

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ratej, J., 2016. Požarna odpornost lesenih elementov iz križno lepljenih plošč. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T.): 113 str.

Datum arhiviranja: 06-12-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ratej, J., 2016. Požarna odpornost lesenih elementov iz križno lepljenih plošč. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Hozjan, T.): 113 pp.

Archiving Date: 06-12-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO  
SMER GRADBENE  
KONSTRUKCIJE**

Kandidat:

**JAN RATEJ**

**POŽARNA ODPORNOST LESENIH ELEMENTOV IZ  
KRIŽNO LEPLJENIH PLOŠČ**

Magistrsko delo št.: 39/II.GR

**FIRE RESISTANCE OF CROSS - LAMINATED TIMBER  
ELEMENTS**

Graduation – Master Thesis No.: 39/II.GR

**Mentor:**

doc. dr. Tomaž Hozjan

Ljubljana, 30. 11. 2016

**STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA****Stran z napako****Vrstica z napako****Namesto****Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Spodaj podpisani študent Jan Ratej, vpisna številka 26410167, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: »Požarna odpornost lesenih elementov iz križno lepljenih plošč«

**IZJAVLJAM**

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b. da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

- 2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
- 3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
- 4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
- 5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
- 6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
- 7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 21.11.2016

Podpis študenta:



---

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

<b>UDK:</b>	<b>614.841.2:624.011.1(497.4)(043)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jan Ratej, dipl. inž. grad. (UN)</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Tomaž Hozjan</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Požarna odpornost lesenih elementov iz križno lepljenih plošč</b>
<b>Tip Dokumenta:</b>	<b>magistrsko delo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>113 str., 36 pregl., 32 sl., 27 graf.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>požarna odpornost, križno lepljen les, numerično modeliranje, standardni požar, parametrični požar</b>

**Izvleček:**

V nalogi so predstavljene računske metode za določevanje požarne odpornosti križno lepljenih lesenih elementov. Analizirani sta dve metodi in sicer metoda, ki jo podaja standard EN 1995-1-2, ter metoda, ki je predstavljena v kanadskem priročniku CLT Handbook. Predstavljeni so tudi postopki numeričnega modeliranja križno lepljenih lesenih elementov in s pregledom stanja so podane tudi ugotovitve iz eksperimentalnih raziskav križno lepljenih plošč, ki so med drugim bile raziskane v naravnem merilu. Izkaže se, da sta pri določitvi požarne odpornosti skladno z metodo po EN 1995-1-2 najbolj vprašljivi določitev debeline nenosilnega sloja  $d_0$  in določitev debeline zoglenega sloja  $d_{char}$ . Posredno težavo pri križno lepljeni ploščah predstavlja tudi delaminacija slojev in z njo povezano modeliranje oziroma upoštevanje v preprostih računskih postopkih, ki je zaenkrat dokaj nenatančno upoštevano. Težava je predvsem v določitvi kritične temperature, kdaj lepilo odpove in pride do delaminacije, ter pri določitvi povišane stopnje oglenenja lesa, do katere pride zaradi delaminacije sloja. Bistveni del naloge predstavlja zadnje poglavje, ki je namenjeno parametrični študiji določitve požarne odpornosti križno lepljene plošče skladno z EN 1995-1-2 in kanadskim priročnikom CLT Handbook. Analiziran je vpliv velikosti odprtin in požarnega sektorja na rezultate požarne odpornosti plošče za parametrično požarno krivuljo. Razvoj požara je določen skladno z EN 1991-1-2. Ugotovljeno je, da požar v izključno eni sobi ne predstavlja nevarnosti, v primeru, da bi se požar razširil po celotnem stanovanju, pa plošča požara ne bi prenesla. V zadnjem delu parametrične študije je prikazana razlika med metodama po EN 1995-1-2 in CLT Handbook za določitev standardne požarne odpornosti. Primerjava je narejena za križno lepljene plošče različnih debelin in slojevitosti plošč ter razponov. Glede na rezultate analiz je bilo ugotovljeno, da je metoda po kanadskem priročniku CLT Handbook praviloma bolj konzervativna.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>614.841.2:624.011.1(497.4)(043)</b>
<b>Author:</b>	<b>Jan Ratej B. Sc.</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>assist. prof. Tomaž Hozjan, Ph.D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Fire resistance of cross-laminated timber elements</b>
<b>Document type:</b>	<b>M. Sc. Thesis</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>113 p., 36 tab., 32 fig., 27 graph.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>fire resistance, cross-laminated timber, numerical analysis, standard fire curve, parametric fire curve</b>

**Abstract:**

Thesis discusses methods for determining fire resistance of cross-laminated timber elements. Two different methods are presented, one according to EN 1995-1-2 and one according to CLT Handbook. Procedures of numerical modelling of cross-laminated elements are presented as well. Based on reports of experimental analyses, where some of them were made in real scale, comments, corrections and findings are offered. It appears that when determining fire resistance according to standard EN 1995-1-2, zero-strength layer  $d_0$  and charring depth  $d_{char}$  are most questionable. Indirect difficulty with cross-laminated elements is delamination phenomenon, and with latter connected numerical modelling and integration of phenomenon in current calculation methods, that are still relatively inaccurate. Specific problem is the determination of the critical temperature at which the glue separates and therefore lamination occurs as well as determination of higher degree of charred wood that occurs due to delamination. The last chapter presents the essential part of the thesis. In this chapter, parametric study for determining fire resistances of CLT slab according to European EN 1995-1-2 and Canadian CLT Handbook is performed. Parametric study discusses the effects of different sizes of openings and size of fire compartment where development of parametric fire is determined according to EN 1991-1-2. It was found out that fire limited to solely one room does not cause failure of the CLT slab, but in the case if fire progresses to entire apartment, fire would cause failure of the CLT element. Last part of the parametric study discusses deviation between both methods for determining the standard fire resistance of CLT elements. In the study influence of varying number of layers and length of CLT plate is compared. Comparison showed that more conservative results are obtained with CLT Handbook method.

**ZAHVALA**

Za pomoč in podporo pri nastajanju magistrske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Tomažu Hozjanu, ki je bil vedno pripravljen odgovarjati na vsa moja vprašanja in me usmerjati za nadaljnje delo.

Prav tako se zahvaljujem svoji družini in puncu, ki so me vzpodbujali, podpirali in mi po svojih najboljših močeh pomagali doseči ta mejnik.

Nedvomno pa so bila študijska leta lažja in zabavna predvsem zaradi prijateljev in sošolcev, za kar se tudi njim lepo zahvaljujem.

Jan Ratej

»Ta stran je namenoma prazna.«



**KAZALO VSEBINE**

<b>STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVA O AVTORSTVU</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA</b>	<b>V</b>
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2 POŽAR IN POŽARNA VARNOST</b>	<b>3</b>
2.1 SPLOŠNO O OSNOVAH POŽARNE VARNOSTI IN POŽARNEGA INŽENIRSTVA	3
2.1.1 Zgodovina	3
2.1.2 O požarnem inženirstvu	4
2.2 POŽARNI SCENARIJI IN POŽARNE KRIVULJE	5
2.2.1 Požarni scenarij	5
2.2.2 Požarne krivulje	6
2.3 KONCEPT POŽARNE VARNOSTI V LESENIH OBJEKTIH	7
2.3.1 Pogoji in vzroki za nastanek	9
2.3.2 Razvoj požara in časovni potek	10
2.3.3 Požarne lastnosti lesa	11
2.3.4 Stopnje gorljivosti po SIST EN 13501-1 in klasifikacija lesa	14
2.3.5 Predpisi in orodja za zagotavljanje požarne varnosti	15
2.4 OBNAŠANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI POŽARU	17
<b>3 ZAHTEVE POŽARNE ODPORNOSTI PO STANDARDU EVROKOD 5</b>	<b>20</b>
3.1 OSNOVNE ZAHTEVE ZA KONSTRUKCIJE	20
<b>4 POŽARNA ODPORNOST KRIŽNO LEPLJENEGA LESA</b>	<b>22</b>
4.1 METODE ZA NAČRTOVANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI SOBNI TEMPERATURI	22
4.1.1 Teorija mehansko povezanih nosilcev	22
4.1.2 Kompozitna teorija	23
4.1.3 Metoda strižne analogije	24
4.2 KONTROLA POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENIH ELEMENTOV	25
4.2.1 Določitev vpliva	25
4.2.2 Določitev mehanske odpornosti	26
4.2.3 Hitrost oglenenja nezaščitenih elementov	27
4.2.4 Hitrost oglenenja z mavcem zaščitenih križno lepljenih lesenih elementov	28
4.2.5 Določitev kriterija nosilnosti R za križno lepljene lesene elemente	34
4.2.6 Določitev kriterijev celovitosti E in izolativnosti I	36
4.3 METODE ZA NAČRTOVANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI POŽARNI OBTEŽBI	36
4.3.1 Računski postopek skladno s EN 1995-1-2	36
4.3.2 Računski postopek po ameriškem standardu za lesene konstrukcije (National Design Specification)	37
4.3.3 Švedska metoda – SP Technical Research Institute of Sweden	38

4.4	TRENTNO STANJE RAZISKAV POŽARNE ODPORNOSTI PLOŠČ IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA	39
4.4.1	Oglenenje masivnega lesa	39
4.4.2	Oglenenje križno lepljenega lesa	41
4.4.3	Raziskave na področju evropskih metod za načrtovanje križno lepljenega lesa podvrženega standardni požarni obtežbi	47
4.4.4	Modeliranje in simulacije križno lepljenega lesa pri požarni obtežbi	49
<b>5</b>	<b>NUMERIČNO MODELIRANJE POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENEGA LESA</b>	<b>54</b>
5.1	UVOD	54
5.2	ENAČBA TOPLOTNE PREVODNOSTI	54
5.3	MAVČNE PLOŠČE KOT ZAŠČITNA PLAST	56
5.4	ZOGLENELO IN SEGRETO PODROČJE	58
5.5	KRITERIJ PORUŠITVE	60
5.5.1	Določitev upogibne nosilnosti	60
5.6	DELAMINACIJA	63
5.7	VHODNI PARAMETRI NUMERIČNEGA MODELA	63
5.7.1	Obtežba	63
5.7.2	Kontrola kriterija porušitve	64
5.7.3	Faktor nosilnosti za srednji približek	64
5.7.4	Postopek numeričnega modeliranja in vrstni red operacij	64
5.8	PRIMERJAVA REZULTATOV NUMERIČNEGA IN EKSPERIMENTALNEGA MODELA	67
5.8.1	Mavčne plošče kot zaščita	67
5.8.2	Odlepljanje lamel (delaminacija)	69
5.8.3	Oglenenje	71
5.8.4	Temperaturni profil in debelina segretega sloja	74
5.8.5	Upogib	75
5.8.6	Požarna odpornost	78
5.8.7	Določitev požarne odpornosti po priročniku CLT Handbook	80
<b>6</b>	<b>RAČUNSKI PRIMER</b>	<b>84</b>
6.1	PRIMERJAVA RAČUNSKIH METOD NA PRIMERU OBJEKTA BRDO F3 – OPIS PROBLEMA	84
6.1.1	Podatki	85
6.2	RAČUN POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENE PLOŠČE PO EN 1995-1-2	88
6.2.1	Splošno	88
6.2.2	Določitev projektne vrednosti gostote požarne obtežbe	89
6.2.3	Račun standardne požarne odpornosti križno lepljene plošče	89
6.2.4	Račun požarne odpornosti križno lepljene plošče v primeru parametričnega požara	90
6.3	RAČUN PO PRIROČNIKU CLT HANDBOOK	97
6.4	PARAMETRIČNA ŠTUDIJA VPLIVA ŠTEVILA SLOJEV ELEMENTA IN RAZPONA NA RAZLIKOVANJE REZULTATOV ZA STANDARDNI POŽAR	102
6.5	KOMENTAR REZULTATOV	103
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>VIRI</b>	<b>107</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Glavne faze sprememb lesa, ki jih povzroči segrevanje (Humar, 2007) [44]	10
Preglednica 2:	Faze in značilnosti požara (Humar, 2008) [44]	11
Preglednica 3:	Natančnejši pregled postopka razgradnje zaradi toplotnega vpliva [24]	13
Preglednica 4:	Požarna klasifikacija gradbenih materialov po SIST EN 13501-1 (SZPV, 2012) [30]	15
Preglednica 5:	Vrednosti faktorja $k_2$ za lesene elemente zaščitene s ploščami s kamenimi vlakni (StoraEnso, 2016, str. 18) [36]	32
Preglednica 6:	Osnovne hitrosti oglenjenja $\beta_0$ po EN 1995-1-2 [7][37]	39
Preglednica 7:	Koeficient $k_i$ za določitev ocenjene hitrosti oglenjenja $\beta_n$ [32]	40
Preglednica 8:	Pregled dokumentiranih požarnih testov izvedenih na križno lepljenem lesu	43
Preglednica 9:	Hitrosti oglenjenja za različne primere uporabe nezaščitenega križno lepljenega lesa [32]	46
Preglednica 10:	Dejanski in modeliran Čas ob odpovedi mavčne plošče (Aguanno, 2013, str. 135) [65]	68
Preglednica 11:	Temperature odpovedi lepila (Emberly idr., 2015, str. 7) [43]	69
Preglednica 12:	Dejanski in modeliran čas delaminacije (Aguanno, 2013, str. 137) [65]	70
Preglednica 13:	Povzetek povprečnih hitrosti oglenjenja pri različnih globinah v numeričnem modelu (Aguanno, 2013, str. 138) [65]	72
Preglednica 14:	Povzetek povprečnih debelin segretega sloja iz numeričnega modela (Aguanno, 2013, str. 141) [65]	74
Preglednica 15:	Primerjava med požarno odpornostjo numeričnega modela in eksperimenta (Aguanno, 2013, str. 145) [65]	78
Preglednica 16:	Osnovni geometrijski podatki požarnega sektorja	85
Preglednica 17:	Karakteristične trdnosti plošče glede na smer obremenitve in trajanje obtežbe [37]	86
Preglednica 18:	Togost plošče v različnih smereh [37]	86
Preglednica 19:	Geometrijske karakteristike plošče	87
Preglednica 20:	Vrednosti faktorja $k_{fi}$ [91]	89
Preglednica 21:	Podatki za račun odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 – standardni požar	90
Preglednica 22:	Izračun standardne požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2	90
Preglednica 23:	Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 1	92
Preglednica 24:	Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 1	92
Preglednica 25:	Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 2	93
Preglednica 26:	Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 2	94
Preglednica 27:	Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 3	95
Preglednica 28:	Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 3	95
Preglednica 29:	Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 4	96
Preglednica 30:	Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 4	97
Preglednica 31:	Korekcijski faktorji za požarno projektiranje [34]	100
Preglednica 32:	Pretvornik med inchi in centimetri	100
Preglednica 33:	Sestava križno lepljene plošče v imperialnih in metričnih enotah	100
Preglednica 34:	Vhodni podatki za račun križno lepljene plošče po priročniku CLT Handbook	101
Preglednica 35:	Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče skladno s priročnikom CLT Handbook	101
Preglednica 36:	Standardna požarna odpornost križno lepljene plošče določena z obema metodama za različne zasnove	102

**KAZALO GRAFIKONOV**

Grafikon 1:	Primerjalni grafikon požarnih krivulj po EN 1991-1-2	7
Grafikon 2:	Spreminjanje globine oglenjenja ko je $t_{ch}=t_f$ in globina oglenjenja vsaj 25 mm [37]	30
Grafikon 3:	Spreminjanje globine oglenjenja ko je $t_{ch}=t_f$ in globina oglenjenja manjša od 25 mm [37]	31
Grafikon 4:	Spreminjanje globine oglenjenja s časom ko $t_{ch} < t_f$ [37]	31
Grafikon 5:	Toplotna prevodnost mavčne plošče v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 33) [65]	56
Grafikon 6:	Specifična toplotna kapaciteta mavčne plošče pri povišani temperaturi (Aguanno, 2013, str. 35) [65]	57
Grafikon 7:	Faktor redukcije gostote mavčne plošče v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 37) [65]	57
Grafikon 8:	Faktor redukcije elastičnega modula (Aguanno, 2013, str. 24) [65]	58
Grafikon 9:	Toplotna prevodnost križno lepljenega lesa v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 27) [65]	59
Grafikon 10:	Specifična toplotna kapaciteta križno lepljenega lesa glede na temperaturo (Aguanno, 2013, str. 28) [65]	59
Grafikon 11:	Faktor redukcije gostote križno lepljenega lesa v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 30) [65]	59
Grafikon 12:	Standardna požarna krivulja po CAN/ULS-101 in ISO834 (Saidu, 2011, str. 6) [92]	67
Grafikon 13:	Primerjava med modeliranimi in eksperimentalno izmerjenimi temperaturami na neizpostavljeni strani mavčne plošče pri troslojni križno lepljeni plošči z dvema mavčnima ploščama, pri standardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 136) [65]	69
Grafikon 14:	Primerjava temperatur numeričnega model in eksperimenta na hrbtni strani lesenega sloja petslojne križno lepljene plošče, zaščitene z eno mavčno ploščo pri standardnem požaru (Aguanno, 2013, str. 137) [65]	71
Grafikon 15:	Primerjava globine oglenjenja v numeričnem modelu in eksperimentu v petslojnem panelu z eno mavčno ploščo (Aguanno, 2013, str. 139) [65]	72
Grafikon 16:	Globina oglenjenja, efektivna hitrost in hipna hitrost oglenjenja pri modelu petslojnega panela z eno mavčno ploščo, izpostavljen standardnemu požarnemu test (Aguanno, 2013, str. 140) [65]	73
Grafikon 17:	Globina segrete cone v numeričnem modelu za petslojni element zaščiten z eno mavčno ploščo pri standardnem požarnem preizkusu (Aguanno, 2013, str. 142) [65]	75
Grafikon 18:	Primerjava povesa numeričnega modela in eksperimenta v petslojnem panelu z eno mavčno ploščo (Aguanno, 2013, str. 143) [65]	76
Grafikon 19:	Primerjava povesa med numeričnim modelom in eksperimentom v trislojnem panelu (Aguanno, 2013, str. 143) [65]	76
Grafikon 20:	Primerjava povesa numeričnega modela in eksperimenta na petslojnem panelu izpostavljenem nestandardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 144) [65]	77
Grafikon 21:	Primerjava upogibne nosilnosti po numeričnem modelu in priročniku CLT Handbook za petslojni panel brez mavčne zaščite izpostavljen standardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 149) [65]	81
Grafikon 22:	Primerjava upogibne nosilnosti po numeričnem modelu in priročniku CLT Handbook za troslojni panel brez mavčne zaščite izpostavljen standardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 150) [65]	81
Grafikon 23:	Razvoj temperatur in oglenjenja pri parametričnem požaru za primer 1	93
Grafikon 24:	Razvoj temperatur in oglenjenja pri parametričnem požaru za primer 2	94
Grafikon 25:	Razvoj temperatur in oglenjenja pri parametričnem požaru za primer 3	96
Grafikon 26:	Razvoj temperatur in oglenjenja pri parametričnem požaru za primer 4	97

Grafikon 27: Primerjava rezultatov obeh metod za standardno požarno krivuljo različne scenarije

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Simbolični prikaz požara v Rimu [3]	3
Slika 2:	Stopnje oglenjenja lesa (Shou Sugi Ban, 2014)	9
Slika 3:	Trikotnik gorenja [2]	9
Slika 4:	Časovni razvoj naravnega požara v prostoru po fazah [7]	10
Slika 5:	Leseni prerez pri povišanih temperaturah [24]	13
Slika 6:	Delovanje ekspanzijskega premaza za les [26]	15
Slika 7:	Organizacija pravne podlage požarne varnosti [7]	16
Slika 8:	Najvišja lesena stanovanjska stavba na svetu z višino 53 m v Britanski Kolumbiji [31]	17
Slika 9:	Primer zobatega spoja (Ratej, 2015, str. 26) [33]	18
Slika 10:	Skica križno lepljenega lesenega panela [34]	18
Slika 11:	Prikaz kriterija nosilnosti (R), celovitosti (E) in izolativnosti (I) na križno lepljenem lesu [34]	19
Slika 12:	Ilustracija kriterija nosilnosti R (Hozjan, 2016) [35]	20
Slika 13:	Ilustracija kriterija celovitosti E (Hozjan, 2016) [35]	20
Slika 14:	Ilustracija kriterija izolativnosti I (Hozjan, 2016) [35]	21
Slika 15:	Diagram primera oglenjenja in hitrosti oglenjenja na horizontalne križno lepljenem elementu (CLT 180 5s), ki prikazuje hitrosti oglenjenja 1,3 mm/min za vsak naslednji sloj, ki je izpostavljen požaru, vse dokler ni dosežena debelina oglja 25 mm (StoraEnso, 2016, str. 15) [36]	27
Slika 16:	Diagram primera oglenjenja in hitrosti oglenjenja na vertikalnem križno lepljenem elementu (CLT 100 5s), ki prikazuje predvideno hitrost oglenjenja 0,86 mm/min za vsak naslednji sloj, ki je izpostavljen požaru (StoraEnso, 2016, str. 15) [36].	28
Slika 17:	Dvoplastna požarna zaščita iz mavčni plošč med požarnim preizkusom velikega merila (StoraEnso, 2016, str. 16) [36].	29
Slika 18:	Debelina oglene plasti $d_{char,0}$ za eno-dimenzijsko oglenenje in nominalna debelina oglene plasti $d_{char,n}$	40
Slika 19:	Prikaz oglenjenja produktov iz križno lepljenega lesa z nezaščiteno (A) in zaščiteno (B) površino skladno z EN 1995-1-2 [37]	41
Slika 20:	Definicija rezidualnega in efektivnega prečnega prereza: a.) sloj $d_0$ je v prečnem sloju, torej nenosilnem sloju prečnega prereza, b.) sloj $d_0$ je v nosilnem sloju.	47
Slika 21:	Razporeditev napetosti po sredini prečnega prereza upogibno obremenjenega nosilca izpostavljenega požaru iz treh strani (modra črta) in linearen potek napetosti enako obremenjenega nosilca z upoštevanimi normalnimi materialnimi karakteristikami brez požarne obtežbe (rdeča črta) [32].	50
Slika 22:	Odvisnost med napetostmi in deformacijami v odvisnosti od temperature vzporedno z vlakni. Upošteva se samo plastifikacija v tlaku [32].	50
Slika 23:	Primerjava rezultatov preiskave s simulacijami in enostavnim modelom za projektiranje za (a) konstrukcije z več prostostnimi stopnjami, nezaščitene, požarno obremenjena natezna stran in (b) konstrukcije z eno prostostno stopnjo, nezaščitene, požarno obremenjena stran je v tlaku [32].	52
Slika 24:	Potek temperature in napetosti znotraj nezaščitene prečnega prereza 3D modela pri času porušitve (Fragiacomo, 2012, str. 6) [93]	53
Slika 25:	Diskretizacije križno lepljenega panela za numerično toplotno analizo (Aguanno, 2013, str. 120) [65]	55
Slika 26:	Grafični vmesnik za pripravo numeričnega modela namenjenega računu požarne odpornosti križno lepljenega lesa (Aguanno, 2013, str. 129) [65]	62
Slika 27:	Križno lepljen prerez na katerem je prikazan primer delaminacije (Bartlett, 2015, str. 4) [90]	63
Slika 28:	Algoritem računa požarne odpornosti križno lepljenega lesa (Aguanno, 2013, str. 134) [65]	66
Slika 29:	Pozicija stanovanja B10 v celotnem objektu F3 [90]	84
Slika 30:	Tloris stanovanja B10 [90]	85

Slika 31:	Upogibni momenti v plošči zaradi kombinacije MSN-fire	86
Slika 32:	Prikaz uporabljen simbolov v računu požarne odpornosti križno lepljenega elementa [34]	98

**LIST OF TABLES**

Table 1:	Main phases of changes in timber, while under heat influence (Humar, 2007) [44]	10
Table 2:	Stages and fire characteristics (Humar, 2008) [44]	11
Table 3:	Detailed wood decomposition process when exposed to fire [24]	13
Table 4:	Fire classification of construction materials by SIST EN 13501-1 (SZPV, 2012) [30]	15
Table 5:	Values of $k_2$ for timber components protected by rock fiber batts (StoraEnso, 2016, p. 18) [36]	32
Table 6:	Basic design charring rate $\beta_0$ according to EN 1995-1-2 [7][37]	39
Table 7:	Coefficients $k_i$ to determine the notional charring rate $\beta_n$ [32]	40
Table 8:	Overview documented fire tests on CLT elements	43
Table 9:	Charring rates for different CLT applications (without any fire protection) [32]	46
Table 10:	Gypsum fall-off times from numerical model and experiments (Aguanno, 2013, p. 135) [65]	68
Table 11:	Temperature of cohesion failure (Emberly et. Al, 2015, p. 7) [43]	69
Table 12:	Ply layer fall-off times from numerical model and experiments (Aguanno, 2013, p. 137) [65]	70
Table 13:	Summary of average charring rates calculated at various depths from numerical model (Aguanno, 2013, p. 138) [65]	72
Table 14:	Summary of average heat-affected layer from numerical model (Aguanno, 2013, p. 141) [65]	74
Table 15:	Comparison between numerical model and experimental fire resistance (Aguanno, 2013, p. 145) [65]	78
Table 16:	Basic geometrical characteristics of fire sector	85
Table 17:	Characteristic load-bearing strengths of slab for different load directions and load durations [37]	86
Table 18:	Slab stiffness for different directions [37]	86
Table 19:	Geometry characteristics of CLT slab	87
Table 20:	Factor $k_{fi}$ [91]	89
Table 21:	Data for calculation of CLT slab fire resistance according to EN 1995-1-2 – standard fire	90
Table 22:	Standard fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2	90
Table 23:	Input data for parametric fire analysis no. 1	92
Table 24:	Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 1	92
Table 25:	Input data for parametric fire analysis no. 2	93
Table 26:	Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 2	94
Table 27:	Input data for parametric fire analysis no. 3	95
Table 28:	Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 3	95
Table 29:	Input data for parametric fire analysis no. 4	96
Table 30:	Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 4	97
Table 31:	Adjustment factors for fire design [34]	100
Table 32:	Inch to centimeter converter	100
Table 33:	CLT structure in imperial and metric units	100
Table 34:	Required data for CLT slab calculation according to CLT Handbook	101
Table 35:	Fire resistance calculation of CLT panel according to CLT Handbook	101
Table 36:	Standard fire resistance of CLT slab, determined by both methods and different structural conditions	102



