predictive method for fires in CLT and glulam structures—A priori modelling versus real scale compartment fire tests & an improved method*. RISE Report 2021:63. Research Institutes of Sweden, Borås, Sweden. ISBN: 978-91-89385-53-5

Brandon, D., Vermina Lundström, F., & Mikkola, E. (2021b). *SAFITS-Statistical Analysis of Fires in Timber Structures*. RISE Rapport ; 2021:97, Research Institutes of Sweden, Lund, Sweden. ISBN: 978-91-89385-87-0

Bregulla J, Mackay S, Matthews S. Fire safety on timber frame sites during construction, World Conference on Timber Engineering, Trento, Italy, 2010.

Breneman, S., Timmers, M., & Richardson, D. (2019). Tall wood buildings and the 2021 IBC: Up to 18 stories of mass timber. *WoodWorks*. Available online: https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood_solution_paper-TALL-WOOD.pdf (accessed on 28 May 2022).

Buchanan, A. H. (2000). Fire performance of timber construction. *Progress in structural engineering and materials*, 2(3), 278-289.

Bwalya, A. C., Sultan, M. A., & Bénichou, N. (2004). *A pilot survey of fire loads in Canadian homes*. Ottawa: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.

Cadorin, J. F., & Franssen, J. M. (2003). A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2. Part 1: pre-and post-flashover compartment fire model. *Fire Safety Journal*, 38(5), 395-427.

Chaggari, R., Pei, S., Kingsley, G., & Kinder, E. (2021). Cost-effectiveness of mass timber beam-column gravity systems. *Journal of Architectural Engineering*, 27(3), 04021028.

Chorlton, B., & Gales, J. (2021). Structural repair of fire-damaged glulam timber. *Journal of Architectural Engineering*, 27(1), 04020043.

Crielaard, R., van de Kuilen, J. W., Terwel, K., Ravenshorst, G., & Steenbakkens, P. (2019). Self-extinguishment of cross-laminated timber. *Fire Safety Journal*, 105, 244-260.

Daneshvar, H., & Chui, Y. H. (2019). Progressive Collapse Mitigation in Tall Mass Timber Buildings. For *Modular and Offsite Construction Summit 2019, Banff, Canada*.

Dept of Communities and Local Government (2012) Analysis of fires in buildings of timber framed construction, England, 2009-10 to 2011- 12.

EKS 11 (2019) Boverkets konstruktionsregler. ISBN: 978-91-7563-649-8

Emberley, R., Putynska, C. G., Bolanos, A., Lucherini, A., Solarte, A., Soriguer, D., ... & Torero, J. L. (2017). Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests. *Fire Safety Journal*, 91, 327-335.

EN1363-1(2020) *Fire resistance tests - Part 1: General requirements*. CEN standards.

Engel, T., Kurzer, C., Werther, N., Brunkhorst, S., & Winter, S. (2022). TIMpuls: Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen in Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. In 6. *Internationale Fachtagung Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT)* (pp. 269-291).

Eriksson, P-E. Nord, T. & Östman, B. (2016). Kartläggning av brandincidenter i flervåningshus med trästomme – Erfarenheter från 20 års brukande (SP Report 2016:12). SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: Structural fire design. SC5.T4 Final Draft, for Formal Enquiry_v20_5.8.2022.

Fornather, J. (2003) Brandverhalten von Holz unter besonderer Berücksichtigung stiftförmiger Verbindungsmittel – experimentelle und numerische Untersuchungen (Dissertation). Wien, Österreich: Universität für Bodenkultur. (only available in German).

Frangi, A. (2001) Brandverhalten von Holzbetonverbunddecken. Zürich, Schweiz: Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule.

Frangi, A., & Fontana, M. (2003). Charring rates and temperature profiles of wood sections. *Fire and materials*, 27(2), 91-102.

Frangi, A., & Fontana, M. (2005). Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions. *Fire Safety Science Symposium 8*: 279-290. IAFSS, Beijing, China.

Frangi, A., Bochicchio, G., Ceccotti, A., Lauriola, M. (2008). *Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building*. Engineered Wood Products Association, Madison, Wisconsin, USA.

Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M. & Bochicchio, G., (2008b) Fire Behaviour of Cross Laminated Solid Timber Panels. In: *Fire Safety Science-Proceedings of The Ninth International Symposium*. Zurich: International Association For Fire Safety Science, pp. 1279-1290.

Frank, K., Gravestock, N., Spearpoint, M., & Fleischmann, C. (2013). A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire science reviews*, 2(1), 1-19.

G. J. Langdon-Thomas and M. Law (1966). 'Fire and the external wall', Joint Fire Research Organisation, Boreham Wood, England, Fire Research Note 8.

Gales, J., Chorlton, B. & Jeanneret, C. The Historical Narrative of the Standard Temperature–Time Heating Curve for Structures. *Fire Technol* 57, 529–558 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01040-7>

Garis (2019) Fires in Residential Buildings: Performance of Safety Systems in the Combustible and Non- Combustible Built Environment is there a Statistically Significant Difference in Deaths – Injuries – Fire Department Involvement and the Fires Spread? Centre for Criminal Justice Research, School of Criminology and Criminal Justice, University of the Fraser Valley Fire Chief (Ret), City of Surrey, British Columbia

Garis, F. C. L., & Clare, J. (2014). Fire Outcomes in Residential Fires by General Construction Type. 10.13140/RG.2.1.3411.7605

Gernay, T. (2021). Fire resistance and burnout resistance of timber columns. *Fire Safety Journal*, 122, 103350.

Gibbs, E. and Su, J.Z. (2015) Full scale exterior wall test on Nordic cross-laminated timber system. National Research Council Canada, via: <https://nrcpublications.canada.ca/eng/view/fulltext/?id=78f47a7e-Occ5-418f-bb43-461a6c102ffd> (accessed 24/08/2022)

Glockling J (2022) *Timber construction's insurance challenges and how to overcome them. Construction Management*. Via: <https://constructionmanagement.co.uk/timber-constructions-insurance-challenges-and-how-to-overcome-them/> (accessed 24/08/2022)

Gorska Putynska, C. (2020). Fire dynamics in multi-scale timber compartments. PHD Thesis. University of Queensland.

Gudmundsson, A., & Studahl, P. (2015). IR-teknik som hjälpmedel vid brandbekämpning. Report 5490 Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden. ISSN: 1402-3504

Hadden, R. M., Bartlett, A. I., Hidalgo, J. P., Santamaria, S., Wiesner, F., Bisby, L. A., ... & Lane, B. (2017). Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics. *Fire Safety Journal*, 91, 480-489.

Hadvig, S. (1981). Charring of wood in building fires. *Technical University of Denmark Press, Lyngby*.

Hakkarainen T. (2002) Post-flashover fire in light and heavy timber construction compartments. *Journal of Fire Sciences*, 20 (2002): 133-175.

Hakkarainen T. (2002) Post-flashover fire in light and heavy timber construction compartments. *Journal of Fire Sciences*, 20 (2002): 133-175.

Hopkin, D., & Spearpoint, M. (2021). A calculation method for flame extension from partially exposed mass timber enclosures. In applications of structural fire engineering conference, Ljubljana.

Hopkin, D., Węgrzyński, W., Spearpoint, M., Fu, I., Krenn, H., Sleik, T., Gorska, C., & Stapf, G. (2022). Large-Scale Enclosure Fire Experiments Adopting CLT Slabs with Different Types of Polyurethane Adhesives: Genesis and Preliminary Findings. *Fire*, 5(2), 39. <https://doi.org/10.3390/fire5020039>

Hopkin, D., Węgrzyński, W., Spearpoint, M., Fu, I., Krenn, H., Sleik, T., ... & Stapf, G. (2022). Large-Scale Enclosure Fire Experiments Adopting CLT Slabs with Different Types of Polyurethane Adhesives: Genesis and Preliminary Findings. *Fire*, 5(2), 39.

Hox K. (2015) Branntest av massivtre. SPFR-rapport SPFR A15101. SP Fire Research, Trondheim, Norway. (Noors)

Hox, K., & Baker, G. (2016). Full-scale fire test of CLT structure for student housing. In *14th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering (Interflam 2016)*, July 4-6, 2016, Windsor, UK (pp. 1087-1094). Interscience Communications.