**LIST OF GRAPHS**

Graph 1:	Comparison between different fire curves by EN 1991-1-2	7
Graph 2:	Variation of charring depth by time when $t_{ch}=t_f$ and the charring depth at time $t_a$ is at least 25 mm [37].	30
Graph 3:	Variation of charring depth with time when $t_{ch}=t_f$ and charring depth at $t_a$ is less than 25 mm [37]	31
Graph 4:	Variation of charring depth with time when $t_{ch} < t_f$ [37]	31
Graph 5:	Temperature-dependent thermal conductivity of gypsum board (Aguanno, 2013, p. 33) [65]	56
Graph 6:	Specific heat capacity of gypsum board at elevated temperatures (Aguanno, 2013, p. 35) [65]	57
Graph 7:	Gypsum density ratio at elevated temperatures (Aguanno, 2013, p. 37) [65]	57
Graph 8:	Modulus of elasticity reduction factor (Aguanno, 2013, p. 24) [65]	58
Graph 9:	Thermal conductivity of CLT with temperature dependence (Aguanno, 2013, p. 27) [65]	59
Graph 10:	Specific heat capacity of CLT with temperature dependence (Aguanno, 2013, p. 28) [65]	59
Graph 11:	Temperature-dependent density ratio for CLT (Aguanno, 2013, p. 30) [65]	59
Graph 12:	CAN/ULS-S101 and ISO834 standard fire exposure curve (Saidu, 2011, p. 6) [92]	67
Graph 13:	Comparison between model and experimental temperatures found at the back of the gypsum layers from a 3-ply panel with 2 layers of gypsum standard fire test (Aguanno, 2013, p.136) [65]	69
Graph 14:	Comparison between model and experimental temperatures found at the back of ply layers from a 5-ply panel with one layer of gypsum, standard fire test (Aguanno, 2013, p. 137) [65]	71
Graph 15:	Comparison between model and experiment char depth in a 5-ply panel with 1 layer of gypsum (Aguanno, 2013, p. 139) [65]	72
Graph 16:	Char depth, effective charring rate and instantaneous charring rate determined by the model in 5-ply panel with 1 layer of gypsum during a standard fire test (Aguanno, 2013, p. 140) [65]	73
Graph 17:	Heat-affected layer size determined by model in 5-ply panel with 1 layer of gypsum, standard fire test (Aguanno, 2013, p. 142) [65]	75
Graph 18:	Comparison between model and experimental deflection in a 5-ply panel with 1 layer of gypsum (Aguanno, 2013, p. 143) [65]	76
Graph 19:	Comparison between model and experimental deflection in a 3-ply panel (Aguanno, 2013, p. 143) [65]	76
Graph 20:	Comparison between model and experimental deflection in a 5-ply panel exposed to the non-standard fire (Aguanno, 2013, p. 144) [65]	77
Graph 21:	Comparison between model and CLT Handbook prediction for structural failure of a 5-ply panel without gypsum exposed to the standard fire (Aguanno, 2013, p. 149) [65]	81
Graph 22:	Comparison between model and CLT Handbook prediction for structural failure of a 3-ply panel without gypsum exposed to the standard fire (Aguanno, 2013, p. 150) [65]	81
Graph 23:	Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 1	93
Graph 24:	Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 2	94
Graph 25:	Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 3	96
Graph 26:	Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 4	97
Graph 27:	Standard fire curve methods results comparison for both scenarios	103

**LIST OF FIGURES**

Figure 1:	Symbolic display of fire in Rome [3]	3
Figure 2:	Charring steps of timber (Shou Sugi Ban, 2014)	9
Figure 3:	Fire triangle [2]	9
Figure 4:	Natural fire development in compartment [7]	10
Figure 5:	Wooden cross-section under higher temperature influence [24]	13
Figure 6:	Expanding timber fire coating activity [26]	15
Figure 7:	Legal background of fire safety organization [7]	16
Figure 8:	World's highest residential timber structure with high of 53 m built in British Columbia [31]	17
Figure 9:	Finger joint example (Ratej, 2015, p. 26) [33]	18
Figure 10:	Sketch of cross-laminated timber panel [34]	18
Figure 11:	Structural resistance, Integrity and Insulation criteria presentation o CLT example [34]	19
Figure 12:	Load carrying capacity criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]	20
Figure 13:	Integrity criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]	20
Figure 14:	Insulation criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]	21
Figure 15:	Diagram illustrating an example of charring or the charring rate of a horizontal CLT component (CLT 180 L5s), which depicts charring rate of 1,3 mm/min for each additional layer affected by fire until the formation of a new 25 mm-thick char layer (StoraEnso, 2016, p. 15) [36].	27
Figure 16:	Diagram showing an example of charring or the charring rate of a vertical CLT component (CLT 100 L5s), which shows estimated increased charring rate of 0,86 mm/min from the second layer affected by fire (StoraEnso, 2016, p.15) [36].	28
Figure 17:	Two-ply fire protection plasterboard cladding exposed to fire during a large-scale fire test (StoraEnso, 2016, p. 16) [36].	29
Figure 18:	One-dimensional charring depth $d_{char,0}$ and notional charring depth $d_{char,n}$	40
Figure 19:	General description of charring for CLT products with initially unprotected surfaces (A) and initially protected surfaces (B) according to EN 1995-1-2 [37]	41
Figure 20:	Definition of residual cross-section and effective cross-section: a.) $d_0$ layer is in cross-layer and thus no load-bearing layer, b.) $d_0$ is in load-bearing layer.	47
Figure 21:	Stress distribution along the center line of a beam exposed to fire on three sides and subjected to bending (blue curve), and the corresponding linear stress distribution with normal material properties and the same bending resistance (red line) [32].	50
Figure 22:	Temperature-dependent stress-strain relationship parallel to grain for wood at different temperatures with plasticity in compression only [32].	50
Figure 23:	Comparison of test results with simulation and the easy-to-use design model for (a) series MF, unprotected, with the fire exposed side in tension (tsw) and (b) for series SF, unprotected with the fire exposed side in compression (csw) [32].	52
Figure 24:	Temperature and stress distribution within the unprotected cross-section of 3D model at failure time (Fragiacomo, 2012, p. 6) [93]	53
Figure 25:	Discretization of CLT panel for numerical thermal analysis (Aguanno, 2013, p. 120) [65]	55
Figure 26:	Graphical user interface for numerical model to calculate the fire resistance of CLT (Aguanno, 2013, p. 129) [65]	62
Figure 27:	A CLT sample showing delamination (Bartlett, 2015, p. 4) [90]	63
Figure 28:	Process completed by numerical model to calculate fire resistance of CLT (Aguanno, 2013, p. 134) [65]	66
Figure 29:	Position of apartment B10 in F3 building [90]	84
Figure 30:	Footprint of apartment B10 [90]	85
Figure 31:	Bending moments in combination MSN-fire	86
Figure 32:	Nomenclature used in calculating fire resistance of a CLT exposed to fire from below [34]	98

## 1 UVOD

Zaradi velikih požarov, ki so v preteklosti uničevali celotna mesta in za seboj puščali grozovite posledice, so ljudje včasih les obravnavali za nevaren gradbeni material. Kot prelomnico lahko štejemo požar v Londonu leta 1666, ki velja za začetnika požarno varne gradnje. Povzročil je umik lesa kot gradbenega materiala in začetek uporabe kamna, kasneje sta ga v veliki meri nadomestila jeklo in beton, dandanes pa ga nadomeščajo tudi drugi umetni materiali. Pa vendar smo v zadnjih letih ponovno priča smernicam sodobne gradnje, ki temeljijo predvsem na vključevanju naravnih materialov v osnovni ali predelani obliki, ki so prirejani na sodobne sisteme. Trendi spodbujajo uporabo tako naravnega masivnega lesa kot različnih kompozitnih materialov iz lesa, ki se vse bolj izpopolnjujejo in prilagajajo modernim željam, potrebam in gradbenim standardom. Istočasno ti proizvodi temeljijo na zelenem gospodarstvu, obstojnih sistemih, pri proizvodnji katerih ostane le minimalna količina odpadkov. S tem se les tudi kot gradbeni konstrukcijski material, ki ga je človek uporabljal že od nekdaj, ponovno vrača in postavlja ob bok jeklu in betonu. Glede na številne napovedi, ki jih je moč opaziti v različnih revijah in člankih, je lesena montažna gradnja res gradnja prihodnosti. Material je naravnega izvora, predvsem v Sloveniji ga imamo razmeroma veliko v primerjavi z drugimi evropskimi državami, hkrati pa sta lokalna tehnologija in znanje, razen določenih faz (predvsem žage), na solidnem nivoju. Vrednost odkupa okroglega lesa iz zasebnih gozdov v aprilu 2016 je bila za 47 % višja kot v marcu 2016 in za okoli 22 % višja kot v aprilu 2015; znašala je 5,7 milijona EUR [1]. Statistični podatki torej kažejo na povečano uporabo lesa v Sloveniji.

Ob povečani uporabi lesa, vključno s kompoziti in ostalimi lesenimi izdelki, ki se pojavljajo v gradbeništvu, se razvijajo tudi nove metode za račun konstrukcij. Z novimi kompoziti, kot so križno lepljene plošče, se je pojavil tudi cel kup vprašanj pri računu nosilnosti takšnih elementov. Pojavila se je potreba po razvoju računskih metod za dokaze mejnih stanj tako na statično, dinamično kot tudi požarno (nezgodno) obtežbo. Križno lepljen les je nov inženirski produkt, ki je bil razvit v Evropi konec 20. stoletja, dandanes pa se uporablja širom celega sveta za gradnjo stanovanjskih hiš, blokov, poslovnih prostorov, torej za različne vrste tako bivalnih, kot tudi objektov, ki niso namenjeni bivanju.

Uporaba masivnega lesa v gradnji je prinesla tudi računske metode za kontrolo lesenih konstrukcij, ki so se v zadnjih letih že dokaj dobro razvile. Še vedno pa ostajajo nejasnosti in odprta vprašanja glede dokazovanja novih lesnih kompozitov, na katerih je bilo izvedeno razmeroma majhno število eksperimentov. Tak produkt so tudi plošče iz križno lepljenega lesa, za katere trenutno razpoložljive metode za dokazovanje požarne odpornosti še ne ponujajo dovolj enostavnih, a hkrati dovolj natančnih postopkov. Prav to pa je bil povod za izdelavo te magistrske naloge, v kateri so zbrani zadnji podatki o rezultatih raziskav, ki so bile izvedene širom sveta in so podrobno prikazane v poglavju 4.

Zaradi visokih stroškov eksperimentov si pri dokazovanju križno lepljenih lesenih elementov pomagamo z uporabo numeričnih modelov, ki so deloma že razviti, potrebujejo pa izpopolnitve. Z

numeričnim modeliranjem križno lepljenih lesenih elementov se prav tako ukvarja kar nekaj svetovnih strokovnjakov, katerih rezultati so s komentarjem prikazani v poglavju 5.

Na osnovi ugotovitev iz raziskave strokovne literature in že obstoječih postopkov za računske dokaze požarne odpornosti križno lepljenih elementov so v poglavju 6 izvedene analize po različnih obstoječih metodah. Na koncu je narejena primerjava rezultatov vseh analiziranih metod in opisana so odstopanja med njimi.

## 2 POŽAR IN POŽARNA VARNOST

### 2.1 SPLOŠNO O OSNOVAH POŽARNE VARNOSTI IN POŽARNEGA INŽENIRSTVA

#### 2.1.1 Zgodovina

Požari so po svetu pustošili že od vekomaj, zato se je postopoma razvil pojem požarne varnosti, ki obsega postopke, principe, sisteme in ostalo povezano z varnostjo pred požarom. Pri požarni varnosti je najpomembneje zaščititi človeška življenja, v drugem koraku pa tudi premoženje. Ljudi običajno varujemo z ustreznimi evakuacijskimi potmi in projektiranjem konstrukcij na način, da zdržijo dovolj dolgo, da se ljudje lahko umaknejo na varno in omogočijo varno intervencijo gasilcem in reševalcem. V preteklosti je veliko težavo predstavljala razdalja med posameznimi objekti, ki je omogočala relativno hiter prehod požara z enega na drug objekt in potencialno preko celotnega mesta ali dela mesta.

Prav za začetek razvoja požarne varnosti lahko štejemo požar v Rimu leta 64 (Slika 1), po katerem je takratni cesar Lutius Domitius Ahenobarbus Nero Claudius Caesar, bolj znan kot Neron, predpisal prve pasivne požarne ukrepe varstva pred požarom. Začel je uvajati minimalni razmik med objekti, s katerim je preprečil ali vsaj omejil napredovanje požara z enega na drug objekt v mestu. Poleg razmika je k boljši požarni varnosti pripomogla tudi uporaba negorljivih gradbenih materialov [2].



Slika 1: Simbolični prikaz požara v Rimu [3]

Figure 1: Symbolic display of fire in Rome [3]

Začetki požarnega inženirstva kot vede so se v svetu pojavili šele v 20. stoletju. Eden od razlogov je v industrijski revoluciji, ki se je v Veliki Britaniji začela že v 18. stoletju, kasneje pa se je širila po Evropi in svetu. Lastniki industrijskih objektov niso želeli, da se najmanjši požar sprevrže v uničujočega in jim uniči celoten obrat. Prav industrijski objekti pa so bili podvrženi povečanemu nastanku požara. V istem obdobju se je po svetu pojavilo večje število požarov, ki so uničili mesta, predvsem v drugi polovici 19. stoletja in na začetku 20. stoletja. Med najbolj znane tega časa vsekakor spadajo požar v Bostonu leta

1872, v Chicagu 1871, v San Franciscu 1906, v Texas Cityju 1947, v Halifaxu 1917 in v Tokyu 1923 [4]. Intenzivnejšemu razvoju požarnega inženirstva kot vede pa smo priča v drugi polovici 20. stoletja v Združenih državah Amerike in Veliki Britaniji, ki sta bili tudi najmočnejši v razvoju industrije. Razlog se skriva tudi v takratni zakonodaji in razpoložljivem znanju, ki je bilo na dokaj nizkem nivoju. Ugotovili so, da takratni gradbeni standardi niso nudili zadostne zaščite stavb in s tem človeških življenj. Pojavile so se raziskave na tem področju, ki so pripeljale tudi do definicije še danes uporabljene standardne požarne krivulje (Grafikon 1). Ta je osnovana na primeru gorenja pretežno celuloznih materialov in je namenjena standardnemu preizkušanju požarne odpornosti različnih nosilnih in nenosilnih elementov. Takratni standardi so bili zasnovani na t.i. determinističnem pristopu, ki ga za doseganje ustreznega nivoja požarne varnosti stavb večinoma uporabljamo še danes [2].

### 2.1.2 O požarnem inženirstvu

Požarno inženirstvo lahko opišemo kot vedo, s katero skušamo zagotoviti varovanje ljudi, premoženja in okolja pred požarom. V osnovi lahko požarno inženirstvo razdelimo na dve veji: (i) požarna zaščita (»fire protection engineering«) in (ii) požarna varnost (»fire safety engineering«). Prva se ukvarja predvsem z odkrivanjem požara, preprečitvijo in ublažitvijo posledic že nastalega požara, druga pa obravnava varno evakuacijo, varno gašenje in reševanje ljudi in imetja med požarom [2].

Požarno inženirstvo lahko razdelimo na več področij [2]:

- odkrivanje požara (alarmni sistemi, požarne centrale, ...),
- aktivna požarna zaščita – sistemi za preprečevanje razvoja požara (gasilniki, sprinklerji, ...),
- pasivna požarna zaščita – požarni sektorji, odmiki stavb, ...,
- nadzor dima (naravni ali prisilni odvod dima),
- evakuacija – zasilni izhodi, požarna stopnišča, ...,
- ustrezna zasnova zgradb (urbanistični in konstrukcijski vidik),
- razvoj požara in modeliranja le tega,
- obnašanje ljudi med požarom (študije, eksperimenti, ...),
- analize tveganj (vključen ekonomski vidik),
- požari v okolju (obvladovanje, tveganja, ...).

Dandanes je požarno inženirstvo že dokaj dobro razvito in se razvija vzporedno z vsemi ostalimi področji inženirstva. Na območju Evrope veljajo evropski standardi Evrokod, ki med drugim predpisujejo postopke in metode za računsko dokazovanje konstrukcij pri požarni obtežbi. V večini držav so ti postali obvezni in s tem ne več samo kot standardi, temveč so vključeni v predpise, njihovo upoštevanje pa je obvezno. Standardi Evrokod pogojujejo, da mora biti konstrukcija projektirana na način, da [2]:

- ohrani nosilnost za predviden čas trajanja požara (R30, R60, R90, ...),

- je omejeno širjenje požara in dima po konstrukciji,
- je širjenje požara na sosednje objekte preprečeno oziroma omejeno,
- je omogočena varna evakuacija in reševanje,
- je zagotovljena varnost gasilskih in reševalnih ekip.

Pri postopkih projektiranja konstrukcij na požarno obtežbo se v osnovnih metodah uporabi standardno požarno krivuljo, dovoljena pa je tudi uporaba naprednih pristopov (ciljno projektiranje). Osnovni ali predpisni način temelji na nominalnih požarnih krivuljah, determinističnem pristopu, zanj pa so podani postopki v standardu. Pri ciljnem (performančnem) pristopu se upošteva dejansko stanje konstrukcije. Pristop temelji na realnih požarih, za kar pa so potreba posebna računska orodja. Na podlagi vhodnih podatkov se določi požarna krivulja za vsak požarni scenarij posebej in konstrukcijo se analizira na izračunano požarno krivuljo.

Standard EN 1991-1-2 [6] opisuje postopke požarnega projektiranja konstrukcij po sledečem vrstnem redu [2]:

- izbira za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev,
- določitev ustreznih projektnih požarov,
- izračun razvoja temperaturnega polja konstrukcijskih elementov,
- izračun mehanskega odziva konstrukcije, izpostavljene požaru.

V primeru osnovnega pristopa je projektni požar že podan s standardno krivuljo, pri ciljnem načinu pa se ta dobi glede na požarni scenarij in vhodne podatke [6].

## 2.2 POŽARNI SCENARIJI IN POŽARNE KRIVULJE

### 2.2.1 Požarni scenarij

Požarni scenarij predstavlja opis poteka požara od vžiga do polno razvitega požara. Zajema tako značilnosti objekta, uporabnikov, okolice, kot tudi načrtovane požarnovarnostne ukrepe in morebitno škodo, ki jo lahko povzroči. Za določitev neugodnih projektnih razmer je potrebno določiti ustrezne požarne scenarije in ustrezne projektne požare. Pri konstrukcijah, kjer je nevarnost nastanka požara pri pojavu drugih neugodnih vplivov, je potrebno upoštevati požarno nevarnost znotraj celotnega koncepta varnosti (npr. potres + požar). Obnašanje v odvisnosti od časa in obtežbe konstrukcije pred požarom ni potrebno upoštevati, razen v posebni primerih [7].

Požarni scenarij predstavlja možne razvoje požara in obnašanje požarne zaščite ob tem. Požarni sistemi se lahko preizkušajo v laboratorijih v posebnih pečeh, kjer se simulira požar, lahko pa se požar in zaščito numerično modelira na računalniku. Pred izbiro požarnih scenarijev je potrebno definirati pristop, ki ga bomo uporabili pri analizi določene konstrukcije. Predvsem je glavna razlika med analizo požarne varnosti (hazard-type assessment) in požarnim tveganjem (risk assessment). Pri analizi požarne varnosti se določi razpršena raznolika skupina požarnih scenarijev, pri katerih dokazujemo, da se konstrukcija

obnaša sprejemljivo v primeru vsakega izbranega požarnega scenarija. Pri analizi požarnega tveganja pa se izbere supina manjših skupin požarnih scenarijev, med katerimi ima vsaka izmed teh manjših skupin posebno utež glede na relativno verjetnost pojava. Zahtevamo, da se konstrukcija obnaša sprejemljivo za vsako podskupino [9].

### 2.2.2 Požarne krivulje

Požarna krivulja je krivulja, ki prikazuje gibanje temperature v odvisnosti od časa. Krivulja podaja temperaturo plinov v okolici površine elementa kot funkcijo časa. V splošnem ločimo:

- standardne (nominalne) požarne krivulje.
- parametrične požarne krivulje.

Na območju Evrope se uporablja standarde Evrokod. Evrokod 1 obravnava vplive na konstrukcije, med drugim v drugem delu požarno obtežbo [6]. Standard zajema tri nazivne požarne krivulje, ki so določene z enačbami spodaj.

- Standardna požarna krivulja (Enačba 2.1) je najmanj intenzivna izmed vseh nazivnih požarnih krivulj [6]. Krivulja je definirana v standardu za požarne teste ISO 834, zato ji pogosto pravimo tudi krivulja ISO 834 [12]. Primerna je za gorenje celuloznih materialov.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) [^{\circ}\text{C}] [6] \quad (2.1)$$

- Požarna krivulja zunanjega požara (Enačba 2.2) opisuje bolj intenziven požar kot standardna požarna krivulja. Uporablja se pri gorenju elementov izven obodnih zidov, kar se največkrat nanaša na fasadne elemente [11].

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) [^{\circ}\text{C}] [6] \quad (2.2)$$

- Ogljikovodikova požarna krivulja (Enačba 2.3) se uporablja pri gorenju ogljikovodikov in tekočih goriv. Opisuje najbolj intenziven požar izmed nazivnih požarnih krivulj v EN 1991-1-2 [6].

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) [^{\circ}\text{C}] [6] \quad (2.3)$$

Evrokod EN 1991-1-2 [6] podaja parametrično požarno krivuljo posebej za fazo segrevanja (Enačba 2.4) in za fazo ohlajanja (Enačba 2.5). Uporaba pa ima določene omejitve podane v [6].

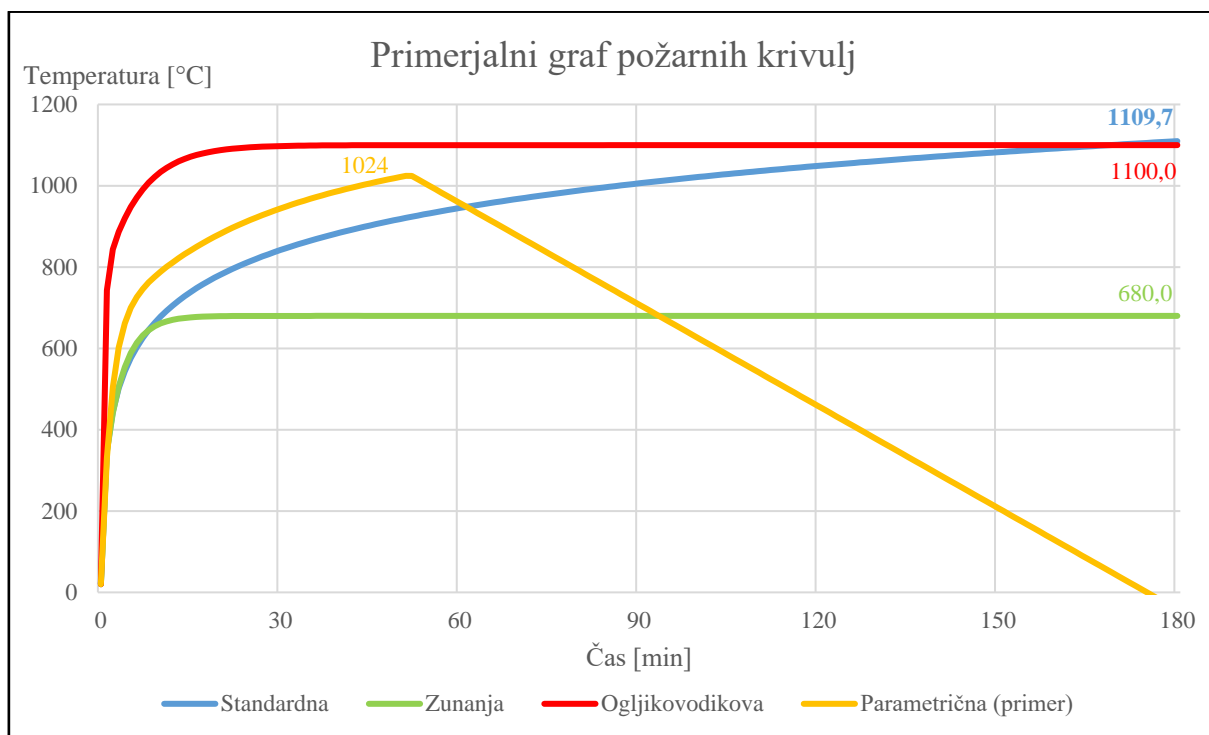
$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*}) [^{\circ}\text{C}] [6] \quad (2.4)$$

Za fazo ohlajanja pa standard podaja spodnjo enačbo (Enačba 2.5) [6].

$$\begin{aligned} \theta_g &= \theta_{max} - 625 && (t^* - t_{max}^* \cdot x) && \text{za } t_{max}^* \leq 0,5 \\ \theta_g &= \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* \cdot x) && \text{za } 0,5 < t_{max}^* < 2 \\ \theta_g &= \theta_{max} - 250 && (t^* - t_{max}^* \cdot x) && \text{za } t_{max}^* \geq 2 \end{aligned} \quad (2.5)$$



Poleg nominalnih in parametričnih požarnih krivulj poznamo tudi druge požarne krivulje, ki se uporabljajo v ozkih specifičnih primerih in tu niso navedene in prikazane. V nadaljevanju je prikazana primerjava razvoja in upada temperatur v odvisnosti od časa (Grafikon 1) za najbolj znane nominalne krivulje in parametrično krivuljo, ki jih definira standard EN 1991-1-2 [6] in je izračunana ob upoštevanju naslednjih parametrov:  $\gamma = 2$  in  $t_{max}^* = 0,87$  h. Opazimo lahko, da je v začetnih časih pri standardni krivulji temperatura precej nižja kot pri ogljikovodikovi ali parametrični, medtem ko se v nadaljevanju približa ogljikovodikovi, s parametrično pa tako ali tako v drugi fazi nista primerljivi. Pri zunanji požarni krivulji je opazna podobnost v obliki glede na ogljikovodikovo požarno krivuljo, vendar je temperatura dosti nižja. Ustavi se pri 660 °C, do tu pa dobro sledi standardni požarni krivulji. Najvišje temperature dobimo pri ogljikovodikovi požarni krivulji, kjer se temperatura dvigne do 1100 °C že po približno 30 minutah. Tudi pri standardni požarni krivulji se temperatura povzpne vse do 1100 °C, vendar se to zgodi šele po 180 minutah.



Grafikon 1: Primerjalni grafikon požarnih krivulj po EN 1991-1-2

Graph 1: Comparison between different fire curves by EN 1991-1-2

### 2.3 KONCEPT POŽARNE VARNOSTI V LESENIH OBJEKTIVH

Les postaja čedalje bolj uporabljen gradbeni material tako v mednarodnem kot v domačem slovenskem okolju. Čedalje bolj se ugotavlja prednosti materiala na različnih področjih, predvsem pa je v zadnjem času prevladujoč kriterij obstojnosti. Stare pritlične in dvonadstropne lesene konstrukcije so se počasi začele višati v objekte srednjih višin do pet nadstropij. Vedno bolj se uveljavlja gradnja novih čedalje višjih konstrukcij, pri čemer se uporablja tudi les. Z nadaljevanjem tega trenda bo uporaba lesa lahko konkurirala jeklu in betonu tudi v smislu primernosti gradnje na bolj zahtevnih objektih, s čimer se širi

nabor primerov, kjer bo les prav tako sprejemljiv material. Zadnje objave na področju arhitekture kažejo na željo po gradnji lesenih stolpov s preko 30 etažami. Na prvi pogled se to zdi precej ambiciozno, pa vendar nismo tako zelo daleč. Ravno pred nekaj meseci se je pričela gradnja objekta Ho Ho Wien: Das Holzochhaus, ki bo v višino meril 55 m [15].