Hox, K., & Sæter Bøe, A. (2017). Slokkemetoder med lite vann. SPFR-rapport A17 20099-01:1

Huč, S., Pečenko, R., & Hozjan, T. (2021). Predicting the thickness of zero-strength layer in timber beam exposed to parametric fires. *Engineering Structures*, 229, 111608.

IBC (2021) International Building Code (USA). International Code Council.

ICC (2021) *International Fire Code*. International Code Council.

ICC (2021) Proposal G147-21. In *2021 GROUP A PUBLIC COMMENT AGENDA*, International Code Council. Via: <https://www.iccsafe.org/wp-content/uploads/2021-Group-A-Public-Comment-Agenda.pdf#page=1076>

IVF (2022) Basis voor brandveiligheid, De onderbouwing van brandbeveiliging in gebouwen, Instituut voor Fysieke veiligheid (IFV), 2^e druk, 31.03.2022

Janssens (2017) Development of a fire performance assessment methodology for qualifying crosslaminated timber adhesives. South West Research Institute.

Janssens M. (2015) *CLT compartment fire test results*. Video presentation. <http://www.awc.org/Code-Officials/2015-IBC-Code-Changes> (accessed on 2015/10/26)

Johansson, N., Anderson, J., McNamee, R., & Pelo, C. (2021). A Round Robin of fire modelling for performance-based design. *Fire and materials*, 45(8), 985-998.

Johnsson, H., & Meiling, J. H. (2009). Defects in offsite construction: timber module prefabrication. *Construction management and economics*, 27(7), 667-681.

Joint Committee on Structural Safety, JCSS (2001). *Probabilistic model code*. zie <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>.

Just A, Brandon D, Noren J (2016). Execution of timber structures and fire. In: WCTE 2016: World Conference on Timber Engineering, 2016, p. 5555-5562. ISBN: 978-3-903024-35-9

Just, A., & Brandon, D. (2017). Fire Stops in Buildings. *BRANDFORSK 2017:1, Brandforsk, Stockholm, Sweden ISSN 0284-517*

Just, A., & Brandon, D. (2019). SMART HOUSING SMÅLAND: Optimizing the fire protection of massive timber structures. RISE Report 2019:109.

Just, A., Brandon, D., Mäger, K. N., Pukk, R., Sjöström, J.; Kahl, F. (2018). CLT compartment fire test. *WCTE 2018 - World Conference on Timber Engineering*. Presented at the 2018 World Conference on Timber Engineering, WCTE 2018, 20 August 2018 through 23 August 2018.

Just, A., Schmid, J., & König, J. (2010). Gypsum plasterboards used as fire protection-Analysis of a database.

Kagiya, K., Hasemi, Y., Nam, D., Hokugo, A., Masuda, H., Harada, T., ... & Hiramatsu, Y. (2002). Investigation of a Large Wooden Gymnasium Fire-Its documentation, estimation of the fire scenario by experiments and evaluation of the structural properties of surviving timber elements. In *Proceedings of 7th International Symposium on Fire Safety Science*.

Kampmeier, B. (2008) Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau (Dissertation). Braunschweig, Deutschland: iBMB

Klippel, M., Schmid, J., & Frangi, A. (2016). Fire design of CLT. In *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, Cross Laminated Timber—a Competitive Wood Product for Visionary and Fire Safe Buildings* (pp. 101-122).

Klippel, M., Schmid, J., Fahrni, R., Frangi, A., & Lange, D. (2018). Assessing the adhesive performance in CLT exposed to fire. In *World Conference on Timber Engineering*. 82 © RISE Research Institutes of Sweden Klippel, M. (2014). Fire safety of bonded structural timber elements (Doctoral dissertation, ETH Zurich)

Ko en Nour (nog niet gepubliceerd) Experimental Investigation of the Performance of Fire Suppression Systems in Protection of Mass Timber Residential Buildings.

Kolaitis D.I., Asimakopoulou E.K., Founti M.A. (2014) Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test. *Construction and Building Materials*, 73 (2014): 163-170.

Kotsovinos, P., Rackauskaite, E., Christensen, E., Glew, A., O'Loughlin, E., Mitchell, H., ... & Schulz, J. (2022). Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed# 01. *Fire and Materials*.

LaMalva, K., & Hopkin, D. (Eds.). (2021). *International Handbook of Structural Fire Engineering*. Springer.