Zakoni, pravni predpisi, direktive in ostali dokumenti se iz leta v leto spreminjajo z namenom stalnih izboljšav. Tako je v Evropi za države članice Evropske Unije izdelana direktiva o gradbenih proizvodih. 21. decembra leta 1988 je bila sprejeta Direktiva o gradbenih proizvodih («Construction Products Directive 89/106/EEC»), ki med drugim navaja tudi bistvene zahteve, ki jih morajo izpolnjevati gradbeni proizvodi. V prilogi 1 so navedene bistvene zahteve, kjer piše: »Proizvodi morajo biti primerni za gradbene objekte, ki so (v celoti in v posameznih delih), ob upoštevanju ekonomičnosti, primerni za predvideno uporabo in tako izpolnjujejo spodaj navedene bistvene zahteve, če za objekte veljajo predpisi, ki vključujejo takšne zahteve.« Te zahteve se morajo ob primernem vzdrževanju izpolnjevati ves čas ekonomsko sprejemljive življenjske dobe objekta. Zahteve navadno zadevajo delovanje, ki ga je mogoče predvideti. V drugi točki bistvenih zahtev so zahteve glede varstva pred požarom, kjer je navedeno, da mora gradbeni objekt biti projektiran in grajen tako, da je ob izbruhu požara [17]:

- določen čas še ohranjena nosilnost konstrukcije,
- omejeno nastajanje in širjenje požara ter dima v objektu,
- omejeno širjenje požara na sosednje gradben objekte,
- osebe v objektu lahko zapustijo objekt ali jih rešijo kako drugače,
- upoštevana varnost reševalnih ekip.

Požare lahko razdelimo glede na to, kje nastanejo, glede na velikost in glede na vrsto gorljivega materiala [18].

Čeprav je les klasificiran kot gorljiv material, je bilo dokazano, da se v primeru požara obnaša zelo dobro. Lahke lesene konstrukcije so običajno pred požarom zaščitene s požarno odpornimi oblogami, masivne lesene konstrukcije pa so običajno zadovoljivo požarno odporne same po sebi, saj zoglejijo, na ta način pa si ustvarijo toplotnoizolacijski sloj (Slika 2) [19]. Dandanes se širom sveta izvajajo številne raziskave o obnašanju lesa in lesenih proizvodov pod vplivom požarne obtežbe. Največ jih je bilo izvedeni v zadnjih 20 letih, ko so se dvignila pričakovanja družbe glede požarnega varstva, rezultate pa je moč videti v različnih računskih modelih in konceptih. Poleg tega so se razvili raznorazni sistemi za gašenje, kjer je najpomembnejši sistem sprinklerjev, s katerim se je razširila možnosti uporabe lesa. Strokovnjaki ugotavljajo, da moč in razvoj požara v večini primerov ni odvisna od konstrukcije, temveč od notranje opreme prostorov [16].

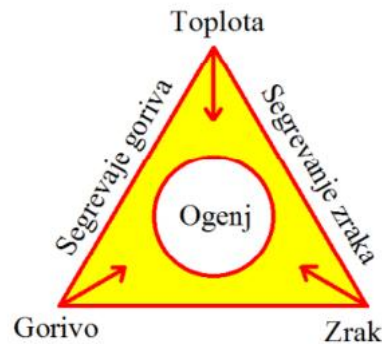


Slika 2: Stopnje oglečenja lesa (Shou Sugi Ban, 2014)

Figure 2: Charring steps of timber (Shou Sugi Ban, 2014)

### 2.3.1 Pogoji in vzroki za nastanek

Gorenje je eksotermna reakcija med gorljivo snovjo in kisikom, do katere lahko pride, če imamo toploto. Osnovni princip pri gorenju najbolje opisuje trikotnik gorenja (Slika 3), kjer vidimo, da za ogenj potrebujemo toploto, gorivo in kisik. Gorenje lahko razdelimo na popolno in nepopolno, pri čemer je za popolno gorenje potrebna zadostna količina kisika, da material izgori in ne nastanejo posebni nevarni stranski produkti. Do nepopolnega gorenja pride v primeru pomanjkanja kisika, zato nastajajo vmesni produkti, ki ne reagirajo s kisikom. Stranski produkt pri požaru je dim, ki zajema delce delno zoglenelih snovi, ki se pri določeni temperaturi lahko vžgejo. Za vdihavanje je dim strupen [2].



Slika 3: Trikotnik gorenja [2]

Figure 3: Fire triangle [2]

Glavne faze sprememb lesa, ki jih povzroči segrevanje je prikazano v spodnji preglednici (Preglednica 1), iz katere je razvidno, da se med 300 – 600 °C gorenje lesa nadaljuje, tudi če vir gorenja umaknemo.

Preglednica 1: Glavne faze sprememb lesa, ki jih povzroči segrevanje (Humar, 2007) [44]

Table 1: Main phases of changes in timber, while under heat influence (Humar, 2007) [44]

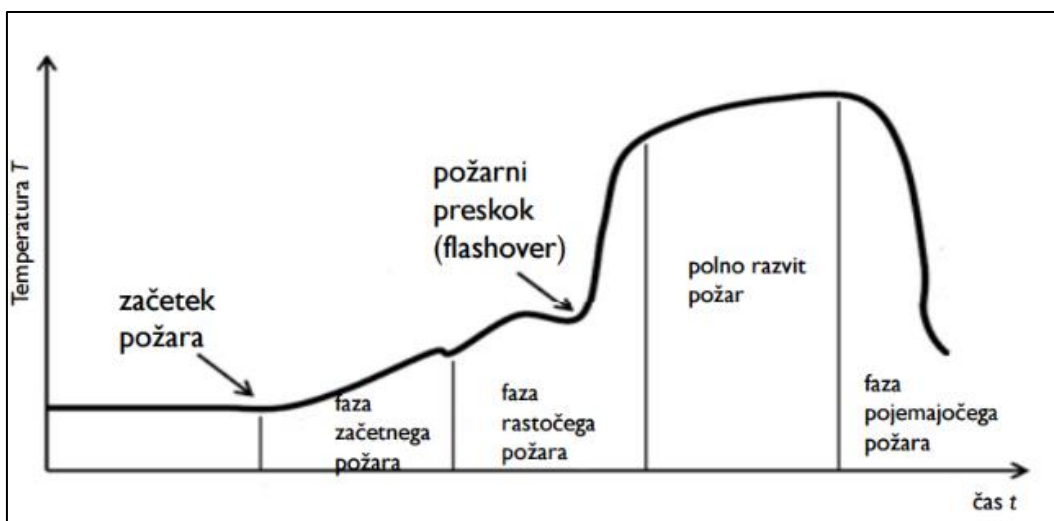
Temperatura [°C]	Sprememba
80 – 100	Izparevanje vode in hlapnih komponent (faza sušenja, les se mehansko ne spremeni).
90 – 160	Razvijanje gorljivih plinov – produktov razkroja. Pokanje lesa, les potemni.
150 – 270	Gorenje sproščenih plinov, les na površini gori, površina poogleni.
270	Razkroj lesa se nadaljuje. Zaradi izolacijskih lastnosti zoglele plasti les preneha goreti, če odstranimo vir gorenja.
270 – 300	Vnetišče lesa
<b>330 – 370</b>	<b>Temperatura samovžiga.</b>
300 – 600	Gorenje se nadaljuje samostojno, tudi če vir gorenja umaknemo.
Nad 600	Intenzivno gorenje in razkroj lesa.

Spodaj so naštetih najbolj bistveni, ki jih lahko razvrstimo v 4 glavne skupine:

- naravni vzrok požara,
- samovžig in eksplozija,
- tehnični vzrok požara in
- požig.

### 2.3.2 Razvoj požara in časovni potek

Požar v splošnem lahko razdelimo na štiri glavne faze, pri čemer ni nujno, da vsak požar obsega vse štiri faze, temveč lahko katero preskoči. Na spodnji sliki (Slika 4) je prikazan časovni razvoj požara po fazah s prikazom gibanja temperatur v odvisnosti od časa.



Slika 4: Časovni razvoj naravnega požara v prostoru po fazah [7]

Figure 4: Natural fire development in compartment [7]

Potek požara lahko razdelimo na štiri faze:

- faza začetnega požara,

- faza rastočega požara,
- faza polno razvitega požara,
- faza pojemajočega požara.

Pred fazo začetnega požara je očitno nek dogodek, ki požar sploh povzroči. Med fazo rastočega in polno razvitega požara se pojavi tako imenovani požarni preskok ali »flash-over«. To je trenutek, ko požar zajame celoten prostor in s tem celotno razpoložljivo požarno obtežbo. Do požarnega preskoka je za razvoj požara in konstrukcijo bistven odziv materialov na ogenj, od požarnega preskoka naprej pa to vlogo prevzame sama požarna odpornost konstrukcije. V prvem delu razvoju požara so namreč največje nevarnosti vžig, ogenj in dim, v drugem pa poškodbe konstrukcije in razširitev požara [21].

V spodnji preglednici (Preglednica 2) so prikazane glavne faze in vplivi na požar.

Preglednica 2: Faze in značilnosti požara (Humar, 2008) [44]

Table 2: Stages and fire characteristics (Humar, 2008) [44]

Faza požara	Začetni požar	Polno razviti požar	Pojemajoči požar
<b>Lastnosti požara</b>	Požar je nadzorovan z gorivom	Požar je večinoma nadzorovan z ventilacijo	Požar je nadzorovan z gorivom
<b>Obnašanje ljudi</b>	Evakuacija	Smrt	
<b>Odzivanje na požar</b>	Dimni in toplotni detektorji	Dim in plameni	
<b>Aktivni nadzor požara</b>	Sredstva za začetno gašenje, vgrajeni gasilni sistemi, gasilci, nadzor dima	Požar nadzirajo gasilci	
<b>Pasivni nadzor požara</b>	Požarne lastnosti materialov ODZIV NA OGENJ	Požarne lastnosti konstrukcije POŽARNA ODPORNOST	

### 2.3.3 Požarne lastnosti lesa

Les je naravni nehomogen porozen vlaknast material, pretežno sestavljen iz celuloznih vlaken (40-50 %) in hemiceluloznih vlaken (25-30 %), ki mu dajejo natezno trdnost, povezanih z vezivom ligninom (25-30 %), ki nudi tlačno trdnost. Elementarno je sestavljen iz 50 % ogljika, 44 % kisika in 6 % vodika. Skupna količina dušika in ostalih elementov (kalij, kalcij, železo, ...) pa je nižja od 1 %. Prav na podlagi te kemijske sestave lahko govorimo o lesu kot gorljivem materialu. Ob dodajanju toplote prihaja do kemičnih reakcij, ki povzročijo razkroj. Produkt so oglje in gorljivi plini. Temperatura, pri kateri bo prišlo od vžiga, je odvisna od različnih dejavnikov. Ker je naraven material, les vsebuje vlago, ki je bistvenega pomena pri določevanju njegovih požarnih karakteristik. Poleg vlažnosti so pomembni tudi trajanje izpostavljenosti povišani temperaturi, gostota lesa in razmerje med volumnom in površino, torej oblika. Les postane požarno odporen šele, ko se izčrpa celuloza, saj ima lignin višjo temperaturo oglečenja kot celuloza [16].

Les bo začel goreti, ko bo izpostavljen zadosti visoki temperaturi in bo prisotna zadostna količina kisika. Razgradnja lesa zaradi toplotne obtežbe se lahko opiše v več korakih. Točen postopek razgradnje in

produkti, ki pri tem nastanejo, so odvisni od lesenega produkta, hitrosti naraščanja temperature in končne temperature.

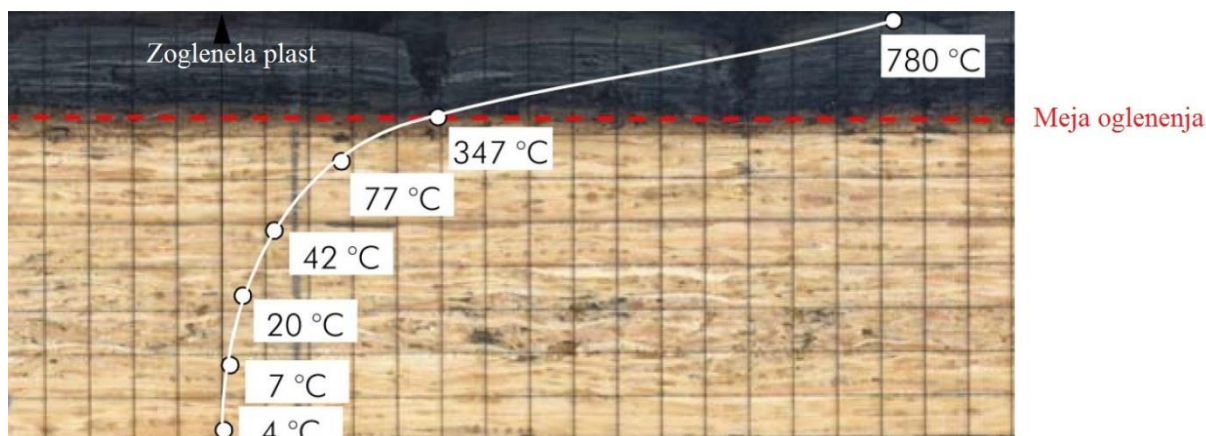
Predpostavlja se, da les zogleni pri temperaturi okoli 300 °C (Slika 5). Temperatura je sicer odvisna tudi od vrste lesa, pri čemer gostejši les zogleni nekoliko kasneje kot vrste z nižjo gostoto. Poleg vrste je pomembna vlažnost lesa in čas izpostavljenosti povišani temperaturi. Glede na rezultate preiskav se razkroj hemiceluloze zgodi pri temperaturi med 200 °C in 260 °C, celuloze pri temperaturi med 240 °C do 350 °C, lignina pa med 280 °C in 500 °C [24].

Bolj natančno lahko dogajanje v lesu, ki je izpostavljen požarni obtežbi, razdelimo na štiri korake. Natančnejše dogajanje po temperaturah pa je prikazano v preglednici na naslednji strani (Preglednica 3). Ti koraki sestavljajo termični razkroj lesa [24]:

- ogrevanje in sušenje do mejne cone,
- piroliza lesa s sproščanje gorljivih plinov,
- izgorevanje vnetljivih plinov,
- izgorevanje trdnih ostankov, ki vsebujejo ogljik.

O nestandardnem vplivu toplote lahko govorimo, ko temperatura na površini lesenega elementa naraste preko 105 °C. Pri tem se pojavita prvi dve zgoraj naštetih fazi, saj pride do ogrevanja in tudi že do pirolize s sproščanjem gorljivih plinov. Dejstvo je, da ima pri upogibno obremenjenih elementih zunanji sloj največjo vlogo pri prevzemu obtežbe, zato malo zmanjšanje prečnega prereza zaradi oglenjenja lahko predstavlja bistveno zmanjšanje odpornostnega momenta in posledično upogibne nosilnosti. Ob izpostavljeni površini se ustvari ogljikov film, ki ščiti preostali les pred zunanjim segrevanjem. Hitrosti oglenjenja kot omenjeno ni mogoče napovedati, saj je odvisna tako od gostote, vlažnosti, razpokanosti kot še drugih dejavnikov. Velja pa dejstvo, da se leseni lepljeni produkti obnašajo bolje od masivnega lesa, saj so izdelani iz lamel, ki so vzdolžno spojene, iz njih pa so odstranjena oslabljenata mesta. S tem se zmanjša tudi delež razpok in zniža hitrost oglenjenja takega lesenega produkta [16][24].

Do izgorevanja vnetljivih plinov pride pod pogojem zadostne količine kisika in zadostnega izhlapevanja plinov. Običajno se to dogaja pri temperaturi med 270 °C in 340 °C, kar je ponovno odvisno od več faktorjev (gostota, vlažnost,...). Za izgorevanje trdnih ostankov, ki vsebujejo ogljik, pa je potrebna temperatura višja od 500 °C [24].



Slika 5: Leseni prerez pri povišanih temperaturah [24]

Figure 5: Wooden cross-section under higher temperature influence [24]

Preglednica 3: Natančnejši pregled postopka razgradnje zaradi toplotnega vpliva [24]

Table 3: Detailed wood decomposition process when exposed to fire [24]

Temperatura	Faze termičnega razkroja	
100 °C	Sušenje, izhlapevanje nevezane vode	Segrevanje materiala
150 °C – 225 °C	Razgradnja lignina in hemiceluloze, začetek spreminjanja celuloze, začetek sproščanja plinov (CO <sub>2</sub> , ocetna kislina, vodna para), počasnejši potek reakcije. Samovžig je mogoč pri daljši izpostavljenosti toploti	Območje kritične temperature
230 °C – 300 °C	Razgradnja celuloze, močno sproščanje plinov, začetek nastajanja lesenega ogljikovega filma, povečana hitrost reakcije, samovžig plinov v primeru zadostne prisotnosti močne svetlobe	Območje temperature samovžiga
300 °C	Pospešeno izgubljanje lastne teže	
400 °C	Širjenje plamena na površini, eksotermni potek razgradnje, maksimalen proces nastajanja vnetljivih plinov	Gorenje z odprtim plamenom
500 °C	Močna in goreča razgradnja lignina, širjenje požara v globino lesa	Popolno izgorevanje ostankov pirolize
700 °C	Gorenje ostankov lesa, popolno izgorevanje plinov iz površine	

Glavna prednost lesenih konstrukcij v primerjavi z jeklenimi je v tem, da konstrukcija ohrani nosilnost tudi v primeru požara, medtem ko je pri jeklenih konstrukcijah prenos toplote tako hiter, da se nosilnost hitro zmanjša na zanemarljivo. Nosilnost lesa pa je odvisna od hitrosti oglenenja  $\beta$  (Enačba 2.6), ki se spreminja glede na vrste lesa, vlažnost in ostale dejavnike. Na podlagi hitrosti oglenenja lahko za vsak čas  $t$  določimo debelino zoglenele plasti  $d_{char}$ , na podlagi katere dobimo prečni prerez, ki ima kljub izpostavljenosti požaru normalno nosilno kapaciteto [7].

$$\beta = \frac{d_{char}}{t} \quad (2.6)$$

### 2.3.4 Stopnje gorljivosti po SIST EN 13501-1 in klasifikacija lesa

Gradbeni materiali se glede na odziv na ogenj razvrščajo na gorljive in negorljive materiale. Pri razvrščanju materialov se upošteva njihov prispevek k razvoju požara pred nastankom požarnega preskoka in dodatek k požarni obtežbi prostora v polno razvitem požaru. Med negorljive gradbene materiale spadajo tisti materiali, ki so se glede na standardne preizkusne metode tako izkazali. Klasifikacija je v celoti prikazana v spodnji preglednici (Preglednica 4) v kateri je prikazano, da imamo dve negorljivi kategoriji in sicer: A1 in A2. Med gorljive materiale spadajo materiali, ki se glede na standardne preizkuse izkažejo kot vnetljivi. Ti materiali se razvrstijo v razrede od B do F glede na njihov prispevek k razvoju požara. B in C razreda vsebujeta težko vnetljive materiale, D in E normalno vnetljive, razred F pa lahko vnetljive materiale. Les spada v kategorijo normalno vnetljivih materialov, saj se ob prisotnosti zadostnega vira vžiga vname in se ogenj razširi po njegovi površini. Zaradi tega se ga sme kot material nosilne konstrukcije vgraditi samo pod določenimi pogoji, ali ga je potrebno ustrezno zaščititi [25].

- a. Razred F
- b. Razred E
- c. Razred D
- d. Razred C
- e. Razred B
- f. Razred A2
- g. Razred A1

Poleg osnovne klasifikacije se materiale klasificira tudi v podrazrede. En podrazred klasificira materiale glede na hitrost sproščanja dima in celotno količino nastalega tem ( $s_0$  do  $s_2$ ), drugi podrazred pa glede na nastajanje gorečih kapljic oziroma delcev med preizkušanjem odziva na ogenj ( $d_0$  do  $d_2$ ). pri tem večja številka pomeni večjo sproščanje dima in več gorečega kapljanja. Pri klasifikaciji težko vnetljivih talnih oblog razreda so preizkusi nekoliko drugačni. Pri preizkusu se vir toplote simulira kot toplotno sevanje požara v prostoru skozi vrata na talno oblogo hodnika. Kapljanje materiala za talne obloge pri tem ne igra vloge. Materiale se nato klasificira v razrede  $D_{fl}$ ,  $C_{fl}$ ,  $B_{fl}$ , in  $A2_{fl}$ , pri čemer višji razred odziva izpolnjuje tudi vsa merila nižjega razreda [25].

Kot omenjeno se les običajno klasificira v razred D ali E, lahko pa se uporabijo tudi določene vrste zaščite za doseganje višjih razredov klasifikacije. Najpogostejše se uporabljajo različni premazi, ki pri povišani temperaturi nabreknejo in se s tem pretvorijo v zaščitni izolacijski sloj. Ekspanzijski premazi so pogosto nezadostno uspešni, zato les oblečemo v raznorazne zaščitne materiale, kot so mavčne plošče in podobno. Z arhitekturnega vidika taka rešitev pogosto ni sprejemljiva, zato je pomembno zavedanje požarne ogroženosti že v fazi projektiranja [16].





Slika 6: Delovanje ekspanzijskega premaza za les [26]

Figure 6: Expanding timber fire coating activity [26]

V spodnji preglednici (Preglednica 4) je prikazana klasifikacija materialov po standardu SIST EN 13501-1.

Preglednica 4: Požarna klasifikacija gradbenih materialov po SIST EN 13501-1 (SZPV, 2012) [30]

Table 4: Fire classification of construction materials by SIST EN 13501-1 (SZPV, 2012) [30]

Stopnja gorljivosti gradbenega materiala		Klasifikacija gradbenih materialov po SIST EN 13501-1										
		Vsi materiali razen talnih oblog, cevnih izolacij in kablov				Talne obloge			Izolacijski materiali za cevi			
negorljiv	A1	A1			A <sub>1n</sub>	A1		A <sub>1L</sub>	A1			
	A2	A2-s1,d0 A2-s2,d0 A2-s3,d0	A2-s1,d1 A2-s2,d1 A2-s3,d1	A2-s1,d2 A2-s2,d2 A2-s3,d2	A <sub>2n</sub>	A <sub>2n</sub> -s1	A <sub>2n</sub> -s2	A <sub>2L</sub>	A <sub>2L</sub> -s1,d0 A <sub>2L</sub> -s2,d0 A <sub>2L</sub> -s3,d0	A <sub>2L</sub> -s1,d1 A <sub>2L</sub> -s2,d1 A <sub>2L</sub> -s3,d1	A <sub>2L</sub> -s1,d2 A <sub>2L</sub> -s2,d2 A <sub>2L</sub> -s3,d2	
gorljiv	težko gorljiv	B	B-s1,d0 B-s2,d0 B-s3,d0	B-s1,d1 B-s2,d1 B-s3,d1	B-s1,d2 B-s2,d2 B-s3,d2	B <sub>n</sub>	B <sub>n</sub> -s1	B <sub>n</sub> -s2	B <sub>L</sub>	B <sub>L</sub> -s1,d0 B <sub>L</sub> -s2,d0 B <sub>L</sub> -s3,d0	B <sub>L</sub> -s1,d1 B <sub>L</sub> -s2,d1 B <sub>L</sub> -s3,d1	B <sub>L</sub> -s1,d2 B <sub>L</sub> -s2,d2 B <sub>L</sub> -s3,d2
		C	C-s1,d0 C-s2,d0 C-s3,d0	C-s1,d1 C-s2,d1 C-s3,d1	C-s1,d2 C-s2,d2 C-s3,d2	C <sub>n</sub>	C <sub>n</sub> -s1	C <sub>n</sub> -s2	C <sub>L</sub>	C <sub>L</sub> -s1,d0 C <sub>L</sub> -s2,d0 C <sub>L</sub> -s3,d0	C <sub>L</sub> -s1,d1 C <sub>L</sub> -s2,d1 C <sub>L</sub> -s3,d1	C <sub>L</sub> -s1,d2 C <sub>L</sub> -s2,d2 C <sub>L</sub> -s3,d2
	normalno gorljiv	D	D-s1,d0 D-s2,d0 D-s3,d0	D-s1,d1 D-s2,d1 D-s3,d1	D-s1,d2 D-s2,d2 D-s3,d2	D <sub>n</sub>	D <sub>n</sub> -s1	D <sub>n</sub> -s2	D <sub>L</sub>	D <sub>L</sub> -s1,d0 D <sub>L</sub> -s2,d0 D <sub>L</sub> -s3,d0	D <sub>L</sub> -s1,d1 D <sub>L</sub> -s2,d1 D <sub>L</sub> -s3,d1	D <sub>L</sub> -s1,d2 D <sub>L</sub> -s2,d2 D <sub>L</sub> -s3,d2
	lahko gorljiv	E	E		E-d2	E <sub>n</sub>	E <sub>n</sub>		E <sub>L</sub>	E <sub>L</sub>		E <sub>L</sub> -d2
	F				F <sub>n</sub>			F <sub>L</sub>				

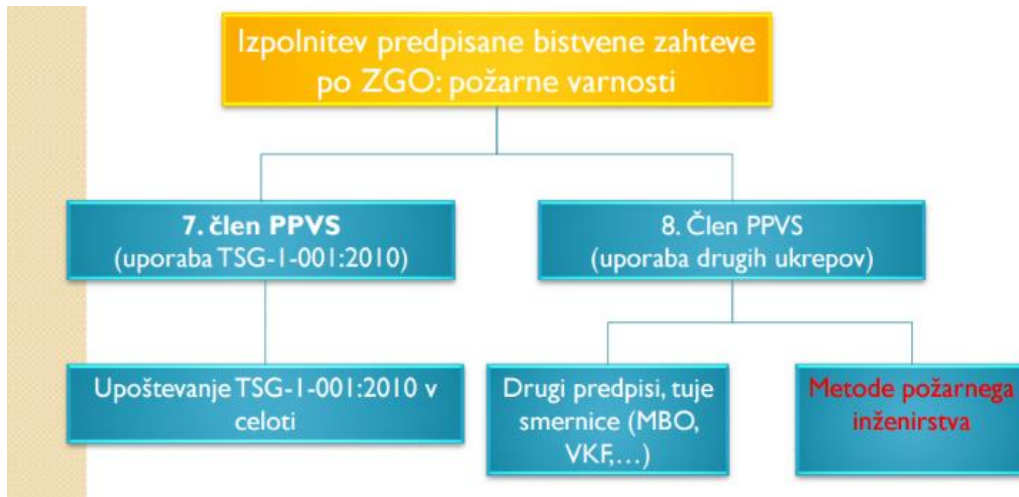
### 2.3.5 Predpisi in orodja za zagotavljanje požarne varnosti

Predpisi in orodja za zagotavljanje požarne varnosti temeljijo na Zakonu o graditvi objektov [29] in Pravilnikom o požarni varnosti v stavbah [28]. Zakon o graditvi objektov navaja tudi bistvene zahteve, ki jim mora ustrezati konstrukcija.

- Mehanska odpornost in stabilnost
- Varnost pred požarom
- Higijenska in zdravstvena zaščita in zaščita okolice
- Zaščita pred hrupom
- Varčevanje energije in ohranjanje toplote

Druga bistvena zahteva torej obravnava varstvo pred požarom. Skladno z zakonom ZGO mora vsak objekt izpolnjevati bistvene zahteve.

Po drugi strani imamo Pravilnik o požarni varnosti v stavbah [28], ki v svojem 7. in 8. členu obravnava zasnovo požarne varnosti.



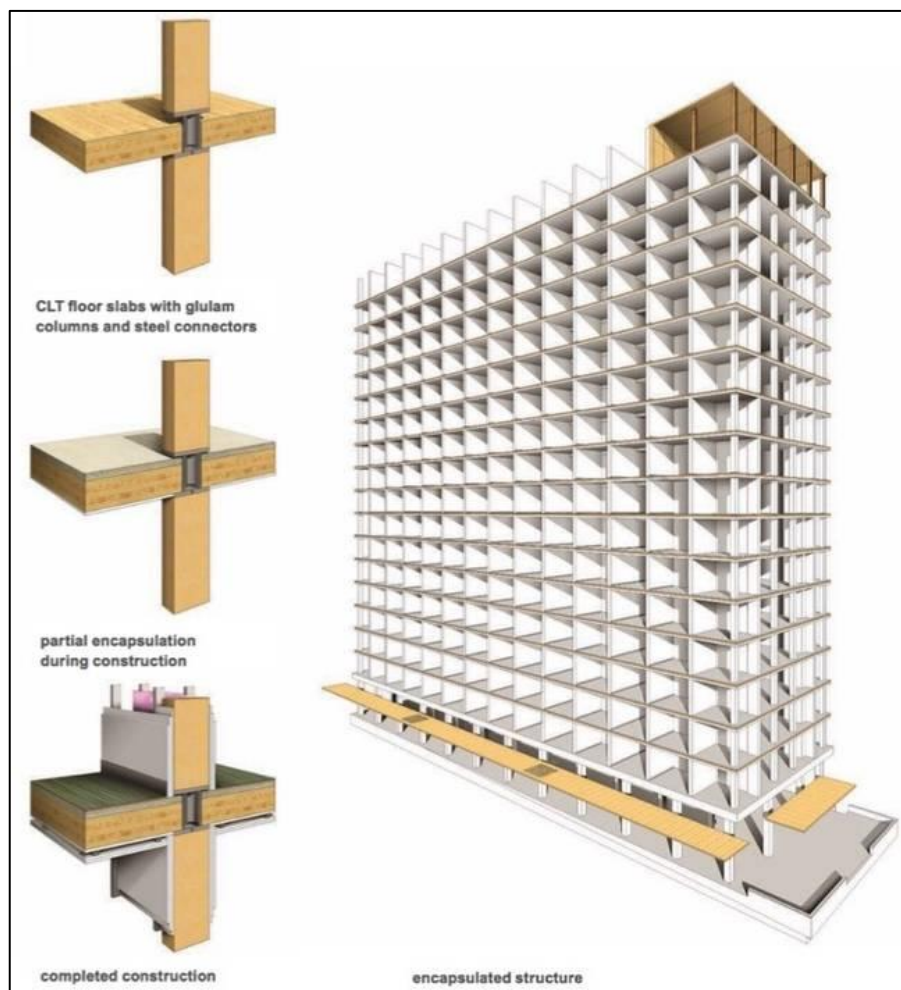
Slika 7: Organizacija pravne podlage požarne varnosti [7]

Figure 7: Legal background of fire safety organization [7]

Kako uspešen bo pristop k izpolnjevanju zahtev požarne varnosti, je odvisno od inženirskih načel, računov in računalniških orodij, ki jih pri tem uporabljamo. Običajno bolj do izraza pridejo računska orodja pri višjih objektih (Slika 8), prav tako celoten inženirski pristop. Občasno je k projektiranju potrebno pristopiti z nekoliko širšim pogledom. V primeru načrtovanja stavbe in poteka evakuacije ni smiselno samo šteti zasilnih izhodov glede na okupacijo, vendar se je potrebno vprašati, na kakšen način je evakuacija iz teh prostorov sploh mogoča. Dandanes imamo na voljo odlična računska orodja za simulacijo evakuacije, razvoja požara po stavbi in še veliko drugih pojavov, ki jih je priporočljivo izkoristiti. Računski modeli morajo sicer biti izvedeni skladno s pravilniki. Ti običajno predpisujejo, da morajo biti modeli osnovani na požarnih scenarijih, ki jih določimo pred modeliranjem. Najpomembnejši del je zagotavljanje dobrih vhodnih podatkov, inženirska in kritična kontrola rezultatov ter pravilna izbira računskega modela [16].

- Model mora biti primeren za dotični primer.
- Mora izpolnjevati zahteve, ki jih narekuje požarni scenarij.
- Model mora biti ustrezno kontroliran in ocenjen.

O numeričnem modeliranju križno lepljenega lesa pri požarni obtežbi je napisano poglavje 5.



Slika 8: Najvišja lesena stanovanjska stavba na svetu z višino 53 m v Britanski Kolumbiji [31]

Figure 8: World's highest residential timber structure with high of 53 m built in British Columbia [31]

## 2.4 OBNAŠANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI POŽARU

Križno lepljeni leseni produkti so se na trgu pojavili pred kratkim in veljajo za razmeroma nov produkt. Predvsem v inženirskem smislu, ko križno lepljene plošče uporabljamo kot dele nosilne konstrukcije, je poznavanje produkta bistveno, saj je to edini način za zadovoljivo natančne rezultate. Zaradi svoje narave izdelave se jih lahko uporablja za stene, plošče, strešne elemente ali kar kot stenaste nosilce. Za razliko od lahkih lesenih okvirnih konstrukcij, kjer se vertikalna obtežba prenaša preko enega posameznega »pokončnika«, so križno lepljene plošče kompaktne in omogočajo prenos velikih vertikalnih obtežb, obenem pa tudi pri visokih stavbah zagotavljajo visoko togost in robustnost. Poleg tega je velika prednost križno lepljenega lesa odlična zrakotesnost in toplotna izolativnost, prav slednja pa je pomembna pri požaru. Uporaba velikih panelov, katerih dimenzije so praktično sicer omejene s transportom in kapaciteto proizvodnje, teoretično pa so njihove dimenzije neomejene, je v zadnjih letih močno narasla. V primerjavi z lahкими okvirnimi lesenimi konstrukcijami je križno lepljen les precej masiven in prav ta njegova lastnost prednjači tudi v primeru požara, saj se s tem tveganje za širjenje požara v sosednji prostor znatno zmanjša. Istočasno je smiselno omeniti, da križno lepljen les lahko prav

tako predstavlja požarno obtežbo sam po sebi, saj je kot osnovni material uporabljen les, ki je gorljiv material [32].

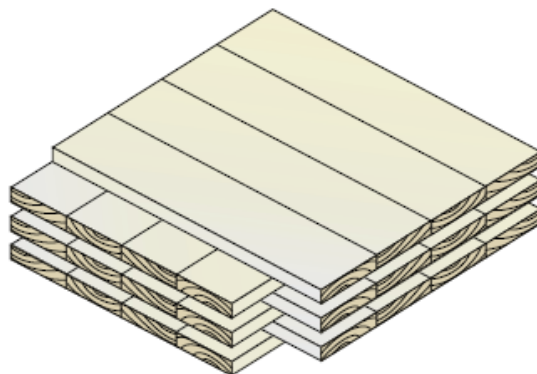
Križno lepljen les je narejen iz lamel, katerih debelina se pri običajnih uporabah giblje med 10 mm in 40 mm, širina pa med 80 mm in 240 mm. Lamele so vzdolžno spojene z zobatim spojem (Slika 9), tako da so kritična mesta izločena, spoj pa bolj nosilen od okoliškega lesa.



Slika 9: Primer zobatega spoja (Ratej, 2015, str. 26) [33]

Figure 9: Finger joint example (Ratej, 2015, p. 26) [33]

Število slojev lamel pri običajnih križno lepljenih ploščah se giblje med 3 in 7, občasno 9, pri čemer je število slojev vedno liho število. Debelina slojev se lahko od sloja do sloja spreminja. Sloji so med seboj običajno zasukani za  $90^\circ$ , obstajajo pa tudi primeri, ko je kot zasuka drugačen, npr.  $45^\circ$ . Produkt na ta način postane skoraj samo dvodimenzionalen, kar pomeni, da je sposoben obtežbo prenašati v obeh smereh (vzdolžno in prečno). Zaradi pogoja o lihem številu slojev sta skrajna sloja usmerjena enako in sicer običajno v smeri daljše stranice plošče oziroma v primeru enosmerno nosilne plošče v smeri prenosa obtežbe (Slika 10).



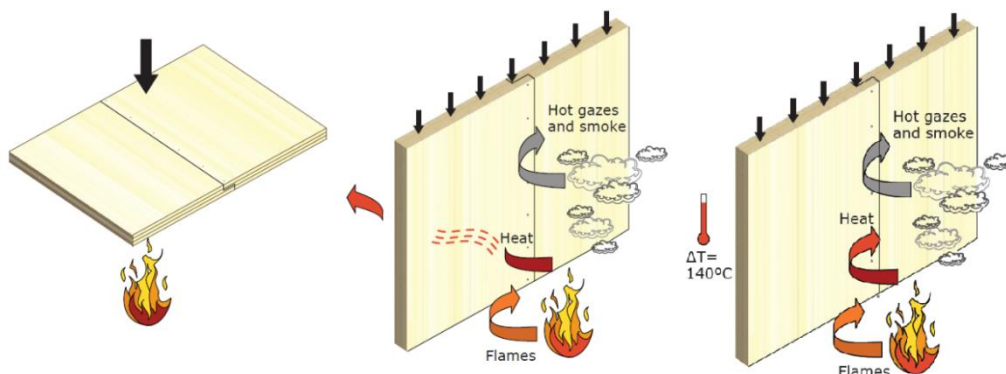
Slika 10: Skica križno lepljenega lesenega panela [34]

Figure 10: Sketch of cross-laminated timber panel [34]

Tako kot sam les, je tudi križno lepljen les gorljiv material. Osnovni predpogoj za uporabo lesa v stavbah je zadostna požarna varnost. Požarna varnost namreč pomembno prispeva k občutku udobja in varnosti

ljudi, zato je pogosto pomemben kriterij odločitve pri izbiri materiala nosilne konstrukcije v stanovanjskih stavbah [32].

Za analizo požarne varnosti v lesenih stavbah so bile širom sveta izvedene različne raziskave na to temo. Ena izmed eksperimentalnih raziskav je bila izvedena na trnadstropni konstrukciji sestavljeni iz križno lepljenih sten debeline 85 mm in plošč debeline 142 mm in izpostavljeni naravni požarni obtežbi. Poleg samega lesa so bile stene zaščitene z dvojnimi mavčnimi ploščami debeline 2 x 12,7 mm, stropi pa z mineralno kameno volno debeline 25,4 mm in mavčno ploščo 12,7 mm debeline. Požarna obtežba gostote 790 MJ/m<sup>2</sup> je bila uporabljena za potrebe preizkusa. Rezultati kažejo, da je do požarnega preskoka prišlo po 40 minutah, v fazo pojemačnega požara pa je požar prešel po 55 minutah. Najpomembneje pri tem pa je to, da v prostoru nad medetažno konstrukcijo ni bilo mogoče zaznati dima ali povišanih temperatur, kar izpolnjuje kriterij celovitosti. To kaže, da so možnosti uporabe križno lepljenega lesa neizmerno višje od možnosti s standardnimi lesenimi okvirnimi konstrukcijami [34].



Slika 11: Prikaz kriterija nosilnosti (R), celovitosti (E) in izolativnosti (I) na križno lepljenem lesu [34]  
Figure 11: Structural resistance, Integrity and Insulation criteria presentation o CLT example [34]

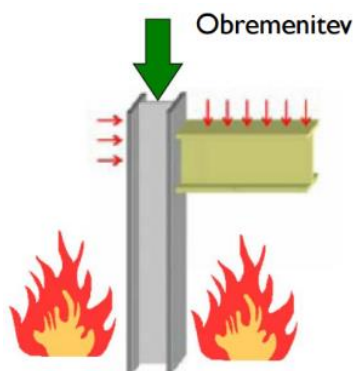
### 3 ZAHTEVE POŽARNE ODPORNOSTI PO STANDARDU EVROKOD 5

#### 3.1 OSNOVNE ZAHTEVE ZA KONSTRUKCIJE

Pri požarni odpornosti konstrukcije te v osnovi klasificiramo glede na kriterij nosilnosti, celovitosti in izolativnosti, lahko pa tudi glede na druge kriterije. Pri vsakem kriteriju navedemo čas v minutah, kar pomeni, koliko časa je pogoj še izpolnjen pri standardnem požarnem preizkusu. Torej lahko požarno odpornost opredelimo kot čas izpostavljenosti požaru, po katerem konstrukcija še ohranja svojo funkcijo kljub požaru. Kriterije lahko uporabljamo posamično ali v kombinaciji [35]. Poznamo:

##### a. Kriterij nosilnosti – R

Kriterij nosilnosti je definiran kot sposobnost konstrukcije, da ohrani svojo nosilnost v primeru požara, torej da ne izgubi nosilnosti. Izražena je v minutah (R15, R30, R60, ...). Klasifikacija R30 pomeni, da konstrukcijski element ali celotna konstrukcija preživi 30 minut standardne požarne obremenitve (glej Grafikon 1) [35].

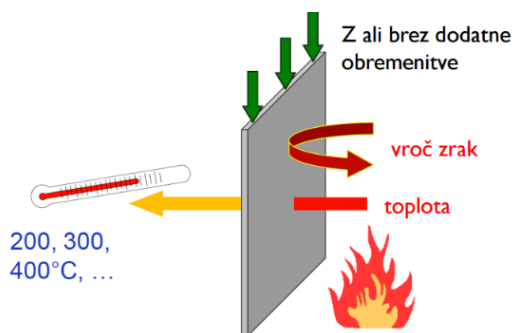


Slika 12: Ilustracija kriterija nosilnosti R (Hozjan, 2016) [35]

Figure 12: Load carrying capacity criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]

##### b. Kriterij celovitosti – E

Kriterij celovitosti je definiran kot sposobnost gradbenega elementa, da prepreči prehod plamena in vročih dimnih plinov. Element, ki je izpostavljen požaru, ne sme formirati razpok in odprtlin. Izražena je v minutah (E15, E30, E60, ...). Klasifikacija E30 pomeni, da konstrukcijski element preživi 30 minut standardne požarne obremenitve, brez da bi se formirale razpoke ali da bi nastale odprtine [35].

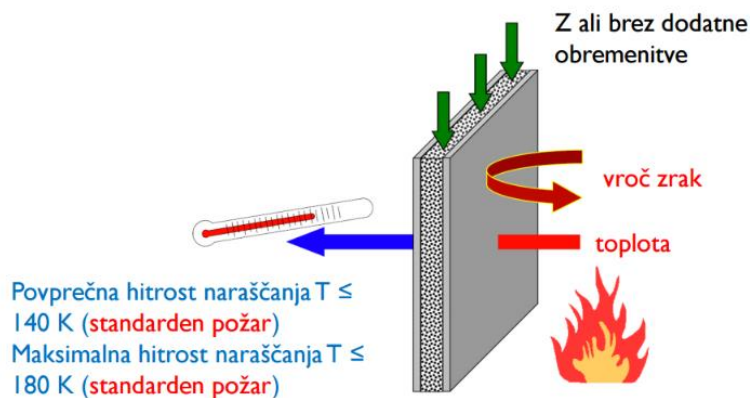


Slika 13: Ilustracija kriterija celovitosti E (Hozjan, 2016) [35]

Figure 13: Integrity criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]

## c. Kriterij izolativnosti – I

Kriterij izolativnosti je definiran kot sposobnost gradbenega elementa, da prepreči prevelik prenos oziroma prevod toplote. Elementi morajo imeti določene toplotno izolativne lastnosti. Izražena je v minutah (I15, I30, I60, ...). Klasifikacija I30 pomeni, da konstrukcijski element preživi 30 minut standardne požarne obremenitve, brez da bi se prenesla prevelika količina toplote [35].



Slika 14: Ilustracija kriterija izolativnosti I (Hozjan, 2016) [35]

Figure 14: Insulation criteria illustration (Hozjan, 2016) [35]

- d. Kriterij sevanja – W
- e. Kriterij mehanske odpornosti – M
- f. Kriterij samozapiranja – C
- g. Kriterij prepustnosti dima – S
- h. Kriterij požarne zaščite – K

## 4 POŽARNA ODPORNOST KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

### 4.1 METODE ZA NAČRTOVANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI SOBNI TEMPERATURI

Nosilnost lepljenih lesenih konstrukcij temelji na sodelovanju dveh sosednjih plasti lesa in lepila med njima, ki elementa poveže v močan kompozit. Dodajanje več plasti lesa ima na ta način lahko velike prednosti v primerjavi z masivnim lesom, pri čemer je glavna prednost izločevanja slabih mest v osnovnem materialu. Na ta način dobimo tudi križno lepljen les, ki je konstrukcijsko močnejši od masivnega, hkrati pa lahko natančneje ocenimo materialne karakteristike. S tem je možno premoščati daljše razpone, pri čemer kot horizontalni element zelo pogosto nastopa križno lepljena plošča. Poleg odstranjenega velikega dela slabih mest v lesu je križno lepljen les tudi odpornejši na spremembe vlažnosti. Njegova posebnost pa je prenašanje obtežbe v obeh smereh, kar omogoča večjo optimizacijo tako plošč kot tudi sten [34] in s tem bolj ekonomično gradnjo v primerjavi z masivno leseno gradnjo. Poleg sposobnosti prenašanja obtežb in primernosti uporabe pri večjih razponih je križno lepljen les uporaben tudi za stenaste elemente za prevzem strižnih sil pri horizontalni obtežbi, kot je med drugim tudi potresna obtežna. Za načrtovanje križno lepljenega lesa se v največji meri uporabljajo tri metode, te temeljijo na analitičnih metodah, ki so eksperimentalno preverjene [41].

#### 4.1.1 Teorija mehansko povezanih nosilcev

Teorija mehansko povezanih nosilcev, znana tudi pod imenom »γ« metoda, je bila s strani Karla Möhlerja idejno predstavljena že leta 1955. Namenjena je bila načrtovanju nosilcev, ki so bili povezani z mehanskimi veznimi sredstvi konstantnih togosti  $K_i$ . Na ta način je bila razvita enačba za določitev skupne efektivne togosti  $EI_{eff}$  (Enačba 4.1), ki upošteva skupno togost enovitega elementa iz vzporednih plasti povezanih z mehanskimi veznimi sredstvi. Efektivna togost je pogojena z učinkovitostjo povezave med sloji, ki jo označimo z  $\gamma$  (Enačba 4.2). Pri tem se za nepovezane elemente upošteva vrednost 0, za popolnoma povezane elemente pa vrednost 1 [41] [42].

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2 \quad (4.1)$$

$$\gamma_i = \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2} \right]^{-1}; 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (4.2)$$

kjer je:

$i$  – zaporedna številka sloja,

$E_i$  – elastični modul,

$I_i$  – vztrajnostni moment,

$A_i$  – prerez  $i$ -te plasti,

$a_i$  – razdalja od težišča  $i$ -tega sloja do težišča celotnega elementa,

$s_i$  – razdalja med veznimi sredstvi,

$l$  – razpon.



Pri načrtovanju križno lepljenega lesa je zaradi lepljenja pod kotom  $90^\circ$  potrebno enačbe nekoliko modificirati. Plasti med seboj niso več vzporedne, temveč pravokotne. Sloje, katerih vlakna so usmerjena pravokotno glede na smer prenosa obtežbe, je potrebno upoštevati kot nenosilna, v » $\gamma$ « metodi pa se jih upošteva kot mehanska vezna sredstva. Prečnim slojem metoda ne pripisuje nobene osne nosilnosti in togosti. Njihova togost vseeno ni enaka nič, zaradi strižne podajnosti pa pride do zdrsov med slojem nad in pod prečno plastjo. Ta pojav je znan pod pojmom strižni zdrs ali »rolling shear«, metoda » $\gamma$ « pa fenomen le grobo upošteva. V enačbo 4.1 je vpeljana modifikacija, kjer se del enačbe priredi in deloma upošteva strižne karakteristike prečnih plasti, kot je prikazano v enačbi 4.3.

$$\frac{s}{K_i} = \frac{\bar{h}_i}{G_R b} \quad (4.3)$$

kjer je:

$\bar{h}_i$  – debelina sloja,

$G_R$  – modul strižnega zdrsa,

$b$  – širina elementa.

S tem se enačba 4.2 spremeni in dobimo:

$$\gamma_i = \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i S_i}{K_i l^2} \right]^{-1} \rightarrow \gamma_i = \left[ 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i \bar{h}_i}{G_R b l^2} \right]^{-1} \quad (4.4)$$

Efektivna togost, ki jo dobimo preko faktorja  $\gamma_i$ , se uporabi za določevanje največje dovoljene napetosti pri čistem upogibu (Enačba 4.5). To napetost nato primerjamo s trdnostjo križno lepljenega lesa. Največja napetost nastopi v prvem (spodnjem) sloju 1.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{Ed} E_1}{E I_{eff}} (\gamma_1 a_1 + 0,5 h_1) \quad (4.5)$$

kjer je:

$E_1$  – elastični modul prvega sloja,

$\gamma_1$  – stopnja povezave med prvim in drugim slojem,

$h_1$  – debelina prvega sloja,

$a_1$  – razdalja od težišča panela do težišča prvega sloje.

#### 4.1.2 Kompozitna teorija

Kompozitna teorija je znana tudi kot » $k$ « teorija, njen utemeljitelj je leta 2004 postal Hans Joachim Blass. Metoda upošteva obremenitve in lastnosti vsakega sloja posebej tako v smeri vlaken kot tudi pravokotno nanje. Pri računu se na podlagi lastnosti slojev formira nadomestni homogeni sloj, ki je odvisen od dejanske zgradbe lepljenega elementa. Osnovni predpostavki sta Bernoullijeva hipoteza o ravnih prečnih prerezih ter upoštevanje linearnega odnosa med napetostmi in deformacijami (material se obnaša le elastično). Metoda ne upošteva strižnih deformacij, kar omejuje metodo na primere z velikimi razmerji med razpetino in višino elementa, kjer strižne deformacije nimajo bistvenega vpliva. Vsak faktor » $k_i$ « korigira trdnost, ki jo primerjamo z največjim nivojem obremenitve. Faktorji  $k_i$  so določeni za posamezni sloj, za katerega računamo faktor, ti pa so odvisni od: elastičnega modula pod

kotom  $90^\circ$ , elastičnega modula vzporedno z vlakni in debeline obravnavanega sloja ter debeline celotnega križno lepljenega elementa. Določeni so kot razmerje med odpornostjo oziroma togostjo obravnavanega slojevitega prečnega prereza in odpornostjo oziroma togostjo navideznega homogenega prereza, katerega vlakna so po vsej višini vzporedna s smerjo obravnavane napetosti. Imamo faktorje od  $k_1$  do  $k_4$ , pri čemer se  $k_1$  in  $k_2$  nanašata na obremenitve pravokotno na ravnino plošče,  $k_3$  in  $k_4$  pa na obtežbo v ravnini plošče. Zadostna nosilnost je zagotovljena v primeru izpolnjevanja spodnje enačbe [41][42].

$$\sigma_{max} \leq k f_{b,0} \quad (4.6)$$

kjer je:

$f_{b,0}$  – upogibna trdnost,

$k$  – sestavni koeficient.

#### 4.1.3 Metoda strižne analogije

Metodo je razvil Heinrich Kreuzinger iz tehnične univerze v Münchnu leta 1999. Kot že samo ime pove, metoda upošteva tudi strižne deformacije slojev in je zaradi tega trenutno najbolj natančna metoda za račun križno lepljenega lesa [43]. Strižna togost je vključena v enačbi za določitev največjega povesa (Enačba 4.7) križno lepljene plošče, saj upošteva različne module elastičnosti in strižne module posameznih plasti. Enačba je nastavljena tako, da je primerna za račun plošč s poljubnim številom slojev. Modelirana je na način, kot da bi imeli dva nosilca, ki sta med seboj povezana z osno popolnoma togimi elementi, efektivna upogibna (Enačba 4.8) in strižna togost (Enačba 4.9) nosilcev pa se izračuna po enačbah spodaj<sup>1</sup>.

$$w_{max} = \frac{5}{384} \frac{qL^2}{EI_{eff}} \left(1 + \frac{48EI_{eff}k}{5GA_{eff}L^3}\right) \quad (4.7)$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2 \quad (4.8)$$

$$GA_{eff} = \frac{a^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2G_1b}\right) + \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i}\right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b}\right)\right]} \quad (4.9)$$

kjer je:

$w_{max}$  – največji poves,

$q$  – porazdeljena obtežba,

$L$  – razpon,

$k$  – strižni koeficient glede na obliko prereza,

$EI_{eff}$  – efektivna upogibna togost,

$GA_{eff}$  – efektivna strižna togost,

$E_i$  – elastični modul,

$G_i$  – strižni modul,

$b_i$  – širina,

$h_i$  – debelina.

<sup>1</sup> Opomba: enačbe (4.7) do (4.9) veljajo za primer prostoležečega nosilca, ki je obremenjen z enakomerno zvezno obtežbo.

Teorija mehansko povezanih nosilcev in metoda strižne analogije predpostavita stopnjo strižne povezanosti, vendar vseeno obravnavata zgolj strižne deformacije v posameznem sloju. Povezanost slojev med seboj je v vseh treh metodah upoštevana kot popolna, torej brez zdrsa [43]. Ta predpostavka je smiselna v primeru povezovanja slojev z lepljenjem, saj se lepilo lahko upošteva kot togo vezno sredstvo brez zdrsan ( $\gamma_{lepilo} = 1,0$ ).

#### 4.2 KONTROLA POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENIH ELEMENTOV

Glavna težava pri požarni izpostavljenosti lesenih konstrukcij je nedvomno njena mehanska odpornost. V nadaljevanju je opisan postopek za račun križno lepljenih elementov skladno s standardom EN 1995-1-2, pri čemer pa so vrednosti hitrosti oglenenja v poglavju 4.2.3 in 4.2.4 povzete iz raziskav, ki so jih objavili v podjetju StoraEnso [36].

##### 4.2.1 Določitev vpliva

Za določitev ustrezne požarne odpornosti mora biti zadoščeno spodnjemu pogoju (Enačba 4.10) za zahtevani čas požarne izpostavljenosti  $t$  [36].

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (4.10)$$

kjer je:

$E_{d,fi}$  – projektna vrednost vplivov pri požarni obtežni kombinaciji (= Load Effect),

$R_{d,fi}$  – pripadajoča projektna odpornost pri požarni obtežni kombinaciji (= Resistance).