Lane T (2006) 'A lot of the guys won't work on timber frame again'. *Building* via: <https://www.building.co.uk/focus/a-lot-of-the-guys-wont-work-on-timber-frame-again/3078198.article>

Lange, D., Boström, L., Schmid, J., & Albrektsson, J. (2015). The reduced cross section method applied to glulam timber exposed to non-standard fire curves. *Fire technology*, 51(6), 1311-1340.

Lange, D., Sjöström, J., Schmid, J., Brandon, D., & Hidalgo, J. (2020). A comparison of the conditions in a fire resistance furnace when testing combustible and non-combustible construction. *Fire Technology*, 56(4), 1621-1654.

Law A and Kanellopoulos G (2020). 'The rise and fall of the UK's spandrel panel', *Fire Saf. J.*, vol. 115, p. 103170, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103170.

Law, A., & Hadden, R. M. (2017). Burnout means burnout. *SFPE Europe Q*, 1(5), 2017.

Law, M. (1978). Fire safety approach of external building elements – the design approach. *Engineering Journal*, Second Quarter, pp 59-74. American Institute of Steel Construction (AISC), USA.

Law, M. en O'Brien, T. (1981), Fire safety of bare external structural steel, Constrade

Lennon T., Bullock M.J., Enjily V. (2000) *The fire resistance of medium-rise timber frame buildings*. BRE Report No 79485-1, BRE, Watford, UK.

- Lennon T., Hopkin D., El-Rimawi J., Silberschmidt V. (2010) Large scale natural fire tests on protected engineered timber floor systems. *Fire Safety Journal*, 45 (2010): 168-182.
- Li X., Zhang X., Hadjisophocleus G., McGregor C. (2014) Experimental study of combustible and non-combustible construction in a natural fire. *Fire Technology*, 2014.
- Maluk Zedan, C. H. (2014). *Development and application of a novel test method for studying the fire behaviour of CFRP prestressed concrete structural elements*. PhD thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, UK.
- Martin Y., Klippel M. (2018) Fire safety of (timber) building during construction. COST FP 1404 Fire Safe Use of Bio-Based Building Products. N216-07.
- McGregor, C.J. (2014) *Contribution of cross-laminated timber panels to room fires*. Master thesis. Department of Civil and Environmental Engineering Carleton University. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Ontario, Canada.
- McNamee, R., Zehfuss, J., Bartlett, A. I., Heidari, M., Robert, F., & Bisby, L. A. (2021). Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. *Fire and Materials*, 45(7), 847-857.
- Medina Hevia A.R. (2014). *Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms*. Master thesis. Department of Civil and Environmental Engineering Carleton University. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Ontario, Canada.
- Ministerie van Binnenlandse Zaken (1994). *Brandveiligheidsconcept Woningen en woongebouwen*. Ministerie van Binnenlandse Zaken, Directie Brandweer en Rampenbestrijding, Afdeling Preventiebeleid, in samenwerking met Ingenieurs/adviesbureau SAVE.
- Morby A (2014) Blaze destroys Morgan Sindall Nottingham lab project. Construction Enquirer, via [Blaze destroys Morgan Sindall Nottingham lab project | Construction Enquirer News](#) (accessed 24/08/2022)
- Muszyński, L. (2015). "The CLT talk," 2015 Small Log Conference [PowerPoint Presentation], Forest Business Network, Coeur d'Alene, ID.
- Muszynski, L., Larasatie, P., Guerrero, J. E., Albee, R., & Hansen, E. N. (2020, July). Global CLT industry in 2020: Growth beyond the Alpine Region. In *Proceedings of the 63rd International Convention of Society of Wood Science and Technology* (pp. 0-8).
- NBC (2020) National Building Code of Canada
- NCC (2019) National Construction Code, Australia.
- NEN 6068: *Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten*, 2020
- NEN 6069+A1+C1: *Beproeving en klassering van de brandwerendheid van bouwdelen en bouwproducten*, 2019
- NEN 6075: *Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten*, 2020

NEN 6090: *Bepaling van de vuurbelasting*, 2017

NEN-EN 1991-1-2+C3 NB: *Belastingen op constructies – Deel; 1-2: Algemene belastingen – Belastingen op brand Nationale bijlage*, 2019

NEN-EN 1991-1-2+C3: *Belastingen op constructies – Deel; 1-2: Algemene belastingen – Belastingen op brand*, 2019

NEN-EN 1995-1-2+C2: *Ontwerp en berekening van houtconstructies – Deel 1-2: Algemeen – Ontwerp en berekening van constructies bij brand*, 2011

Noorman, Th.M. (1987). *Herziening NEN 3891 – Brandveiligheid van gebouwen*. Rapport nr. 6408. Bouwcentrum/Bouwconsult.

Nothard, S., Lange, D., Hidalgo, J. P., Gupta, V., McLaggan, M. S., Wiesner, F., & Torero, J. L. (2022). Factors influencing the fire dynamics in open-plan compartments with an exposed timber ceiling. *Fire Safety Journal*, 129, 103564.

Oerle, N.J. van (2003), *Achtergronden bij de aanpassing van NEN 6068, C260-3*, Peutz

Oerle, N.L. van (2017), *Aanpassingen NEN 6068, CD-260-3-NO*, Peutz

Olivier, G. (2019). Fire Performance of Cross-Laminated Timber: Investigating adhesives, compartment configuration and design guidelines. TU Delft.

Östman, B. (2022). National fire regulations for the use of wood in buildings—worldwide review 2020. *Wood Material Science & Engineering*, 17(1), 2-5.

Östman, Birgit & Mikkola, Esko. (2006). European classes for the reaction to fire performance of wood products. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 64. 327-337. 10.1007/s00107-006-0116-x.

Pearson, A and Lane T (2002), *Fire Alarm*. Building.co.uk, via <https://www.building.co.uk/news/fire-alarm/1020174.article> (accessed 24/08/2022)

Prefecture de Police (2021) Doctrine pour la construction des immeubles en matériaux biosources et combustibles. Via: <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-39253-210720-Doctrine-bois-PP.pdf> (accessed 24/08/2022)

prEN 1995-1-2:2025(E) (2022)

Ranger, L., Dagenais, C., & Conroy Lum, T. T. (2018). Fire performance of firestops, penetrations, and fire doors in mass timber assemblies. In: proceedings of the World Conference on Timber Engineering, 2018.

Rein, G., Torero, J. L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N. L., Desanghere, S., ... & Reszka, P. (2009). Round-robin study of *a priori* modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One. *Fire safety journal*, 44(4), 590-602.

Ronquillo, G., Hopkin, D., & Spearpoint, M. (2021). Review of large-scale fire tests on cross-laminated timber. *Journal of fire sciences*, 39(5), 327-369.

Schickhofer, G. (2011). "CLT – European experiences," [PowerPoint Presentation] Cross Laminated Timber Symposium, February 8-9, FPInnovations, Vancouver, BC, Canada