Projektna vrednost vplivov (Enačba 4.11) pri požarni obtežbi se skladno z EN 1990 [6] določi pri času  $t = 0$  z upoštevanjem kombinacijskih faktorjev  $\psi_{1,1}$  ali  $\psi_{1,2}$  [36].

$$E_{dA} = \sum G_{k,j} + P + A_d + Q_{k,1}(\psi_{1,1}) + \sum \psi_{2,1} Q_{k,i} \quad (4.11)$$

kjer je:

$G_{k,j}$  – karakteristična vrednost stalnega vpliva  $j$ ,

$P$  – zadnja reprezentativna vrednost predobtežbe,

$A_d$  – projektna vrednost nezgodne obtežbe,

$Q_{k,1}$  – karakteristična vrednost prevladujoče spremenljive obtežbe  $1$ ,

$Q_{k,i}$  – karakteristična vrednost preostalih spremenljivih obtežb  $i$ ,

$\psi_1$  – kombinacijski faktor za pogoste vrednosti spremenljivih vplivov,

$\psi_2$  – kombinacijski faktor za navidezno stalne vrednosti spremenljivih vplivov.

Poenostavljeno se lahko projektne vrednosti vplivov v požarnem projektne stanju  $E_{d,fi}$  določi s pomočjo projektne vrednosti pri sobni temperaturi, ki so korigirane z redukcijskim faktorjem (Enačba 4.12).

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (4.12)$$

kjer je:

$E_{d,fi}$  – projektna vrednost vplivov pri požarni obtežni kombinaciji,

$\eta_{fi}$  – redukcijski faktor za določitev projektne vrednosti vplivov pri požarnem obtežnem stanju,

$E_d$  – Projektna vrednost vplivov pri sobni temperaturi in osnovni projektne kombinaciji.

Redukcijski faktor  $\eta_{fi}$  se določi na podlagi spodnjih enačb (Enačba 4.13 in 4.14).

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (4.13)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (4.14)$$

kjer je:

$Q_{k,1}$  – karakteristična vrednost prevladujoče spremenljive obtežbe  $I$ ,

$G_k$  – karakteristična vrednost stalnega vpliva,

$\gamma_G$  – delni varnostni faktor za stalne vplive,

$\gamma_{Q,1}$  – delni varnostni faktor za prevladujočo spremenljivo obtežbo,

$\psi_{fi}$  – kombinacijski faktor za pogoste vrednosti spremenljivih vplivov v požarnem projektne stanju ( $\psi_{1,1}$  ali  $\psi_{1,2}$ ),

$\xi$  – redukcijski faktor za neugodne stalne vplive  $G$ .

Kot poenostavitev lahko skladno s EN 1995-1-2 namesto računa redukcijskega faktorja  $\eta_{fi}$  upoštevamo vrednost  $\eta_{fi} = 0,6$ . Za objekte kategorije E po EN 1991-1-2:2005 [6] se izjemoma za primere večjih stalnih obtežb upošteva vrednost 0,7.

Kot pričakovano določitev projektnih vplivov  $E_{d,fi}$  s poenostavljenim postopkom in uporabo faktorja  $\eta_{fi}$  vrne višje, torej bolj konzervativne vrednosti.

#### 4.2.2 Določitev mehanske odpornosti

Za določitev mehanske odpornosti se projektne vrednosti nosilnosti in togosti določi s spodnjima enačbama (Enačba 4.15 in 4.16).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.15)$$

kjer je:

$f_{d,fi}$  – projektna vrednost nosilnosti pri požaru,

$k_{mod,fi}$  – korekcijski faktor pri požarnem stanju za metodo reduciranega prečnega prereza ( $k_{mod,fi} = 1,0$ ),

$f_{20}$  – Vrednosti nosilnosti z upoštevanjo 20 % fraktilo, določeno pri sobni temperaturi ( $f_{20} = k_{fi} f_k$ ),

$k_{fi}$  – koeficient za pretvarjanje vrednosti iz 5 % na 20 % fraktilo ( $k_{fi} = 1,15$  za CLT),

$\gamma_{M,fi}$  – delni varnostni faktor za les pri požaru.

Pri računu konstrukcij na požarno obtežno stanje se namesto 5 % uporablja 20 % fraktilo, kar se upošteva preko faktorja  $k_{fi}$ , ki je za križno lepljenem les enak  $k_{fi} = 1,15$  [36].

Projektne vrednosti togosti, ki jo obravnavamo preko elastičnega in strižnega modula, se določa po spodnji enačbi (Enačba 4.16).

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.16)$$

kjer je:

$S_{d,fi}$  – projektna vrednost togosti pri požaru (modul elastičnosti ali strižni modul),

$k_{mod,fi}$  – korekcijski faktor pri požarnem stanju za metodo reduciranega prečnega prereza ( $k_{mod,fi} = 1,0$ ),

$S_{20}$  – vrednosti togosti (modul elastičnosti ali strižni modul) z upoštevanom 20 % fraktilo, določeno pri sobni temperaturi ( $S_{20} = k_{fi} S_{05}$ ),

$S_{05}$  – vrednosti togosti (modul elastičnosti ali strižni modul) z upoštevanom 5 % fraktilo, določeno pri sobni temperaturi,

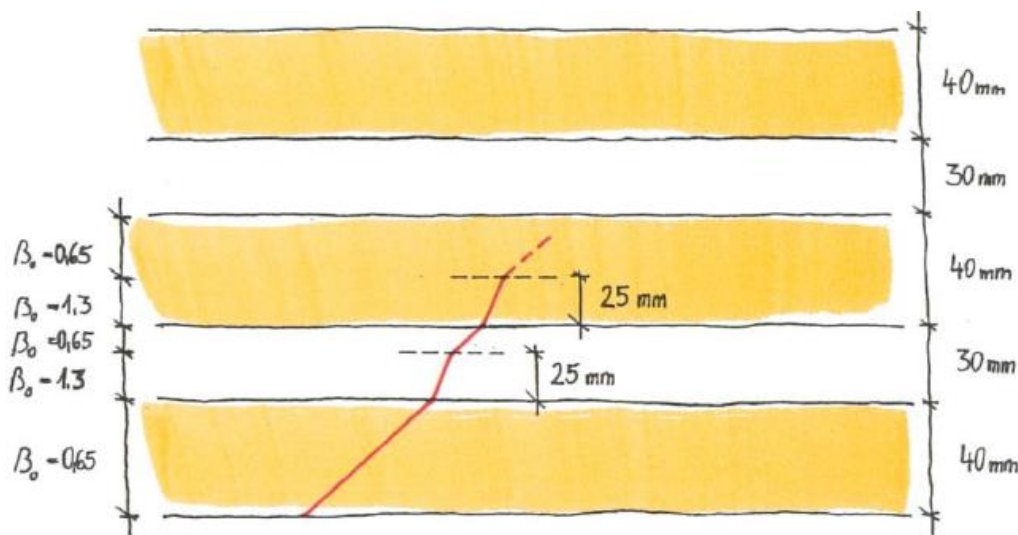
$k_{fi}$  – koeficient za pretvarjanje vrednosti iz 5 % na 20 % fraktilo ( $k_{fi} = 1,15$  za CLT),

$\gamma_{M,fi}$  – delni varnostni faktor za les pri požaru.

#### 4.2.3 Hitrost oglečenja nezaščitenih elementov

Uporaba poliuretanskih lepil lahko med požarom pripelje do topljenja in delaminacije posameznih slojev, kar pomeni, da oglje na izpostavljenem sloju, ki predstavlja zaščitno plast za ostale sloje, odpade in dobimo direkten vpliv požara na nov loj oz. les. Fenomen je natančneje opisan v poglavju 2.4. Za lažjo predstavo je fenomen pojasnjen še spodaj, saj je predvsem pri križno lepljenih ploščah to potrebno še posebej upoštevati pri določanju hitrosti oglečenja. Hitrost oglečenja se namreč poveča, vse dokler globina oglja ne doseže 25 mm, nato se hitrost približno razpolovi in po določenem času ostane konstantna [36]. Ta fenomen je značilen pri obremenjevanju s standardno požarno krivuljo.

- a. Za določitev eno-dimenzijske hitrosti oglečenja  $\beta_0$  lahko pri horizontalnih elementih vzamemo sledeče vrednosti [36]:
- 0,65 mm/min; v primeru vpliva požara samo na prvi sloj (redko)
  - 1,3 mm/min; za vse dodatne sloje, ki so pod vplivom požarne obtežbe do trenutka, ko debelina zoglenega sloja ne doseže 25 mm. Od tega časa naprej pa se upošteva hitrost oglečenja 0,65 mm/min.



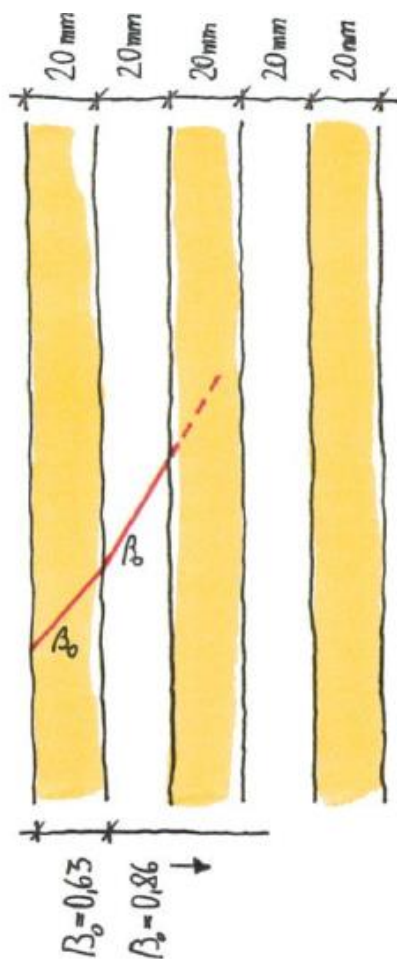
Slika 15: Diagram primera oglečenja in hitrosti oglečenja na horizontalne križno lepljenem elementu (CLT 180 5s), ki prikazuje hitrosti oglečenja 1,3 mm/min za vsak naslednji sloj, ki je izpostavljen požaru, vse dokler ni dosežena debelina oglja 25 mm (StoraEnso, 2016, str. 15) [36]

Figure 15: Diagram illustrating an example of charring or the charring rate of a horizontal CLT component (CLT 180 L5s), which depicts charring rate of 1,3 mm/min for each additional layer affected by fire until the formation of a new 25 mm-thick char layer (StoraEnso, 2016, p. 15) [36].

b. Pri stenskih elementih pa lahko privzamemo sledeče vrednosti [36]:

- 0,63 mm/min; v primeru vpliva požara samo na prvi sloj (redko)
- 0,86 mm/min; za vsak naslednji prizadeti sloj

Lahko ugotovimo, da je za prvo plast hitrost oglenenja praktično enaka tako za stenske (vertikalne) kot ploščaste (horizontalne) elemente, saj razlika 0,02 mm/min ni bistvena. Pri pospešenem oglenenju po delaminaciji pa je razlika očitna, kar je tudi za pričakovati, saj so lamele pri horizontalnih elementih direktno obremenjene s plamenom, pri vertikalnih elementih pa plameni zgolj oplazijo element vzporedno z lamelami.



Slika 16: Diagram primera oglenenja in hitrosti oglenenja na vertikalnem križno lepljenem elementu (CLT 100 5s), ki prikazuje predvideno hitrost oglenenja 0,86 mm/min za vsak naslednji sloj, ki je izpostavljen požaru (StoraEnso, 2016, str. 15) [36].

Figure 16: Diagram showing an example of charring or the charring rate of a vertical CLT component (CLT 100 L5s), which shows estimated increased charring rate of 0,86 mm/min from the second layer affected by fire (StoraEnso, 2016, p.15) [36].

#### 4.2.4 Hitrost oglenenja z mavcem zaščitene križno lepljenih lesenih elementov

Za povišanje požarne odpornosti sten, plošč, stropov ali ostalih nosilnih elementov se največkrat na njihovo površino nameščajo mavčne plošče. Kljub temu, da se standardne dimenzije mavčnih plošč majhne (10 mm – 15 mm), pa je učinkovitost precej visoka.

Učinkovitost teh plošč se skriva v povezanih vodnih kristalih v jedru plošč, kjer je koncentracija okoli 20 %. Sprejemanje energije poteka z izhlapevanjem omenjenih vodnih kristalov, kar privede do plasti vodne pare na izpostavljeni strani. V jedru torej ostane precej izsušen mavec, ki deluje kot izolacija, saj zmanjšuje toplotno prevodnost plošče. Mavčne plošče, ki se uporabljajo v ta namen, vsebujejo tudi steklena vlakna, ki povezujejo mavčne delčke. Na ta način plošča ohrani strukturo tudi v primeru požarne obtežbe [36].



Slika 17: Dvoplastna požarna zaščita iz mavčni plošč med požarnim preizkusom velikega merila (StoraEnso, 2016, str. 16) [36].

Figure 17: Two-ply fire protection plasterboard cladding exposed to fire during a large-scale fire test (StoraEnso, 2016, p. 16) [36].

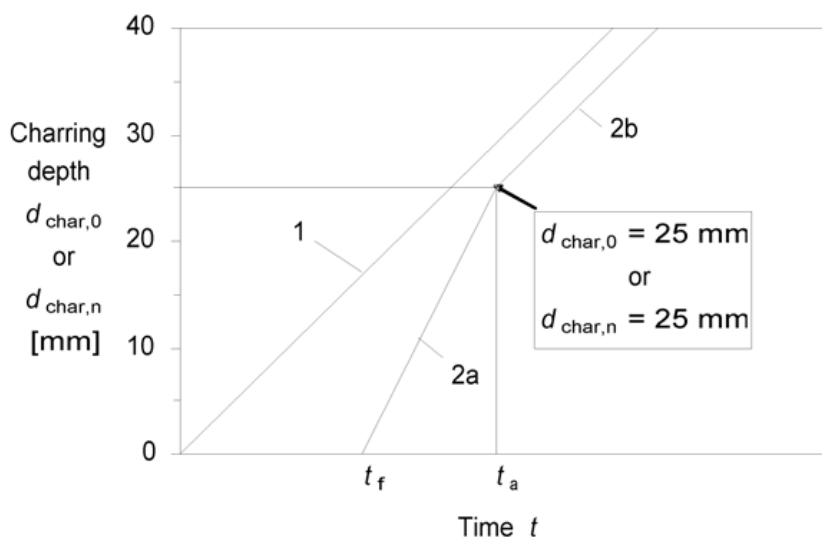
Na zgornji sliki (Slika 17) lahko vidimo obnašanje mavčne plošče pri požarni obremenitvi. Kot je razvidno, se po razpokah in odpadanju zoglenelih delov plošče pojavijo večje špranje med stiki. Po odstopu prve plasti se pojavijo razpoke tudi na drugi plasti. Ko se te razpoke širijo, plamen počasi doseže les in ga segreva, to pa povzroči proizvodnjo in izhlapevanje plinov iz lesa. Oglenenje lesa se običajno začne, ko odpade mavčna zaščita, saj prej temperatura ne naraste preko 300 °C, kar velja okvirno za mejno temperaturo oglenenja [36].

V primeru zaščitenega elementa je čas začetka oglenenja lesa  $t_{ch}$  in čas odpovedi zaščite  $t_f$  bistven. EN 1995-1-2 navaja sledeče [37]:

- Začetek oglenenja je zakasnen do časa  $t_{ch}$ .

- Oglenenje lesa se lahko pojavi pred odpovedjo zaščitne plasti, vendar je hitrost oglenjenja bistveno nižja, kot je to opisano zgoraj (poglavje 4.2.3) ali kot navaja EN 1995-1-2 [37], vse dokler ne odpove zaščita pri čas  $t_f$ .
- Hitrost oglenjenja po času  $t_f$  do časa dosežene globine 25 mm  $t_a$  je večja kot jo navaja EN 1995-1-2 [37].
- Hitrost oglenjenja od časa  $t_a$ , ko je globina oglenjenja konstantna, je ponovno nižja in skladna z EN 1995-1-2 [37].

Na spodnjih grafikonih so prikazani primeri, ki povzemajo zgornja dejstva. Prvi grafikon (Grafikon 2) prikazuje primer za nezaščitene križno lepljene elemente, ko je globina oglenjenja 25 mm, drugi (Grafikon 3) primer nezaščitenega elementa, ko globina oglenjenja še ni 25 mm in tretji primer (Grafikon 4) zaščiten element.



Grafikon 2: Spreminjanje globine oglenjenja ko je  $t_{ch}=t_f$  in globina oglenjenja vsaj 25 mm [37]

Graph 2: Variation of charring depth by time when  $t_{ch}=t_f$  and the charring depth at time  $t_a$  is at least 25 mm [37].

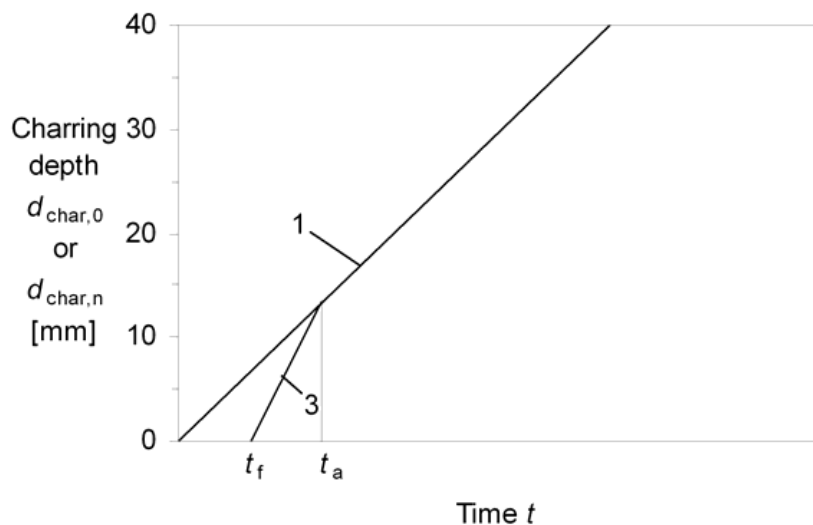
Krivulja 1: Razmerje za nezaščitene elemente med celotnim trajanjem požara za hitrost oglenjenja  $\beta_n$  (ali  $\beta_0$ )

Krivulja 2: Razmerje za zaščiten element po odpovedi zaščite

Krivulja 2a: Po odpovedi zaščite se hitrost oglenjenja poveča

Krivulja 2b: Ko globina oglenjenja doseže 25 mm, se hitrost oglenjenja ponovno zmanjša

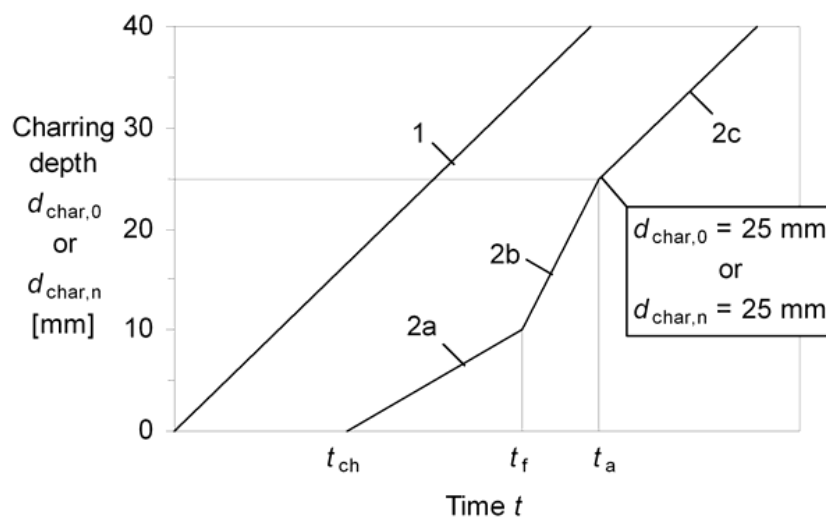




Grafikon 3: Spreminjanje globine oglenenja ko je  $t_{ch}=t_f$  in globina oglenenja manjša od 25 mm [37]  
 Graph 3: Variation of charring depth with time when  $t_{ch}=t_f$  and charring depth at  $t_a$  is less than 25 mm [37]

Krivulja 1: Razmerje za nezaščiteni element med celotnim trajanjem požara

Krivulja 3: Razmerje za zaščiten element po odpovedi zaščite pri  $t_f$  in pred časom  $t_a$



Grafikon 4: Spreminjanje globine oglenenja s časom ko  $t_{ch} < t_f$  [37]

Graph 4: Variation of charring depth with time when  $t_{ch} < t_f$  [37]

Krivulja 1: Razmerje za nezaščitene elemente med celotnim trajanjem požara za hitrost oglenenja  $\beta_n$  (ali  $\beta_0$ )

Krivulja 2: Razmerje za sprva zaščitene elemente, kjer se oglenenje pojavi pred odpovedjo zaščite

Krivulja 2a: Začetek oglenenja z zmanjšano hitrostjo pri  $t_{ch}$ , ko je zaščita še dejavna

Krivulja 2b: Po odpovedi zaščite se hitrost oglenenja poveča

Krivulja 2c: Ko globina oglenenja preseže 25 mm, se hitrost oglenenja ponovno zniža

Skladno s standardom EN 520:2004 se mavčne plošče klasificira v razrede A, D, F, H1, 1 in R [38]. Za požarno odpornost je bistven kriterij F, pri odpornosti na vodo pa H2.

- a. Hitrost oglenenja za sprva zaščitene komponente

Za čase  $t_{ch} < t < t_f$  se hitrosti oglenjenja podane v poglavju 4.2.3 korigira s faktorjem  $k_2$  (Enačba 4.17), ki velja za eno plast mavčne plošče.

$$k_2 = 1 - 0,018h_p \quad (4.17)$$

kjer je:

$h_p$  – Debelina zaščitnega mavčnega sloja [mm].

V primeru uporabe večslojne mavčne zaščite se za vrednost  $h_p$  upošteva debelina sloja ob lesu [36]. V primeru uporabe zaščitnega sloja iz plošč s kamenimi vlakni (debelina vsaj 20 mm, gostote vsaj 26 kg/m<sup>3</sup> in s temperaturo taljenja večjo od 1000 °C) se lahko faktor  $k_2$  vzame iz spodnje preglednice, kjer se vmesne vrednosti lahko linearno interpolira (Preglednica 5)

Preglednica 5: Vrednosti faktorja  $k_2$  za lesene elemente zaščitene s ploščami s kamenimi vlakni (StoraEnso, 2016, str. 18) [36]

Table 5: Values of  $k_2$  for timber components protected by rock fiber batts (StoraEnso, 2016, p. 18) [36]

Debelina $h_p$ [mm]	$k_2$
20	1
≥ 45	0,6

Po odpovedi zaščitne plasti  $t_f < t < t_a$  se mora hitrost oglenjenja iz poglavja 4.2.3 korigirati s faktorjem  $k_3 = 2,0$ . Pri časih  $t > t_a$  se vrednosti ne korigira več [36].

Skladno z zgornjim odstavkom se tudi čas  $t_a$  določi drugače (Enačba 4.18).

$$t_a = \begin{cases} 2 t_f \\ \frac{25}{k_3 \beta_n} + t_f \end{cases} \quad (4.18)$$

Ali za  $t_{ch} < t_f$  (Enačba 4.19)

$$t_a = \frac{25 - (t_f - t_{ch})k_2 \beta_n}{k_3 \beta_n} \quad (4.19)$$

$\beta_n$  – projektna vrednost nominalne hitrosti oglenjenja (za eno-dimenzionalno oglenenje  $\beta_0$ ) [mm/min]

c. Začetek oglenjenja za sprva zaščitene elemente

#### Enoslojna mavčna plošča tipa A, F ali H po EN520 [38]

Za obloge iz enega sloja mavčne plošče tipa A, F ali H, med katerimi špranje ne presegajo 2 mm širine, se lahko čas začetka oglenjenja  $t_{ch}$  določi kot (Enačba 4.20).

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 14 \quad (4.20)$$

V primeru kjer imamo špranje širše od 2 mm in te niso zapolnjene, ali pa se element nahaja zraven stika, se čas začetka oglenjenja nekoliko skrajša in se določi po spodnji enačbi 4.21.

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 23 \quad (4.21)$$

kjer je:

$t_{ch}$  – Čas začetka oglenjenja zaščitne komponente [min]

$h_p$  – Debelina zaščitnega mavčnega sloja [mm]

#### Dvoslojna mavčna plošča tipa A ali H po EN520 [38]

Za dvoslojne obloge iz mavca tipa A ali H se lahko začetek oglenjenja določi kot prikazujeta enačba 4.20 in 4.21, pri čemer se za  $h_p$  upošteva debelino zunanje obloge in 50 % debeline notranje obloge. Pri tem mora veljati, da sta zunanja in notranja plast pritrjeni na enak način (običajno s sponkami) [36].

#### Dvoslojna mavčna plošča tipa F po EN520 [38]

Tudi v primeru uporabe požarno odpornih mavčnih plošč klasifikacije F lahko uporabimo enačbi 4.20 in 4.21, pri čemer se za  $h_p$  upošteva debelino zunanje obloge in 80 % debeline notranje obloge, kar podaljša čas začetka oglenjenja [36].

#### Druge perforirane plošče

Za primer zaščite lesenega križno lepljenega elementa s ploščami iz kamenih vlaken (debelina vsaj 20 mm, gostote vsaj 26 kg/m<sup>3</sup> in s temperaturo taljenja večjo od 1000 °C) lahko začetek oglenjenja  $t_{ch}$  določimo po enačbi 4.22.

$$t_{ch} = 0,07(h_{ins} - 20)\sqrt{\rho_{ins}} \quad (4.22)$$

kjer je:

$t_{ch}$  – čas začetka oglenjenja zaščitne komponente [min]

$h_{ins}$  – debelina izolacijskega materiala [mm]

$\rho_{ins}$  – gostota izolacijskega materiala [kg/m<sup>3</sup>]

#### d. Odpoved požarne zaščite

Odpoved zaščitnega sloja je odvisna od oglenjenja ali mehanskega razpada zaščitne plasti, razdalje med točkami pritrditve obloge, tipa in globine sponk za pritrjevanje v nezoglenelem delu [36].

#### Obloga iz ene mavčne plošče tipa A ali H po EN520 [38]

Čas odpovedi zaščite  $t_f$  je kar enak času začetka oglenjenja  $t_{ch}$  (Enačba 4.23). Po odpovedi zaščitnega sloja se hitrost oglenjenja podvoji vse do časa  $t_a$ , ko globina oglja doseže 25 mm [36].

$$t_f = t_{ch} \quad (4.23)$$

#### Obloga iz ene mavčne plošče tipa F po EN520 [38]

Pri mavčnih ploščah tipa F je napredovanje od časa  $t_{ch}$  do  $t_f$  oglenjenja počasnejše. Po odpovedi se enako kot prej hitrost oglenjenja podvoji, vse dokler globina ne doseže 25 mm, nato pa se vrne na osnovno vrednost. EN 1995-1-2 [37] ne navaja posebnih informacij za požarno odporne mavčne obloge in obloge

tipa F po EN 520 [38]. Glede na eksperimente lahko čas  $t_f$  določimo za stropne (Enačba 4.24) in stenske (Enačba 4.25) elemente [36].

$$t_f = 2,2 h_p + 4 \quad (4.24)$$

$$t_f = 1,4 h_p + 6 \quad (4.25)$$

kjer je:

$t_f$  – čas odpovedi požarne obloge [min]

$h_p$  – debelina zaščitnega mavčnega sloja [mm]

Pri določevanju časa odpovedi večslojnih mavčni požarnih oblog tipa F je potrebno debelino  $h_p$  ustrezno korigirati, kot je bilo to že omenjeno. Debelini zunanje plasti se prišteje še 80 % debeline notranje plasti [36].

### Dolžina penetracije pritrdil mavčnih plošč

Odpoved zaščitnega sloja je lahko tudi posledica odpovedi pritrdilnih sredstev. V ta namen so predpisane minimalne dolžine veznega sredstva v lesenem elementu. Minimalna dolžina  $l_a$  je dolžina v nezoglenelem delu prečnega prereza in mora biti vsaj 10 mm, zato je določena zahtevana dolžina veznega sredstva s spodnjo enačbo 4.26 [36].

$$l_{a,req} = h_p + d_{char,0} + l_a \quad (4.26)$$

kjer je:

$h_p$  – debelina obloge [mm]

$d_{char,0}$  – globina oglja v lesu [mm]

$l_a$  – minimalna globina penetracije veznega sredstva v nezogleneli les [mm]

#### 4.2.5 Določitev kriterija nosilnosti R za križno lepljene lesene elemente

Kadar določujemo nosilnost R lesenih konstrukcij izpostavljenih požaru, je potrebno upoštevati spremenjene karakteristike lesa na zoglenelem delu, saj te bistveno spremenijo nosilnost in togost samega lesa pod vplivom požara [36].

Dodatek B standarda EN 1995-1-2 [37] dovoljuje račun karakteristik prečnega prereza z uporabo naslednjih metod:

- Metoda efektivnega prečnega prerez

Za kontrolo v požarnem obtežnem stanju se določi rezidualni prečni prerez z upoštevanjem zoglenelega dela tako na robovih kot tudi povečanega oglenenja v vogalih. Upošteva se tudi segreti sloj, ki se pojavi za ogljem. Torej se rezidualnemu prečnemu prerezu prišteje sloj nične nosilnosti  $d_0$ .

- Metoda reduciranega prečnega prereza

Kot alternativo zgornji metodi lahko namesto računa globine in hitrosti oglenjenja določimo reducirane karakteristike materiala v odvisnosti od obtežbe in oblike prečnega prereza. V tem primeru se upošteva rezidualni prečni prerez.

Običajno se uporablja prva metoda reduciranega prečnega prereza [36].

### Metoda efektivnega prečnega prereza

Prečni prerez, ki je zmanjšan zaradi zoglenelega dela, se dodatno zmanjša še za slojem nične nosilnosti in togosti (Enačba 4.27). Efektivni prečni prerez se določi z debelino  $d_{ef}$ , za katero reduciramo osnovni prerez [36].

$$d_{ef} = d_{char,0} + k_0 d_0 \quad (4.27)$$

kjer je:

$d_{ef}$  – nominalna globina oglja [mm]

$d_{char,0}$  – projektna globina oglja v lesu za eno-dimenzionalno oglenenje ( $d_{char,0} = \beta_0 t$ ) [mm]

$\beta_0$  – projektna vrednost nominalnega več.-dimenzionalnega oglenjenja [mm/min]

$t$  – čas izpostavljenosti požaru [min]

$k_0$  – koeficient v odvisnosti od trajanja [/] (Enačba 4.28)

$$t < 20 \text{ min} \rightarrow k_0 = t/20$$

$$t \geq 20 \text{ min} \rightarrow k_0 = 1,0$$

(4.28)

$d_0$  – debelina sloja nične nosilnosti in togosti [mm] (Enačba 4.29)

$$d_0 = 7 \text{ mm } (x2)^x$$

(4.29)

<sup>x</sup> – EN 1995-1-2 narekuje uporabo vrednosti  $d_0 = 7$  mm, vendar eksperimenti dokazujejo, da vrednost ni dovolj velika. Glede na rezultate eksperimentov križno lepljenih lesenih elementov iz [36] se je izkazalo, da bi bilo smiselno uporabiti debelino 14 mm. Bili so izvedeni eksperimenti za določitev standardne požarne obremenitve. Eksperimenti so bili izvedeni s smrekovim lesom, vrednosti pa bi verjetno variirale glede na različne vrste lesa. Za efektivni prečni prerez oz. prerez, ki je EN 1995-1-2 predpostavlja, da ima enake lastnosti kot prerez pri sobni temperaturi.

Pri določanju hitrosti oglenjenja križno lepljenih plošč je potrebno upoštevati naslednje [36]:

- Za stene in stropne elemente se lahko uporabi eno-dimenzionalno oglenenje
- Za zunanje nosilne stene, ki predstavljajo podporo, je smiselno upoštevati nominalno povečano hitrost oglenjenja.

Pri določanju kriterija nosilnosti R v primeru požarne obtežbe je potrebno upoštevati naslednje [36]:

- Pri nosilnih elementih lahko pride do oglenjenja na obeh straneh, če ni vmes izvedena zaščita
- Pri oglenjenju samo z ene strani se lahko pojavijo dodatne spremenjene sile v elemente zaradi ekscentričnosti. To je predvsem pomembno pri tanjših elementih.
- Pri lamelah tanjših od 3 mm metoda rezidualnega prečnega prereza ni primerna

Vsi ostali izračuni za določitev nosilnosti se izvedejo enako kot pri sobni temperaturi. Natančneje računске postopke za račun požarne odpornosti križno lepljenih plošč prikažemo v poglavju 6.

#### 4.2.6 Določitev kriterijev celovitosti E in izolativnosti I

Določitev kriterijev celovitosti E in izolativnosti I je v praksi prav tako pomembna kot določitev kriterija nosilnosti R, vendar je cilj te magistrske naloge bolj usmerjen v določevanje kriterija nosilnost R, zato bo izpolnjevanje kriterijev E in I opisano zgolj na kratko.

V splošnem lahko postopek računa opišemo takole [36].

- Osnovni vhodni podatek o gibanju temperature nam predstavlja standardna požarna krivulja po EN 1995-1-2.
- Računski model je omejen na določevanje odpornosti do 60 min, čeprav določeni eksperimenti potrjujejo ustreznost tudi v primeru določevanja odpornosti do 90 min.
- Kriterij celovitosti E se smatra kot izpolnjen če je za isti čas izpolnjen kriterij izolativnosti I.
- Kriterij izolativnosti I je izpolnjen, če se temperatura na neizpostavljeni strani v povprečju ne dvigne za 140 °C ali se v določeni točki ne dvigne za več kot 180 °C.

#### 4.3 METODE ZA NAČRTOVANJE KRIŽNO LEPLJENEGA LESA PRI POŽARNI OBTEŽBI

Les je v osnovi gorljiv material, zato je potrebno biti pri načrtovanju tako nosilnih elementov iz masivnega lesa kot sestavljenih lesenih elementov pozoren na posebnosti. Pri povišani temperaturi se v lesu odvija poseben proces, imenovan piroliza. Piroliza je poenostavljeno povedano kemijska razgradnja organskih snovi pri določeni temperaturi, kar za les pomeni, da razpade na dva produkta: oglje in gorljive pline [43][44]. Prav oglenenje pri gorenju lesa pa pozitivno vpliva na požarno odpornost lesenega elementa, saj zoglenela plast predstavlja zaščito pred visokimi temperaturami za preostali intakten les. Globina oglenenja preden ta popolnoma razpade ni neomejena. Ocenjuje se, da je največja globina zoglenele plasti približno 25 mm, nato pa najbolj izpostavljen del že razpade in oglenenje napreduje v notranjost. Seveda je ta podatek zelo odvisen od vrste lesa, pri čemer sta pomembni predvsem gostota in vlažnost. Metode za dimenzioniranje križno lepljenega lesa, ki so na razpolago, izkoriščajo to predpostavko o konstantni hitrosti oglenjenja [32].

##### 4.3.1 Računski postopek skladno s EN 1995-1-2

Z zmanjšam lesenega prereza se posledično zmanjšata tudi togost in nosilnost še nezoglenega dela lesa. Standard EN 1995-1-2 sicer specifično ne obravnava načrtovanja križno lepljenega lesa, dovoljuje pa uporabo dveh metod za račun, ki sta bili opisani v poglavju 4.2 [32][37].

- Metoda z uporabo efektivnega prečnega prereza (Reduced Cross-Section Method)
- Napredna metoda po EN 1995-1-2-dodatek B (Reduced Properties Method)

Pri predpostavljenem oglenjenju v samo eni smeri standard EN 1991-1-2 [6] priporoča upoštevanje konstantne hitrosti oglenjenja, pri čemer je podana enačba za določitev projektne debeline zoglenega

sloja (Enačba 4.30). Zogleneli sloj je definiran kot razdalja med linijo vrhnje zoglenele plasti in linijo, kjer se pojavi piroliza, pri čemer se kot meja upošteva izoterma 300 °C [37].

$$d_{char,i} = \beta_i t \quad (4.30)$$

kjer je:

$t$  – čas izpostavljen požaru

$\beta_{i=0}$  – hitrost oglenenja pri standardnem požaru pri izpostavljenosti z ene strani

$\beta_{i=n}$  – hitrost oglenenja z upoštevanjem oglenenja z več strani, oglenenja vogalov in vpliva razpok

$d_{char,i=0}$  – debelina zoglenele plasti pri standardnem požaru pri izpostavljenosti z ene strani

$d_{char,i=n}$  – debelina zoglenele plasti pri večdimenzionalnem požaru z upoštevanjem oglenenja vogalov in razpok

Obe računski metodi temeljita na debelini oglenenja in zogleneli material upoštevata kot nenosilen. EN 1995-1-2 predlaga uporabo metode efektivnega prečnega prereza za načrtovanje križno lepljenega lesa. Metoda upošteva trdnost in togost zmanjšanega prečnega prereza z dodatnim zoglenelim slojem debeline  $d_0$ , ki ga imenuje sloj nične nosilnosti. Debelina  $d_0$  je dodana debelini zoglenelega sloja  $d_{char,n}$ , s čimer dobimo celoten odbitek zaradi oglenenja. Metoda rezidualnemu prečnemu prerezu odšteje debelino  $d_0$  in dobi efektivni prečni prerez. Obe poglavji sta opisani v poglavju 4.2.5.

Efektivno globino oglenjenja pa dobimo s spodnjo enačbo (Enačba 4.31).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \quad (4.31)$$

kjer je:

$d_0 = 7 \text{ mm}$

$$k_0 = \begin{cases} \frac{t}{20}; & t < 20 \text{ min} \\ t; & t \geq 20 \text{ min} \end{cases}$$

$t$  – čas izpostavljenosti požaru

$d_{ef}$  – efektivna globina oglenjenja

V nadaljevanju sta predstavljeni strnjena opisa postopkov po ameriškem standardu za lesene konstrukcije in švedska metoda.

#### 4.3.2 Računski postopek po ameriškem standardu za lesene konstrukcije (National Design Specification)

Ameriški standardi [47] za račun križno lepljenega lesa predpisujejo načrtovanje na podoben način kot to predpisuje standard EN 1995-1-2, to pomeni s pomočjo efektivne globine oglenjenja  $d_{ef}$ , pri čemer se enačba nekoliko spremeni [43].

$$d_{ef} = \frac{\beta_n t}{t^{0,187}} \quad (4.32)$$

kjer je:

$t$  – čas izpostavljenosti požaru [min],

$\beta_n$  – hitrost oglenenja [cm].

Tako kot EN 1995-1-2 [37] tudi ameriški standard predpisuje upoštevanje dodatnega sloja oglenenja, vendar ta ni fiksen, temveč variabilen in znaša 20 % dejansko zoglenelega dela. Pri EN 1991-1-2 se torej dejanski debelini zoglenelega sloja  $d_{char}$  prišteje debelina sloja nične nosilnosti, pri ameriškem pa se dejanska vrednost poveča na  $1,2 d_{ef}$  [43].

Prav tako je pri ameriških metodah upoštevana delaminacija križno lepljenega lesa, ko vezno sredstvo (lepilo) doseže temperaturo 300 °C. Ob doseženi omenjeni temperaturi se predpostavlja, da prvi sloj odpade in se oglenenje ponovno začne od začetka na drugem sloju. To dejstvo ni zajeto enako kot v evropskem standardu EN 1995-1-2 s spremembo upoštevanje hitrosti oglenenja. Ameriški standard podaja efektivno vrednost hitrosti oglenenja  $\beta_{eff}$ , ki je za 20% povečan količnik med nominalno hitrostjo  $\beta_n$  in časom  $t^{0,187}$ . Enačba je osnovana na podlagi eksperimentov in upošteva pospešeno oglenenje po odpovedi sloja z 20% povečavo vse dokler sloj oglenenja ne doseže vrednosti 12 mm, nato je vrednost hitrosti oglenenja zmanjšana nazaj na nominalno vrednost  $\beta_n$  [47].

#### 4.3.3 Švedska metoda – SP Technical Research Institute of Sweden

Ta metoda prav tako temelji na določevanju globine oglenenja in na podlagi le te določa požarno odpornost križno lepljenega lesa. Za razliko od prejšnjih dveh se v tej metodi pojavi nov faktor  $s_0$ , s katerim je določen tisti dodatni zogleneli sloj, ki je v EN 1995-1-2 podan kot  $d_0$ . Faktor  $s_0$  imenujemo kompenzacijski faktor, določen pa je na podlagi naslednjih faktorjev:

- število plasti v križno lepljenem elementu,
- debelina celotnega križno lepljenega elementa,
- smer napetosti v sloju, ki je izpostavljen požaru,
- gradienta penetrirane temperature.

Z upoštevanjem kompenzacijskega faktorja je podana enačba za račun efektivne globine oglenenja.

$$d_{ef} = d_{char,n/0} + k_0 s_0 \quad (4.33)$$

kjer je:

$d_{char,n/0}$  – projektna debelina oglenenja pri eno-dimenzionalnem oglenenju ali z vključenim vplivom oglenenja vogalov,

$k_0 = t/20$  – za nezaščitene elemente. Linearno narašča med 0 in 1,

$s_0$  – kompenzacijski sloj.

Odpadanje sloja švedska metoda upošteva enako kot metoda po EN 1995-1-2 ali metoda po ameriškem standardu za lesene konstrukcije. Torej do odpadanja sloja pride, ko lepilo doseže temperaturo 300 °C [43][37].



#### 4.4 TRENUTNO STANJE RAZISKAV POŽARNE ODPORNOSTI PLOŠČ IZ KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

Glede trenutnega stanja raziskav na tem področju osnovo predstavlja vir [32], ki je bil pripravljen za konferenco COST na KTH Royal Institute of Technology na Švedskem marca 2016. Dokument obravnava načrtovanje križno lepljenega lesa pri požarni obtežbi, v njem pa so zbrani tudi zadnji objavljeni rezultati raziskav po svetu.

##### 4.4.1 Oglenenje masivnega lesa

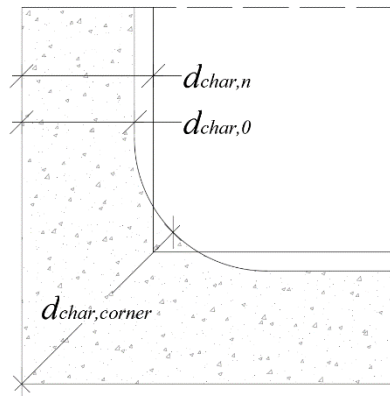
Osnovni faktor pri oglenjenju je hitrost oglenjenja  $\beta_0$ , ki je določena za enodimenzionalen pretok toplote pri standardnem požaru po krivulji v ISO834. Za omenjeni faktor standard EN 1995-1-2 navaja vrednosti v spodnji preglednici (Preglednica 6).

Preglednica 6: Osnovne hitrosti oglenjenja  $\beta_0$  po EN 1995-1-2 [7][37]

Table 6: Basic design charring rate  $\beta_0$  according to EN 1995-1-2 [7][37]

Material	$\beta_0$ [mm/min]
<b>Mehak les in bukev</b>	
Lepljen lameliran les, $\rho_k \leq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Masiven les, $\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
<b>Trdi les</b>	
Masiven in lepljen, $\rho_k = 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Masiven in lepljen, $\rho_k \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5
<b>LVL – lepljeni furnirji</b>	
$\rho_k \geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65
<b>Paneli</b>	
Leseni paneli	0,9
Vezane plošče	1,0
Drugi lepljeni elementi	0,9

Različni leseni elementi in njihova uporaba lahko pripeljeta do spremenjene hitrosti oglenjenja  $\beta_0$ . Za ta namen je bila raziskana modificirana hitrost oglenjenja, ki upošteva različne specifične primere uporabe in požarne obtežbe na lesenih elementih. Koeficienti  $\beta_n$  za opis večdimenzionalnega oglenjenja pa so zbrani v preglednici (Preglednica 7). Specifični primer se pojavi ob oglenjenju vogalov, kjer je globina v primeru požara iz več strani občutno večja kot na obeh robovih. V vogalih pride do zaokrožene linije oglenjenja tudi v primeru, ko je element pravokotnega prečnega prereza (Slika 18). Podobno  $\beta_0$  ne daje zadovoljivo natančne ocene v primeru, ko so stiki lesenih elementov zaščiteni s požarno izolacijo na njihovih širših stranicah. Zaradi enostavnejšega računa novih karakteristik prečnega prereza (površina, strižni prerez, vztrajnostni moment) se namesto hitrosti  $\beta_0$  uporablja hitrost  $\beta_n$ , v tej pa so zajete specifični lastnosti zaradi povečanega oglenjenja v vogalih in okoli stikov.



Slika 18: Debelina oglene plasti  $d_{char,0}$  za eno-dimenzijsko ogleenje in nominalna debelina oglene plasti  $d_{char,n}$   
 Figure 18: One-dimensional charring depth  $d_{char,0}$  and notional charring depth  $d_{char,n}$

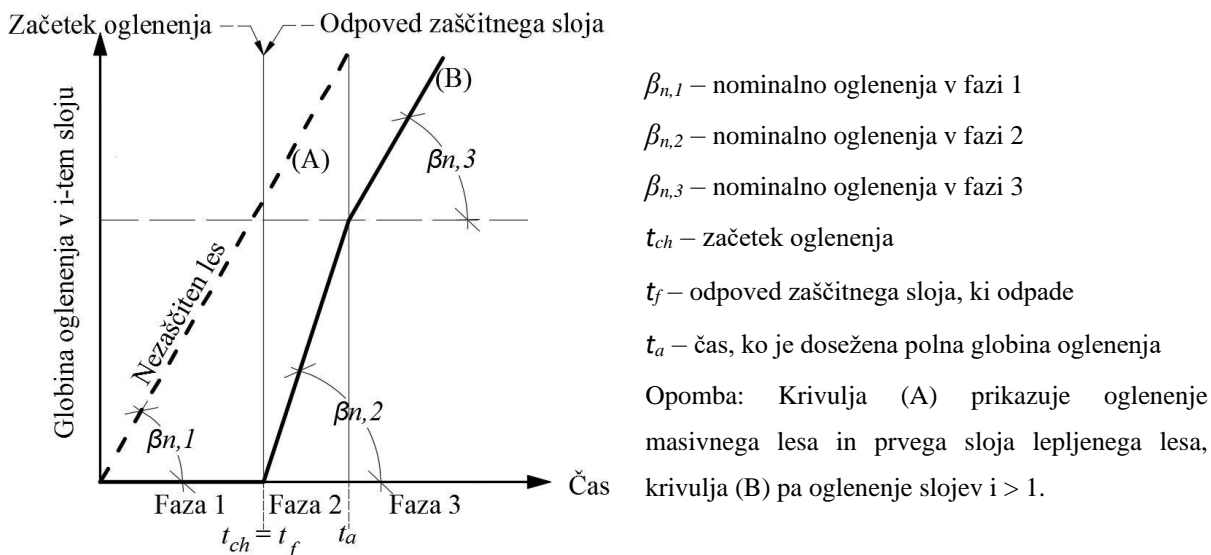
V enačbi (Enačba 4.34) je prikazan primer novejšega pristopa k določevanju hitrosti ogleenja  $\beta_n$  [32]. Ta je izražena v odvisnosti od osnovne hitrosti  $\beta_0$ . Prednost takšnega pristopa je v tem, da je račun hitrosti ogleenja na ta način izredno prilagodljiv za različne primere uporabe in je na ta način lahko apliciran na poljuben primer. Nov pristop k določevanju hitrosti ogleenja  $\beta_n$  še ni dokončen. Vsebuje namreč veliko faktorjev  $k_i$ , ki pa še niso popolni in potrebne so dodatne raziskave. Ideja je, da bi se s takšno poenostavitvijo vse primere v prihodnosti računalo izključno s pomočjo  $\beta_n$ .

$$\beta_n = k_s k_{pr} k_n k_g k_{cr} k_j k_{co} \beta_0 \quad (4.34)$$

Preglednica 7: Koeficient  $k_i$  za določitev ocenjene hitrosti ogleenja  $\beta_n$  [32]  
 Table 7: Coefficients  $k_i$  to determine the notional charring rate  $\beta_n$  [32]

Koeficient	Opis	Razlaga	Vir
$k_s$	Koeficient prereza	Koeficient upošteva širino prečnega prereza lesenega elementa. Do izraza pride predvsem pri ozkih straneh, medtem ko se na širokih straneh vpliv lahko zanemari ( $k_s = 1,0$ ). $k_s = \begin{cases} 1,2 & ; 40 \text{ mm} \leq b \leq 60 \text{ mm} \\ 1,3 - 0,00167 b & ; 60 \text{ mm} \leq b \leq 180 \text{ mm} \\ 1,0 & ; b \geq 180 \text{ mm} \end{cases}$ $b =$ širina ožje stranice prečnega prereza v mm	[48]
$k_{pr}$	Varnostni koeficient	Varnostni koeficient se navezuje na zaščito lesenih površin, pri čemer se v različnih fazah izpostavljenosti požaru lahko pojavijo drugačne hitrosti ogleenja.	[48]
$k_n$	Zaokroževanje vogalov	Zaradi večje globine ogleenja v vogalih, razpokah, prekinitvah in špranjah, je potrebno uporabiti oceno hitrosti ogleenja $\beta_n$ . V oceni hitrosti so namreč upoštewane specifične lastnosti, s katerimi lahko zajamemo nepravilno obliko ogleenja. Na ta način vpliv specifičnih oblik ogleenja upoštevamo v ocenjeni hitrosti, računamo pa kot da bi imeli pravokotno obliko ali obliko, sestavljeno iz več pravokotnikov.	[49][50]
$k_g$	Prekinitve med ploščami		[51]
$k_{cr}$	Razpoke in špranje v oglju		[51]
$k_j$	Koeficient stika	Koeficient zajema vpliv stika v panelih, kjer nenosilni leseni elementi, konstrukcijski elementi ali paneli ne vplivajo na zaščito slojev panela. Pri kontroli mejnih stanj se običajno upošteva vrednost $k_j = 1,0$ .	[52]
$k_{co}$	Koeficient povezovanja	Koeficient zajema povečano ogleenje zaradi uporabe pritrdilnega materiala iz jekla, kar povzroči povečanje temperature v jedru prečnega prereza, zaradi hitrega prevajanja toplote po teh elementih.	[53]

Zaradi razmeroma novega pristopa, ki je še vedno v postopku razvoja, priporočene vrednosti še niso določene. Za zaščitene lesene površine se priporoča upoštevanje spremenjenih hitrosti oglenjenja v posameznih fazah požara. Na spodnjem grafikonu (Slika 19) je prikazan poenostavljen model po EN 1995-1-2. Ta prikazuje primer, ko se začetek oglenjenja pojavi pri času  $t_{ch}$ , istočasno pa se pri pojavi odstop zaščitnega sloja pri času  $t_f$ , ki je enak času začetka oglenjenja  $t_{ch}$ .



Slika 19: Prikaz oglenjenja produktov iz križno lepljenega lesa z nezaščiteno (A) in zaščiteno (B) površino skladno z EN 1995-1-2 [37]

Figure 19: General description of charring for CLT products with initially unprotected surfaces (A) and initially protected surfaces (B) according to EN 1995-1-2 [37]

V drugi fazi je jasno razvidna povečana hitrost oglenjenja po odpovedi zaščitnega sloja. EN 1995-1-2 predvideva, da se hitrost oglenjenja ob takšnem pojavu podvoji glede na hitrost v primeru že začetno nezaščitenega elementa. Razlogov za povišano hitrost je več. Eden se skriva v tem, da se temperatura pod zaščitnim slojem kljub zaščiti lesene površine viša. Ob odpovedi zaščitnega sloja in direktne aplikacije požarne obtežbe na les pa je ta torej že bližje 300 °C. Prav tako je požar ob odpovedi zaščite precej močnejši od tistega, ki se pojavi na začetku, torej v trenutku dobimo precej višjo požarno obremenitev oziroma večji temperaturni gradient. Predvideva se, da zoglenela plast vseeno deloma deluje kot zaščitna plast, njena debelina pa se povečuje kot že omenjeno do debeline 25 mm. V tem trenutku se hitrost oglenjenja zmanjša nazaj na začetno vrednost oglenjenja, ki nastopi pri začetku požara oziroma pri oglenjenju v prvem sloju. Poenostavljen model se lahko uporablja pri zaščitah, ki so v glavnem narejene iz lesa, lesenih panelih ter široko uporabljenih mavčnih ploščah.

#### 4.4.2 Oglenenje križno lepljenega lesa

Oglenenje križno lepljenega lesa se nekoliko razlikuje od oglenjenja masivnega lesa, saj je lepljen les sestavljen iz več slojev, ki so med seboj zlepljeni, do razlike pa pride tudi zaradi stika lamel v posameznem sloju, ki lahko povzročijo lokalno povečanje oglenjenja.

V zadnjih letih je bilo narejenih ogromno eksperimentov na temo požarne odpornosti križno lepljenih elementov. Pomembnejši so zbrani v preglednici spodaj (Preglednica 8). Ti eksperimenti so bili narejeni za raziskovanje vpliva debeline sloja, števila slojev, tip lepila, način strjevanja in načina podpiranja na požarno odpornost. Testiralo se je tako zaščitene kot nezaščitene križno lepljene elemente, kot rezultat pa lahko navedemo sledeče ugotovitve:

- pri računu rezidualnega prečnega prereza bi bilo potrebno upoštevati horizontalno oziroma vertikalno orientacijo križno lepljenega panela, in sicer:
  - o kadar dotični toplotno obremenjeni sloj križno lepljenega elementa ne odpade, le ta učinkovito ščiti preostali del elementa pred požarno obremenitvijo. Kdaj posamezni sloj odpove, je odvisno od sprijemnosti, ki je obravnavana v standardu EN 13381-7 [54]. V takem primeru dobimo obnašanje križno lepljenega elementa, ki je zelo podobno obnašanju masivnega lesa,
  - o v primeru lokalnega odpadanja lamel, ki je ponovno pogojeno s porušitvijo sprijemnosti med sloji, izgubimo efekt ščitenja z zoglenelim slojem. Pojavi se hitrejše napredovanje oglenenja na naslednjem sloju zaradi povečane temperature. Fenomen je podoben kot pri odpovedi zaščitnega sloja, kjer v trenutku dobimo polno požarno obremenitev na sloj pod zaščitno plastjo.
- Za stenaste elemente je fenomen luščenja slojev manj izpostavljen v izvedenih eksperimentih. Vsekakor je potrebno vse nosilne in nezaščitene elemente izvesti iz vsaj petslojnih križno lepljenih elementov, da se s tem zagotovi zadostna robustnost. Prav tako se zahteva minimalna debelina sloja 3 mm v smeri prenosa obtežbe, da nosilnost takega elementa ne obravnavamo kot nično [55]. Za požarno odpornost se v splošnem priporoča debelejši zunanji izpostavljeni sloj, saj se s tem zagotovi poznejše lokalno luščenje lamel. Ocenjuje se, da se ob uporabi debelejših zunanje plasti luščenje pojavi po 45 – 60 minutah izpostavljenosti standardnem požaru.