- Schmid, J., Brandon, D., Werther, N., & Klippel, M. (2019). Thermal exposure of wood in standard fire resistance tests. *Fire safety journal*, 107, 179-185
- Schmid, J., Just, A., Klippel, M., & Fragiaco, M. (2015). The reduced cross-section method for evaluation of the fire resistance of timber members: discussion and determination of the zero-strength layer. *Fire technology*, 51(6), 1285-1309.
- Schmid, J., Lange, D., Sjöström, J., Brandon, D., Klippel, M., & Frangi, A. (2018, August). The use of furnace tests to describe real fires of timber structures. In *Proceedings of WCTE 2018—world conference on timber engineering*.
- Sjöström, J., Brandon, D., Temple, A., Hallberg, E., & Kahl, F. (2021). Exposure from mass timber compartment fires to facades.
- Smith K (2021) Fire destroys Austria's prized motorcycle museum. Hagerty, via [Fire destroys Austria's prized motorcycle museum | Hagerty UK](#) (accessed 24/08/2022)
- Spearpoint, M., Fu, I., & Frank, K. (2019). Façade Fire Incidents in Tall Buildings. *CTBUH Journal*, (2). https://www.ctbuh.org/resources/papers/4063-Journal2019_Issue%20II_FacadeFireIncidents.pdf (accessed 24/08/2022)
- STA (2020) *Structural timber buildings fire safety in use guidance Volume 6 - Mass timber structures; Building Regulation compliance B3(1)*. Structural Timber Association.
- Straalen, I.J.J. van, Winter, P.E. de, Coppens, E.G.C. en Vermande, H.M. (2007). *Historische achtergronden gestelde eisen in het Bouwbesluit 2003 en de Regeling Bouwbesluit 2003*. TNO-rapport 2007-D-R0929/B.
- Stürmer, M. (2006) Ein Beitrag zum Qualitätsmanagement im vorbeugenden baulichen Brandschutz, Untersuchungen von ausgewählten Brandschutzmängeln in der Ausführungsphase. Berlin, Deutschland: Menschund Buch Verlag. (only available in German)
- Su J.Z. and Loughheed G.D. (2014) *Report to research consortium for wood and wood hybrid mid-rise buildings – Fire safety summary – Fire research conducted for the project on mid-rise wood construction*. National Research Council Canada, Client report: A1-004377.1, Ottawa, Ontario, Canada.
- Su J.Z. and Muradori S. (2015) *Fire demonstration – Cross-laminated timber stair/elevator shaft*. National Research Council Canada, Client report: A1-004377.1, Ottawa, Ontario, Canada.
- Su, J., Lafrance, P. S., Hoehler, M., & Bundy, M. (2018a). Fire safety challenges of tall wood buildings-phase 2: task 3-cross laminated timber compartment fire tests.
- Su, J., Leroux, P., Lafrance, P. S., Berzins, R., Gratton, K., Gibbs, E., & Weinfurter, M. (2018b). Fire testing of rooms with exposed wood surfaces in encapsulated mass timber construction. *National Research Council of Canada, Ottawa, Canada*.
- Sultan M.A. (2008) Fire Resistance of Wood Joist Floor Assemblies. *Fire Technology*, 44, pp. 383-417, January 01, 2008, DOI: 10.1007/s10694-007-0038-0
- Sultan, M. A. (2008). Fire resistance of wood joist floor assemblies. *Fire technology*, 44(4), 383-417.

Thomas, P.H. & Law, M. (1972) The Projection of Flames from Buildings on Fire, *Fire Prevention Science and Technology*, 10, 19.

TNO (1988) *Bepalingsmethode voor de brandoverslag via gevels*, IBBC B88-773 TNO

TNO (1992) *Herziening van de ontwerpnorm NEN 6068*, B92-413, TNO Bouw

UKTFA (2008) Promoting best practice on Timber Frame construction sites - 16 steps to fire safety.

Vrouwenvelder, A.C.W.M., Straalen, IJ.J. van en Scholten, N.P.M. (2012). *Opstellen Nationale Bijlagen Eurocodes Eindrapport kalibratie belastingen, gebouwen en bruggen*. TNO 2012 R10449.

Vylund, L., & Palmkvist, K. (2017). Taktik och metodik för släckning av höga trähus.

Wade, C. A., & Frank, K. (2019). *Fire resistance requirements in single-storey industrial and warehouse buildings*. BRANZ.

Wegrzynski en Brandon (2022) 038 - Fire resistance is not always enough for timber with Daniel Brandon. Via: <https://www.firescienceshow.com/038-fire-resistance-is-not-always-enough-for-timber-with-daniel-brandon/>

Węgrzyński, W., Turkowski, P., & Roszkowski, P. (2020). The discrepancies in energy balance in furnace testing, a bug or a feature?. *Fire and Materials*, 44(3), 311-322.

Werther, N. (2016). External an Internal Factors Influencing the Charring of Timber-an Experimental Study with Respect to natural Fires and Moisture Conditions. In *Structures in fire-SIF'2016* (pp. 650-658).

Werther, N., Denzler, J. K., Stein, R., & Winter, S. (2016). Detailing of CLT with respect to fire resistance. In *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404* (pp. 125-135).

Woodworks Innovation Network. (2022). *Wood Solutions for a Sustainable Future*. Geraadpleegd op 18 augustus 2022, van <https://www.woodworksinnovationnetwork.org/>

Zelinka, S. L., Hasburgh, L. E., Bourne, K. J., Tucholski, D. R., Ouellette, J. P., Kochkin, V., ... & Lebow, S. T. (2018). *Compartment fire testing of a two-story mass timber building* (p. 476). United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidsäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB Box 857, 501 15 BORÅS Telefon: 010-516 50 00 E-post: info@ri.se , Internet: www.ri.se	Brandforskning RISE Report 2022:99 ISBN:
---	--