Preglednica 8: Pregled dokumentiranih požarnih testov izvedenih na križno lepljenem lesu

Table 8: Overview documented fire tests on CLT elements

Vir	Avtor	Leto	Število testov	Raziskani parametri
[56]	Frangi, Fontana, Knobloch, Bochiocchio	2008	10	Debelina sloja, število slojev, stenski elementi in plošče
[57]	Frangi, Fontana, Hugl, Jöbstl	2009	11	Debelina sloja, število slojev, lepilo
[58]	Teibinger, Matzinger	2010	12	Debelina sloja, število slojev, lepilo, stenski elementi in plošče z in brez zaščite, zaščita
[59]	Wilinder	2010	27	Debelina sloja, lepilo, z in brez zaščite
[60]	Craft, Desjardins, Mehaffey	2011	6	Lepilo, z in brez zaščite, zaščita
[61]	Friquin, Grimsbu, Hovde	2011	6	Debelina sloja, število slojev, požarna krivulja
[62]	Gustafsson	2011	2	Zaščita
[63]	Osborne, Dagenais, Bénichou	2012	8	Debelina sloja, število slojev, stenski elementi in plošče, z in brez zaščite, zaščita
[64]	Menis	2012	7	Z in brez zaščite
[65]	Aguanno	2013	8	Število slojev, z in brez zaščite, zaščita
[55],[66]	Schmid, Menis, Fragiacommo, Bostroöm, Just, Gustafsson, Bochiocchio	2013	16	Debelina sloja, število slojev, z in brez zaščite, zaščita
[67]	Klippel, Leyder, Frangi, Fontana, Lam, Ceccotti	2014	10	Debelina sloja, število slojev, načini podiranja

Povečano oglenenje zaradi slojnate strukture križno lepljenega lesa se lahko upošteva s primerno večjo hitrostjo oglenenja  $\beta_n$ , namesto osnovne hitrosti  $\beta_0$  za enodimenzionalen primer. Slednjega bi lahko namreč uporabili na primeru plošče, kjer je plamen samo na spodnji strani. Pri nosilcu pa se plamen širi tudi na obe strani nosilca in zato posledično dobimo drugačen vpliv požara.. Priročnik za načrtovanje požarne varnosti v lesenih stavbah [69] definira faktor  $k_n$  kot razmerje med enodimenzionalnim oglenenjem in upoštevano hitrostjo  $\beta_0$  ter nominalno hitrostjo oglenenja  $\beta_n$ . V primeru, ko so lamele v posameznem sloju med seboj prav tako povezane ali pa je razmak med njimi manjši od 2 mm, se lahko upošteva osnovno hitrost oglenenja  $\beta_0$ . S tem se upošteva koeficient  $k_g = 1,0$ . V primeru razmaka med lamelami, ki se giblje med 2 mm in 6 mm, se prav tako lahko upošteva osnovno hitrost oglenenja  $\beta_0$ , vendar je to potrebno korigirati s faktorjem  $k_g = 1,2$ . Na ta način v resnici dobimo nominalno hitrost oglenenja  $\beta_n$ . V primeru razmika lamel nad 6 mm pa je potrebno upoštevati požar iz treh strani, torej dvodimenzionalno oglenenje. Kljub temu je potrebno omeniti, da naj bi bili nosilni elementi izvedeni na način brez špranj med lamelami in se tako lahko upošteva faktor  $k_g = 1,0$ .

Priročnik za načrtovanje požarne varnosti v stavbah [69] bi v prihodnosti moral nadgraditi metodo za račun nominalne hitrosti oglenenja  $\beta_n$ , kot je to prikazano v enačbi 4.34 [69]. Preglednica 12 prikazuje povzetek priporočenih hitrosti oglenenja za različne najpogostejše načine uporabe križno lepljenega lesa, ki bi jih priročnik moral upoštevati. Vsekakor pa mora ocena nominalne hitrosti oglenenja  $\beta_n$  upoštevati tudi sledeča faktorja:

- $k_{pr}$  – varnostni koeficient,

- $k_g$  – koeficient, ki upošteva razmike med sloji,
- za ostale koeficiente  $k_i$  (Preglednica 7) se upošteva vrednost 1,0.

Potrebno se je zavedati, da je vrednost nominalne hitrosti oglčenja lahko določena za vsak sloj posebej kot  $\beta_{n,i}$ .

Preglednica 9 prikazuje, kako k računu rezidualnega prečnega prereza pristopati na dva različna načina, kadar se upošteva luščenje posameznih slojev. Vrednosti so podane na podlagi analiz na nezaščitenih elementih iz križno lepljenega lesa. To sta metodi:

1. model dvojnega oglčenja in
2. poenostavljen model s srednjo vrednostjo nominalne hitrosti oglčenja  $\beta_{n,mean}$ , ki je primeren za elemente izpostavljene požarni obtežbi do 90 minut.

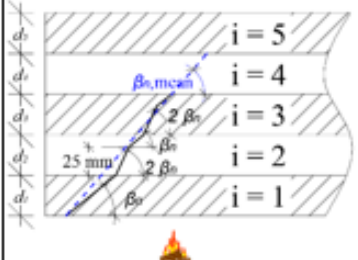
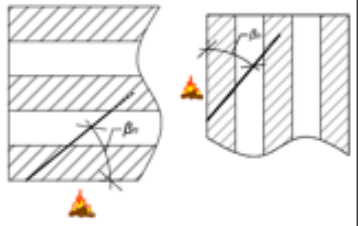
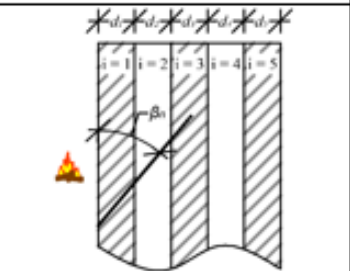
Za račun požarne odpornosti do 90 minut se je izkazalo, da je primerno upoštevati srednjo vrednost nominalne hitrosti oglčenja  $\beta_{n,mean}$  kot  $\beta_{n,mean} = 1,1$  mm/min, pri čemer je pogoj, da so uporabljeni lepljeni paneli brez vmesnih špranj med lamelami. S tem se zajame tudi vpliv luščenja slojev in dvojne hitrosti oglčenja v slojih  $i \geq 2$ . Vrednost je še vedno konservativna v primeru uporabe poenostavljenega modela. Za primerjavo pa lahko omenimo predpisano vrednost v standardu prDIN 20000-8 [68], kjer ta vrednost znaša  $\beta_{n,mean} = 0,8$  mm/min.

Luščenje posameznih slojev in delaminacija je poleg števila slojev in debeline posameznih slojev v veliki meri odvisna od vrste uporabljenega lepila. Pri tem velja omeniti, da za standardne požare s trajanjem do 30 minut luščenje slojev in delaminacija nima bistvenega vpliva, pod pogojem da je debelina prvega izpostavljenega sloja najmanj 25 mm. Razlog se skriva v tem, da v tako kratkem požaru običajno globina oglčenja ne bo presegla 25 mm in to ne bo napredovalo v naslednji sloj. Medtem ko se pri požarih s trajanjem 60 minut ali več pojavi očitna razlika rezidualnega prečnega prereza. Poleg tega velja, da požarna odpornost križno lepljenega lesa in njegova hitrost oglčenja nista v linearni zvezi, saj se pri računu nosilnosti križno lepljenega lesa nosilnost prečnih slojev praktično zanemari. Poleg tega je upogibna odpornost odvisna od odpornostnega momenta, ki pa je z višino povezan kvadratno. Najbolj obremenjeni sloj se pri aplikaciji plošč namesti na način, da so vlakna usmerjena v smeri prenosa obremenitev. Ker prvi sloj in vse nadaljnje lihe sloje orientiramo v smeri prenosa obtežbe, so zato vmesni sodi sloji z vlakni orientirani v pravokotni smeri glede na raznos. Tem slojem lahko zato pripišemo zanemarljivo togost in nosilnost.

Opažanja iz prakse kažejo sama oblika križno lepljenega elementa nima bistvenega vpliva na odpadanje zoglenega sloja pri običajnih požarnih obtežbah [67]. To pomeni, da posledično požarno projektiranje nebi smelo narekovati dimenzije/velikosti križno lepljenih plošč. V primeru uporabe križno lepljenega lesa za izdelavo pretežno enodimenzionalnih elementov, kot so to linijski nosilci, bi pričakovali drugačne rezultate. Iz enakega razloga lahko sklepamo, da se tudi slojnata struktura razen lepila naj ne

bi spreminjala bistveno. Debelina slojev in število slojev bo še vedno pogojeno s projektiranjem na obtežbe pri sobni temperaturi, vibracije, upogibe in ostalo.

Preglednica 9: Hitrosti oglečenja za različne primere uporabe nezaščitenega križno lepljenega lesa [32]  
 Table 9: Charring rates for different CLT applications (without any fire protection) [32]

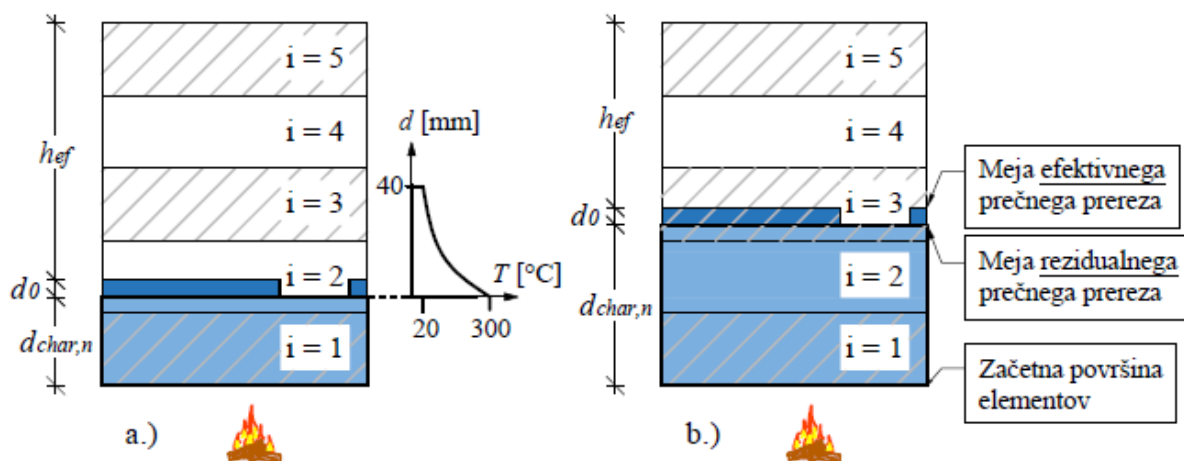
PLOŠČE		STENE		
<b>Očitno odpadanje slojev</b>  <b>Začetno nezaščiten element</b> Faza oglečenja 1 Faza oglečenja 2 Faza oglečenja 3		 <b>Manj očitno odpadanje slojev</b>  Uravnoveženi element		
<b><math>k_g = 1,0</math> – ni prekinitev</b>				
$\beta_{n,1} = 0,65 \text{ mm/min}$		$\beta_{n,1} = 0,65 \text{ mm/min}$		
$\beta_{n,2} = 1,30 \text{ mm/min}$		$\beta_{n,1} = 0,8 \text{ mm/min}$		
$k_{gr} = 2,0$				
$\beta_{n,3} = 0,65 \text{ mm/min}$				
$\beta_{n,mean} = 1,1 \text{ mm/min}$ ( $R \leq 90 \text{ min}$ )				
<b><math>k_g = 1,2</math> – prekinitve izključno v prečnih slojih (2 mm &lt; odprtina &lt; 6 mm)</b>				
I = C	$\beta_{n,1} = 0,65 \text{ mm/min}$	$k_{gr} = 1,0$ $k_g = 1,0$	$\beta_{n,1} = 0,65 \text{ mm/min}$	$\beta_{n,1} = 0,8 \text{ mm/min}$
	$\beta_{n,2} = 1,6 \text{ mm/min}$	$k_{gr} = 2,0$ $k_g = 1,2$	$\beta_{n,1} = 0,8 \text{ mm/min}$	$\beta_{n,1} = 0,95 \text{ mm/min}$
I = C	$\beta_{n,3} = 0,8 \text{ mm/min}$			$k_{gr} = 1,2$ $k_g = 1,2$
	$\beta_{n,2} = 1,3 \text{ mm/min}$	$k_{gr} = 2,0$ $k_g = 1,0$	$\beta_{n,1} = 0,65 \text{ mm/min}$	$\beta_{n,1} = 0,8 \text{ mm/min}$
I = C	$\beta_{n,3} = 0,65 \text{ mm/min}$	$k_{gr} = 1,0$ $k_g = 1,0$		$k_{gr} = 1,2$ $k_g = 1,0$
$\beta_{n,mean} = 1,2 \text{ mm/min}$ ( $R \leq 90 \text{ min}$ )				



#### 4.4.3 Raziskave na področju evropskih metod za načrtovanje križno lepljenega lesa podvrženega standardni požarni obtežbi

Zadnja verzija standarda EN 1995-1-2 ne podaja specifičnih informacij in postopkov za načrtovanje križno lepljenega lesa pri požarni obtežbi. Vseeno pa imamo dandanes za analizo lesenih križno lepljenih elementov skladno s standardom EN 1995-1-2 na voljo dve metodi, kot je bilo to omenjeno v poglavju 4.3.1 [37].

Metoda efektivnega prečnega prereza je v skladu s standardom lahko uporabljena tudi za načrtovanje križno lepljenega lesa, čeprav ta ni posebej predpisana. Kot smo že omenili je efektivni prečni prerez manjši od rezidualnega za debelino nenosilnega sloja  $d_0$  (Slika 20). Standard EN 1995-1-2 podaja vrednost  $d_0$  kot konstantno in sicer  $d_0 = 7$  mm, neodvisno od trajanja požara. Rezultati raziskav objavljeni v virih [45][46] kažejo na to, da se lahko z uporabo konstantne vrednosti  $d_0$  premaknemo na nekonzervativno stran pri načrtovanju križno lepljenega lesa. Hkrati pa uporaba konstantne vrednosti parametra  $d_0$  vsekakor ni primerna za uporabo neodvisno od vrste lesenega elementa (križno lepljen les, masiven les, lameliran lepljen les,...) in nivoja obremenitve.



Slika 20: Definicija rezidualnega in efektivnega prečnega prereza: a.) sloj  $d_0$  je v prečnem sloju, torej nenosilnem sloju prečnega prereza, b.) sloj  $d_0$  je v nosilnem sloju.

Figure 20: Definition of residual cross-section and effective cross-section: a.)  $d_0$  layer is in cross-layer and thus no load-bearing layer, b.)  $d_0$  is in load-bearing layer.

Obnašanje križno lepljenega lesa pod vplivom požarne obtežbe je precej zapleteno zaradi ortotropije lesa, zaradi česa so sloji v longitudinalni in prečni smeri različno nosilni. Mehanske lastnosti so odvisne od smeri vlaken glede na smer delovanja obtežbe. Pri upogibu okoli ene smeri se lahko obtežba, ki jo prevzamejo sloji s pravokotno usmerjenimi vlakni glede na smer razporeditve obtežbe, zanemari [70]. Različne lastnosti slojev imajo vpliv na določitev debeline sloja nične nosilnosti  $d_0$ . Slika 20 prikazuje dva skrajna primera, ki ju lahko definiramo:

- a. meja rezidualnega prečnega prereza leži v prečnem sloju in je s tem sloj nične nosilnosti  $d_0$  v celoti del nenosilnega prečnega sloja in
- b. meja rezidualnega prečnega prereza leži v longitudinalnem sloju in je s tem sloj nične nosilnosti  $d_0$  v celoti del nosilnega sloja.

V primeru a.) sloj nične nosilnosti  $d_0$  slabi le del prečnega prereza, ki bistveno ne prispeva k upogibni nosilnosti elementa. Kljub temu pa toplotna obremenitev vpliva že tudi na naslednji longitudinalni sloj, ki pa aktivno sodeluje pri prevzemu upogibne obtežbe, kot je to prikazano na grafikonu na sliki 20 a.). V takem primeru se pokaže neustreznost uporabe sloja nične nosilnosti  $d_0$  kot del metode z učinkovitim prečnim prerezom, katere postopek reducira togost in nosilnost prečnega prereza zaradi toplotne obremenitve. Po drugi strani pa je uporaba sloja nične nosilnosti  $d_0$  povsem primerna v primeru b.), kjer z njim reduciramo longitudinalni sloj in s tem sloj, ki aktivno sodeluje pri prevzemu upogibne obtežbe. V resnici se dejansko pojavi tudi primer med a.) in b.), vendar standard EN 1995-1-2 ne obravnava nobenega od treh omenjenih primerov, zato so potrebna nadaljnja navodila in raziskave za uporabo metode učinkovitega prečnega prereza.

Vredno omembe je dejstvo, da je globina prečnega prereza, ki je podvržena dodatni toplotni obremenitvi ( $20\text{ °C} < T < 300\text{ °C}$ ), precej globlja kot to predvideva standard z uporabo  $d_0 = 7\text{ mm}$ . Globina toplotnega vpliva se lahko upošteva kot konstantna šele po približno 20 minutni izpostavljenosti standardni požarni obtežbi, pri čemer se ustvari debelina zogljenega sloja med 35 in 40 mm za začetno nezaščitene elemente (Slika 20).

Priročnik za načrtovanje požarne varnosti v lesenih stavbah [69] definira poseben kompenzacijski faktor  $s_0$ , ki si ga lahko razlagamo kot ekvivalent globini  $d_0$  po EN 1991-1-2 [6]. Ta kompenzacijski faktor vključuje redukcijo togosti in nosilnosti materiala pod toplotno obremenitvijo za zogljenim slojem. Priročnik navaja vrednosti faktorja za tri-, pet- ter sedemslojne križno lepljene plošče in stene, ki so izpostavljene požarni obtežbi do največ 120 minut. Podane so vrednosti tako za zaščitene kot tudi za nezaščitene elemente in upošteva se požarna obremenitev bodisi na natezni bodisi na tlačni strani. Vrednosti za  $s_0$  so podane kot konstante ali v odvisnosti od debeline križno lepljenega elementa. Nanašajo se na rezultate eksperimentov [45].

Evropski standard za proizvode iz križno lepljenega lesa EN 16351 predpisuje zahtevane karakteristike, ki jih morajo izpolnjevati proizvodi. Ta vsebuje odpornost proizvodov na požarno obtežbo in reakcije ter obnašanje teh elementov pod vplivom požarne obtežbe [71].

Zadnja izdaja standarda EN 16351:2015 vsebuje dve večji pomanjkljivosti v postopkih za načrtovanje pri požarni obtežbi [71]. Ta uporablja odziv posameznega sloja na požar glede na požarni razred skladno z evropsko klasifikacijo [72] po standardu EN 13501-2 za opis odziva celotnega križno lepljenega elementa, kar naj bi bilo v skladno s [32] neustrezno. Po definiciji se elemente po evropski klasifikaciji mora klasificirati glede na končni produkt, ne pa na njegove sestavne dele [72]. Klasifikacija elementov

brez dodatnih preiskav tako ni mogoča. Podobno kot je bilo to predpisano za lameliran lepljen les z namenom minimizacije stroškov eksperimentov, se mora tudi v primeru križno lepljenega lesa testirati celotne končne produkte in na podlagi teh rezultatov element klasificirati [32]. Druga pomanjkljivost, ki jo vsebuje standard, je v upoštevanju gostote. Gostota posamezne lamele ne sme biti uporabljena kot vhodni podatek za račun hitrosti oglenenja. Eksperimenti kažejo, da so odstopanja hitrosti oglenenja pri elementih, ki so bili za preizkus izpostavljeni standardnemu požarnemu testu in se je upoštevala skupna gostota celotnega elementa, približno enaka kot odstopanja z upoštevanjem posameznih gostot [32][52][73][74][75]. Rezultati kažejo, da bi se za evropski les morala uporabljati zgolj ena osnovna hitrost oglenenja. Standard EN 1995-1-2 pa ne navaja pravil za upoštevanje oglenenja odvisno od gostote lesa (Preglednica 6). Za proizvode iz mehkejšega lesa, katerih gostota ne presega  $\rho \leq 290 \text{ kg/m}^3$ , bi bilo bolj smotno uporabiti enodimenzionalno hitrost oglenenja  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$  [32].

#### 4.4.4 Modeliranje in simulacije križno lepljenega lesa pri požarni obtežbi

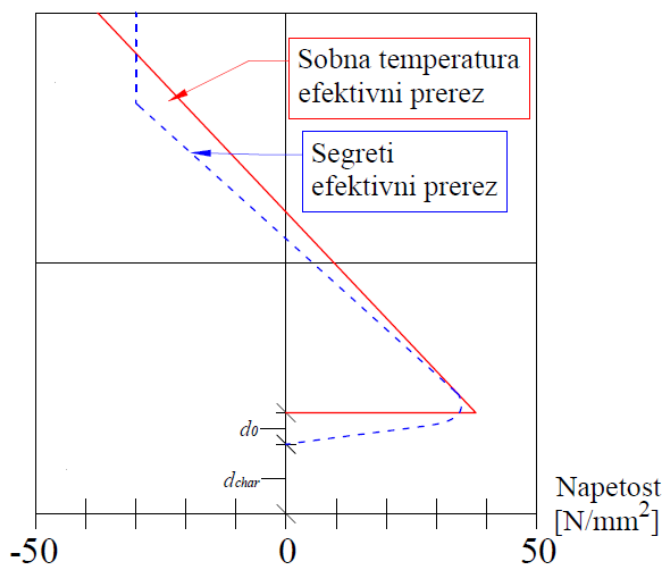
Požarni eksperimenti zahtevajo veliko časa in finančnih sredstev ter posebne požarne laboratorije za testiranje. Prav tako je le malo raziskav takšnih, ki upoštevajo kombinacijo obnašanja pri požaru in sobni temperaturi, ki je pomembna za primerjavo. Za kontrolo zanesljivosti postopka načrtovanja je potreben referenčen rezultat pri sobni temperaturi, saj nam le ta lahko da osnovne materialne karakteristike preizkušanca. Prav tako je za določevanje globine sloja nične nosilnosti  $d_0$  potrebna zadostna količina informacij o materialu pri sobni temperaturi. Pred kratkim je bil objavljen postopek za določevanje debeline sloja nične nosilnosti [76].

V zadnjem desetletju je zaznan opaznejši razvoj numeričnega modeliranja konstrukcijskih elementov. Rezultati so postali učinkovitejši in bolj natančni, predvsem pa poceni v primerjavi s cenami, ki jih je potrebno plačati za eksperimente in njihove rezultate. Ko je model usklajen z uporabo podatkov iz eksperimentov, se lahko numerične modele uporablja za nadaljnjo analizo in študijo požarnega obnašanja. Z modeli se lahko nato izdeluje različne parametrične študije, kjer primerjamo rezultate z uporabo različnih vhodnih podatkov (geometrija, materialne lastnosti, robni pogoji, ...).

Kljub vsemu pa je modeliranje lesenih elementov še vedno izredno zahtevno, saj je les kot material izredno kompleksen, s tem pa modeliranje njegovega obnašanja še toliko težje. Dodaten problem nastane pri uporabi komercialnih programov, ki takšnih analiz običajno ne omogočajo. Upoštevanje spreminjajoče se vlažnosti in gostote po prerezu pod vplivom požarne obtežbe je običajno nemogoče. Poleg tega uporaba primernih učinkovitih termičnih in mehanskih lastnosti omejuje uporabo različnih požarnih krivulj. Programska oprema bi namreč morala biti sposobna opisati nosilnost lesenega elementa z upoštevanjem specifik lesa pri požarni obtežbi, ki so:

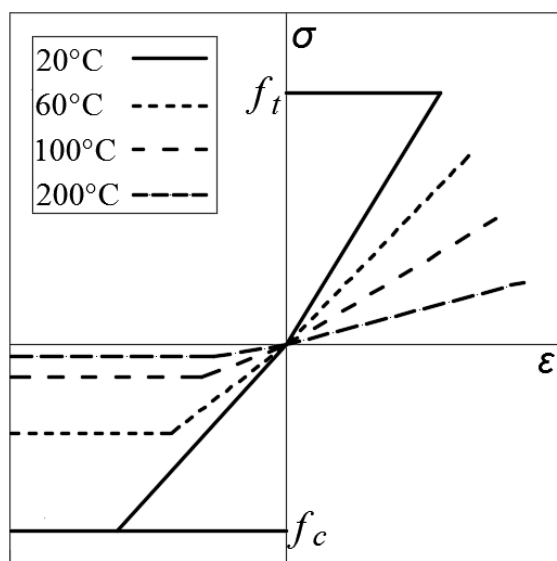
- pojav plastičnega območja v tlaku, medtem ko pojav tega v nategu ni možen,
- redukcija nosilnosti in togosti je različna v tlaku in nategu (Slika 21 in Slika 22),
- omejitev porušitve do določenega števila vlaken oziroma globine na natezni strani elementa.

Pri tem pa porušitev določenih vlaken nebi pomenila nenadno porušitev celotnega elementa.



Slika 21: Razporeditev napetosti po sredini prečnega prereza upogibno obremenjenega nosilca izpostavljenega požaru iz treh strani (modra črta) in linearen potek napetosti enako obremenjenega nosilca z upoštevanimi normalnimi materialnimi karakteristikami brez požarne obtežbe (rdeča črta) [32].

Figure 21: Stress distribution along the center line of a beam exposed to fire on three sides and subjected to bending (blue curve), and the corresponding linear stress distribution with normal material properties and the same bending resistance (red line) [32].



Slika 22: Odvisnost med napetostmi in deformacijami v odvisnosti od temperature vzporedno z vlakni. Upošteva se samo plastifikacija v tlaku [32].

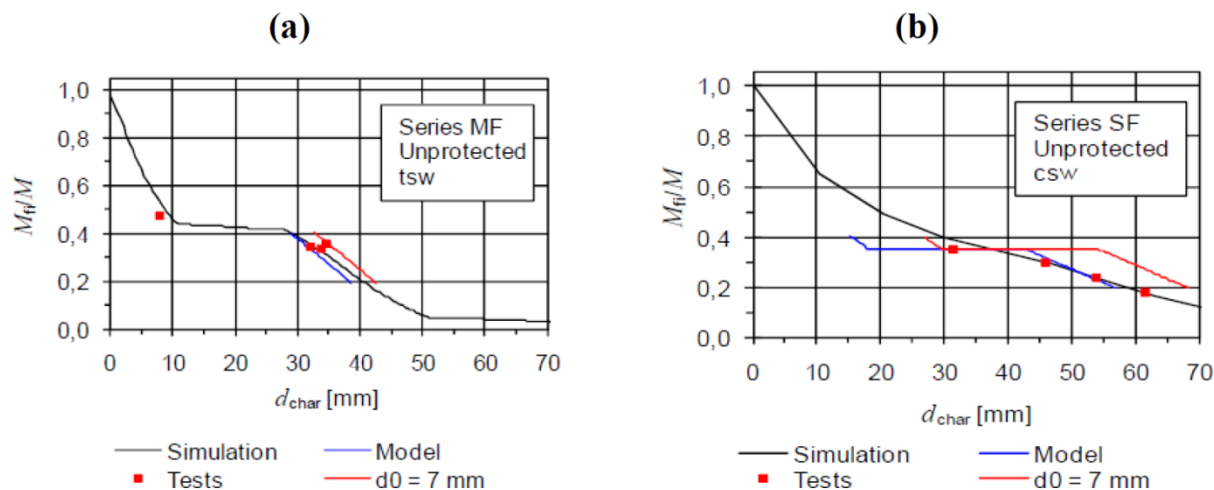
Figure 22: Temperature-dependent stress-strain relationship parallel to grain for wood at different temperatures with plasticity in compression only [32].

V raziskavah križno lepljenega lesa so bile upoštevane zgoraj omenjene mehanske lastnosti lesa [45], [46]. Pri tem so raziskovalci uporabljali program CSTFire, s katerim so želeli razviti enostaven model za uporabo splošne metode efektivnega prečnega prereza po EN 1995-1-2 ter specifično upoštevaje sloja nične nosilnost  $d_0$ .

Dodatne raziskave so bile izvedene na področju določevanja globine oglenenja in redukcije upogibne nosilnosti križno lepljenega lesa, kjer so bile skladno z dodatkom B EN 1995-1-2 upoštevane toplotne in termo-mehanske karakteristike lesa. Elementi so bili izpostavljeni standardnem požaru. Za testiranje so se uporabili čokati elementi, zato se strižnih porušitev niti ni modeliralo, saj se tudi niso pričakovale. Modelirale so se samo porušitve natezne lamele.

Rezultati simulacij izvedenih s programom CSTFire so bili primerjani z dejanskimi rezultati uporabljenih metod za načrtovanje lameliranega lepljenega lesa za primerjavo podanih v [45], [70]. Raziskave so pokazale, da je najpomembnejši del relativne odpornosti med 0,2 in 0,4, pri čemer je upoštevanje globine nenosilnega sloja  $d_0 = 7$  mm pripeljalo do rezultatov na nevarni strani.

Raziskave na križno lepljenih lesenih elementih v naravnem merilu so bile izvedene in opisane v viru [77]. Preizkušali so se tako sistemi z eno kot tudi z več prostostnimi stopnjami, pri čemer je bil glavni namen primerjave dejanskega obnašanja in obnašanja v modelu, skupno pa je bilo preizkušenih kar 27 modelov. Za primerjavo so se določeni rezultati pridobivali tudi iz preizkusov pri sobnih temperaturah, nato pa jih primerjali s tistimi pri požarni obtežbi. Prav to pa se je to izkazalo kot izredno pomembno za določevanje globine sloja nične nosilnosti  $d_0$ , čeprav se ta korak pogosto zanemari pri študijah požarne odpornosti. Rezultati kažejo, da kljub modelskem merilu konstrukcij, obnašanje le te lahko dobro opišemo z računalniškim modelom. Najboljše rezultate so dosegali zaščiteni elementi in elementi, ki so imeli požaru izpostavljeno stran tlačno obremenjeno (stene, kontinuirne plošče). Rezultati kažejo velik napredek v določevanju globine sloja nične nosilnosti  $d_0$ , ti pa so vidni na spodnji sliki (Slika 23). Postopki so opisani v virih [45] in [77], opis pa povzet po [32]. Izvedeni so bili požarni testi tudi na konstrukcijah v naravnem merilu (element obremenjen s konstantnim momentom dolžine 1000 mm), pri čemer se je obnašanje križno lepljenega lesa nato primerjalo z rezultati iz konstrukcij v pomanjšanem merilu (element obremenjen s konstantnim momentom dolžin 1800 mm) in modela. Izkazalo se je, da so rezultati iz konstrukcije v pomanjšanem merilu z zadostno natančnostjo opisali oziroma napovedali obnašanje konstrukcije v naravnem merilu [77].



Slika 23: Primerjava rezultatov preiskave s simulacijami in enostavnim modelom za projektiranje za (a) konstrukcije z več prostostnimi stopnjami, nezaščitene, požarno obremenjena natezna stran in (b) konstrukcije z eno prostostno stopnjo, nezaščitene, požarno obremenjena stran je v tlaku [32].

Figure 23: Comparison of test results with simulation and the easy-to-use design model for (a) series MF, unprotected, with the fire exposed side in tension (tsw) and (b) for series SF, unprotected with the fire exposed side in compression (csw) [32].

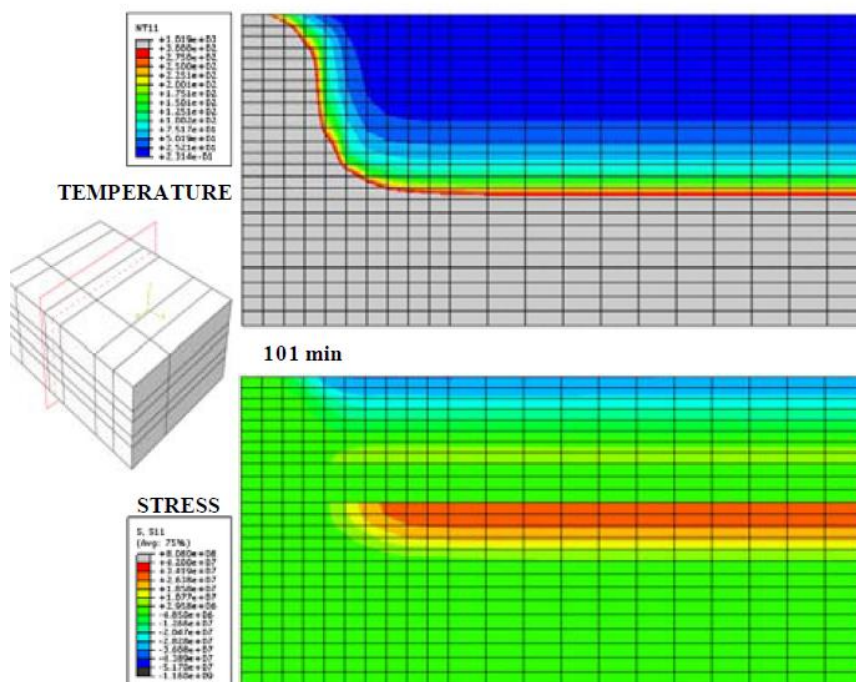
V omenjeni seriji preizkusov so bili testirani sledeči elementi [45]:

- križno lepljeni elementi debeline od 45 mm do 315 mm,
- debelina posameznega sloja od 15 mm do 45 mm,
- število slojev od 3 do 7,
- nezaščiteni in zaščiteni križno lepljeni elementi,
- požarna obremenitev na tlačeni in natezni strani,
- simetrične konstrukcije in elementi,
- izpostavljeni standardnemu požaru do 120 min,
- podpore plošč so bile upoštevane kot členkaste, saj tipičen priključek križno lepljene plošče ne omogoča prenosa upogibnih momentov.

Skladno z raziskavo znanstvene in strokovne literature s področja križno lepljenih lesenih plošč ugotovimo, da je bilo izvedenih dokaj veliko število raziskav na regularnih in neregularnih konstrukcijah, predvsem na petslojnih križno lepljenih elementih. Iz rezultatov je namreč razvidno, da je smiselno primerjati le rezultate pridobljene na elementih z enako debelino, ki sodeluje pri prevzemu obtežbe. Zaradi velikih odstopanj globine sloja nične nosilnosti  $d_0$  je praktično nemogoče zajeti vse obstoječe elemente iz križno lepljenega lesa ter njihove načine uporabe (plošče, stene, zaščitene in nezaščitene elemente, natezna in tlačna cona požarno obremenjena) v eni samo konstanti  $d_0$ . Posledica bi bila neekonomično projektiranje v večini primerov ali celo nevarno projektiranje v posameznih primerih. Odločili so se, da razvijejo enostavno funkcijo, s katero zajamejo vpliv različnih zgoraj naštetih primerov uporabe elementa in vpliv števila slojev. V vseh primerih je bila razvita linearna ali bilinearna funkcija, ki je prikazovala srednje vrednosti globine sloja nične nosilnosti. Glavna pridobitev

raziskave [77] je predstavitev novih vrednosti za parameter  $d_0$  za različne primere uporabe križno lepljenega lesa, izpostavljenega standardnemu 120 minutnemu požaru. Podobno bi bilo potrebno izvesti za 30, 60 in 90 minutni požar.

Podobne raziskave so bile izvedene tudi pod okriljem drugih avtorjev. Mnogo eksperimentalnih in numeričnih rezultatov raziskav o obnašanju križno lepljenega lesa je bilo objavljenih v [46],[78],[79]. Osem križno lepljenih panelov je bilo preverjenih na upogib pri sobni temperaturi, pri čemer so uporabili štiri točkovno podporo v vogalih. Dva elementa sta bili plošči, narejeni iz iste serije in testirani v naravnem merilu pri požarni obtežbi do porušitve. Ponovno je bila izvedena tako analiza pri sobni temperaturi kot pri požaru in na podlagi tega določena debelina sloja nične nosilnosti  $d_0$ . Vzporedno so bile izvedene simulacije s pomočjo metode končnih elementov v programu Abaqus, kjer se je modeliralo termo-mehanske lastnosti in obnašanje. Primerjava rezultatov upogiba, temperature po prečnem prerezu in končne požarne odpornosti je pokazala dobro ujemanje.



Slika 24: Potek temperature in napetosti znotraj nezaščitenega prečnega prereza 3D modela pri času porušitve (Fragiacomo, 2012, str. 6) [93]

Figure 24: Temperature and stress distribution within the unprotected cross-section of 3D model at failure time (Fragiacomo, 2012, p. 6) [93]

## 5 NUMERIČNO MODELIRANJE POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENEGA LESA

### 5.1 UVOD

Glede na objavljeno strokovno literaturo in rezultate raziskav lahko ugotovimo, da so rezultati modelov za preizkušanje požarne varnosti križno lepljenega lesa v naravnem merilu omejeno natančni [65][66][67][68][77]. Kljub temu pa dajejo zadovoljive rezultate glede napovedi obnašanja in so v pomoč inženirjem tako za projektiranje pri normalnih pogojih kot v primeru požara. Sedanji modeli in programska orodja omogočajo modeliranje kompleksne tako 2D kot tudi 3D primere. Materialni vhodni podatki so povzeti iz eksperimentov in zajemajo vpliv povišanih temperatur [65].

Z določitev požarne odpornosti in napoved obnašanja križno lepljenega lesa je bil razvit numerični program v programu Microsoft Visual Basic Express 2010 [65]. Model omogoča tudi upoštevanje mavčnih plošč kot protipožarne zaščite. Glavni namen računskega orodja je napovedati oziroma predvideti obnašanje elementa v pogojih požara in zajema določevanje temperaturnega profila, upogibne nosilnosti in togosti, globine oglečenja, hitrosti oglečenja in globine segretega področja tekom simulacije. Vhodni podatki, kot so: debelina sloja, število slojev, orientacija slojev, karakteristike lesa (in morebiti mavca) pri sobni temperaturi in podatki o obtežbi so določeni s strani uporabnika programa. Z večanjem temperature program prilagaja tudi karakteristike lesa, kot je to prikazano v nadaljevanju tega poglavja (glej poglavje 5.4).

Program je v prvi meri namenjen določanju standardne požarne odpornosti. Najbolj znane standardne požarne krivulje so ASTM E119, CAN/ULC-S101 in ISO834, ki se najpogosteje uporablja v Evropi in znana kot standardna požarna krivulja. Ta nam podaja gibanje temperature v odvisnosti od časa za pretežno celulozne materiale. Upoštevanje nestandardnih in naravnih požarov je raznoliko in precej bolj zapleteno, v program pa je potrebno podati razvoj temperature s časom.[65]. Ker so križno lepljene plošče običajno izpostavljene požaru le s spodnje strani se v programu upošteva le enodimenzionalno prevajanje toplote po trdni snovi (Enačba 5.1). Rezultat je razporeditev temperature po globini prereza v vsakem časovnem koraku. Pri enodimenzionalnih modelih se predpostavlja, da je prerez enak po celotnem obravnavanem odseku, torej dolžini in širini elementa. Toplotne in mehanske lastnosti lesa se nato izračunajo skladno z pripisano temperaturo v vsakem posameznem koraku.

### 5.2 ENAČBA TOPLOTNE PREVODNOSTI

Enačba prevajanja toplote v eni smeri: (Enačba 5.1).

$$-kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_x + \dot{q}_G A \Delta x = -kA \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} + \rho A c \Delta x \frac{\partial T(x + \frac{\Delta x}{2}, t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

kjer je:

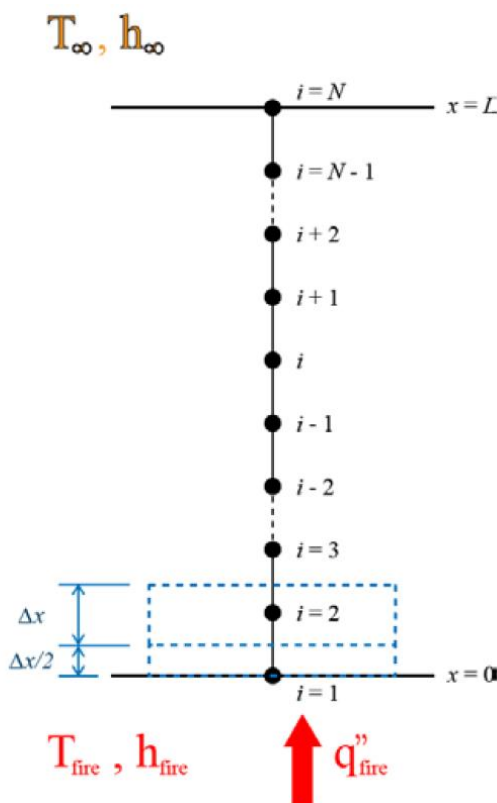
$k$  – toplotna prevodnost [ $W m^{-1} K^{-1}$ ],

$A$  – površina [ $m^2$ ],



$T$  – temperatura [K],  
 $x$  – oddaljenost točke od površine [m],  
 $\dot{q}_G$  - volumska hitrost generiranja toplote [ $W m^{-3}$ ],  
 $\rho$  – gostota nadzorovanega volumna [ $kg m^{-3}$ ],  
 $c$  – specifična toplotna kapaciteta [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ],  
 $t$  – čas [s].

Ta enačba se v primeru upoštevanja določenih predpostavk o obnašanju mavca, diskretizaciji in vpeljavi Fourierjevega števila lahko precej poenostavi. Podrobnosti omenjene izpeljave so dostopne v viru [65]. Program enačbo prevajanja toplote (Enačba 5.1) rešuje z metodo končnih diferenc, kot je to shematsko prikazano na spodnji sliki (Slika 25).



Slika 25: Diskretizacije križno lepljenega panela za numerično toplotno analizo (Aguanno, 2013, str. 120) [65]  
 Figure 25: Discretization of CLT panel for numerical thermal analysis (Aguanno, 2013, p. 120) [65]

Kot rezultat dobimo temperature v vseh točkah  $i$ , ki predstavljajo vozlišča mreže končnih diferenc, na katere razdelimo analizirani element ( $1 < i < N$ ). Za rešitev enačbe 5.1 moramo poznati tudi robne pogoje. Za zapis robnih pogojev pa potrebujemo temperature na spodnjem in zgornjem robu elementa. Toplota iz okolice (požara) pa se na telo prenese z konvekcijo in radiacijo.

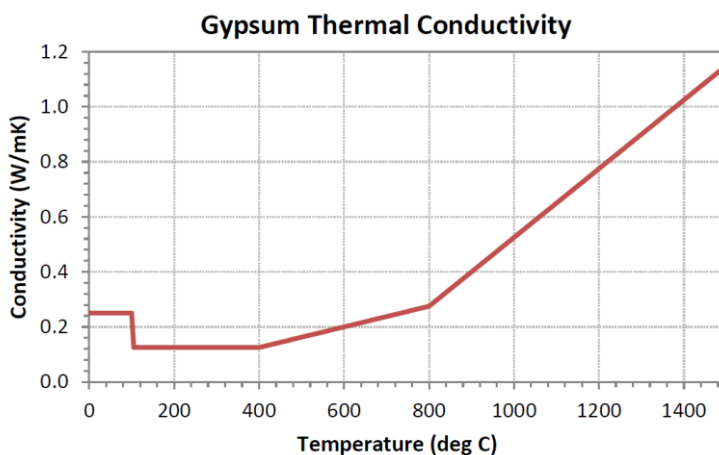
Poznati moramo tudi začetne pogoje pri času  $t = 0$  min, privzamemo da so temperature vseh točk v lesu in morebitni mavčni plošči enake sobni temperaturi, torej velja  $T_{i,0} = T_\infty$  za  $1 \leq i \leq N$ . Program za učinkovito rešitev uporablja prednosti trigonometrijskega matričnega algoritma [79]. Nove izračunane temperature v vsakem časovnem koraku se uporabijo kot vhodni podatek za izračun v naslednjem

koraku. S tem se nato določijo spremenjene toplotne in mehanske karakteristike lesa in mavca v odvisnosti od temperature.

### 5.3 MAVČNE PLOŠČE KOT ZAŠČITNA PLAST

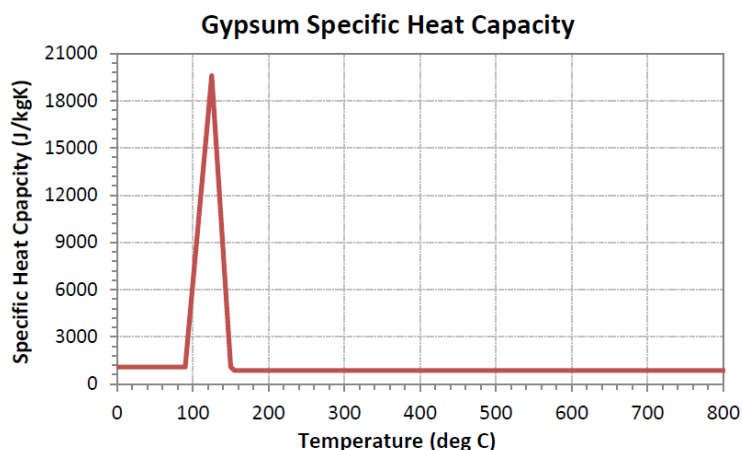
Eden najpomembnejših detajlov pri modeliranju mavčne plasti, ki štiti les pred požarno obremenitvijo, je sposobnost pravilnega upoštevanja časa, do katerega je mavčna plošča še vedno na lesenem elementu in opravlja svojo funkcijo. To je pogojeno z dvema dejavnikoma: natančnim poznavanjem toplotnih lastnosti materiala v odvisnosti od temperature in dobro definiranim kriterijem odpovedi mavčne zaščite, ki običajno praktično pomeni, da plošča odstopi in odpade. Mavčne plošče se v modelu ne upoštevajo kot nosilni deli elementov [65].

Objavljeni strokovni znanstveni članki navajajo enačbe za določevanje toplotnih karakteristik mavčnih plošč (gostota, prevodnost, specifična toplotna kapaciteta) v odvisnosti od temperature [80][81][82][83][84]. Spodnji grafikon (Grafikon 5) prikazuje odvisnost toplotne prevodnosti od temperature mavčne plošče, naslednji grafikon (Grafikon 6) prikazuje odvisnost specifične toplotne kapacitete od temperature in tretji grafikon (Grafikon 7) prikazuje odvisnost gostote mavčne plošče od temperature.

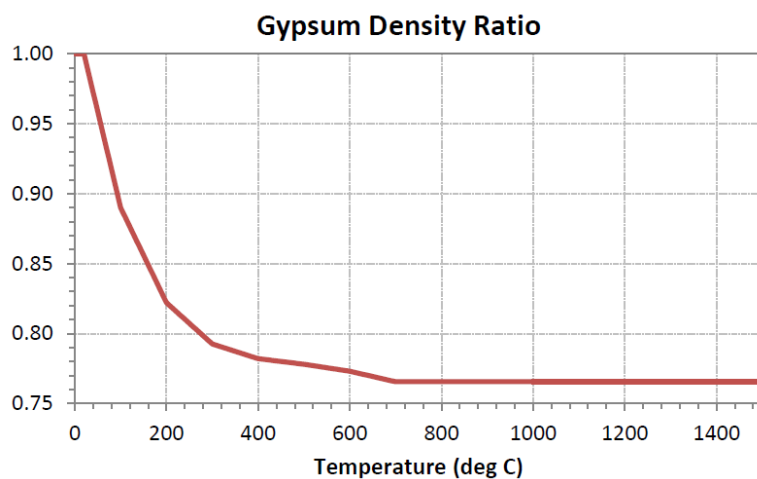


Grafikon 5: Toplotna prevodnost mavčne plošče v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 33) [65]

Graph 5: Temperature-dependent thermal conductivity of gypsum board (Aguanno, 2013, p. 33) [65]



Grafikon 6: Specifična toplotna kapaciteta mavčne plošče pri povišani temperaturi (Aguanno, 2013, str. 35) [65]  
 Graph 6: Specific heat capacity of gypsum board at elevated temperatures (Aguanno, 2013, p. 35) [65]



Grafikon 7: Faktor redukcije gostote mavčne plošče v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 37) [65]  
 Graph 7: Gypsum density ratio at elevated temperatures (Aguanno, 2013, p. 37) [65]

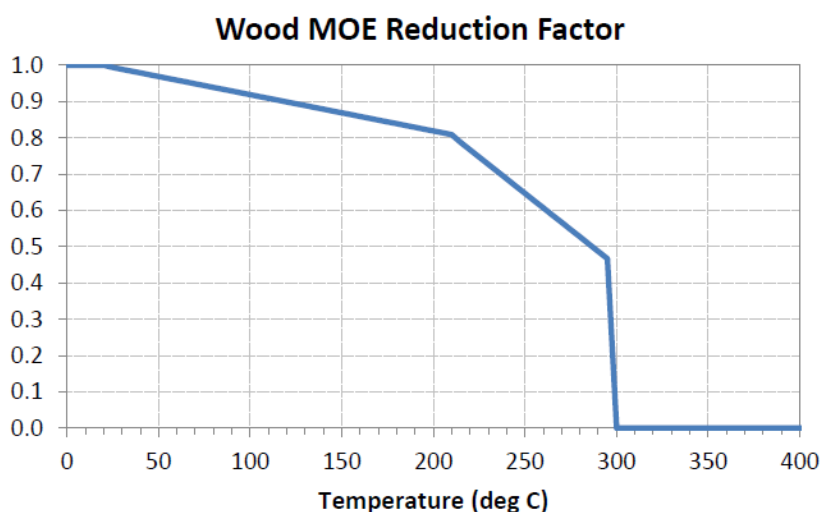
Podatki o zgoraj prikazanih lastnosti mavčnih zaščitnih elementov pri povišanih temperaturah so bistveni za pripravo kvalitetnega modela. Pomembno je namreč pravilno upoštevanje dehidracijske reakcije v mavcu, s tem pa pravilno upoštevanje obnašanja mavca [84]. Ko temperatura v točki v mavcu naraste do temperature med 100 °C in 150 °C pride do drastične spremembe specifične toplotne kapacitete, saj se ta poveča tudi do 18-krat glede na vrednost pri sobni temperaturi [65]. Ob nadaljnjem višanju temperature (od 150 °C naprej) se specifična toplotna kapaciteta ponovno spusti na osnovno vrednost, kot je to prikazano na grafikonu zgoraj (Grafikon 6). Razlog za pojav tako izrazite konice se skriva v sprejemu energije med dehidracijsko reakcijo in kasnejšim izhlapevanjem prostih molekul vode [84]. Ta ekstrem je nujno potrebno upoštevati pri modeliranju, saj prav v času, ko se temperatura zaščitne mavčne plošče giblje okoli 100 °C, le ta ščiti leseni element z zamikom prenosa toplote. Podobnemu pojavu smo priča tudi pri lesenih elementih, ko se temperature točke v lesu povzpne med 100 °C in 120 °C. Navkljub precejšnjemu številu raziskav na področju obnašanja mavčnih plošč pri požarnih obremenitvah pa še vedno ni dobro raziskano področje odpovedi in odstopa mavčnih plošč pri uporabi

na križno lepljenem lesu, kar velja tako pri standardnem kot tudi pri nestandardnem požaru. Za natančno modeliranje je izredno pomemben podatek, kdaj mavčna plošča odpade in ali imamo križno lepljen les direktno izpostavljen požaru [65]. Nekaj raziskav je bilo izvedenih s strani kanadske neprofitne organizacije *FPIInnovations*, ki pomaga tamkajšnji gozdarski in lesno-predelovalni industriji. Ti so izvajali požarne teste na modelih v naravnem merilu, nato pa poizkušali kriterij odpadanja mavčnih plošč vgraditi v numerični model. Zaenkrat natančnih kriterijev še ni mogoče modelirati [85].

#### 5.4 ZOGLENELO IN SEGRETO PODROČJE

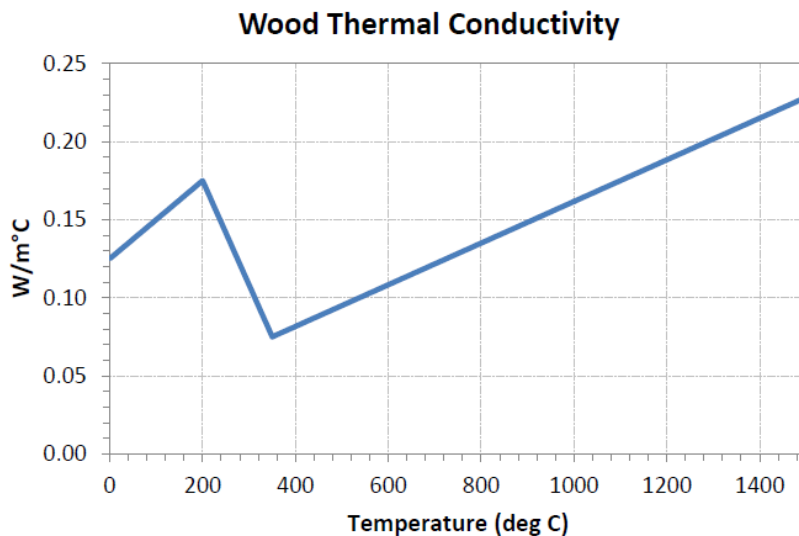
Pri modeliranju lesenih križno lepljenih elementov in prav tako masivnega lesa, se upošteva, da ob doseženi temperaturi 300 °C le ta ne opravlja več nosilne funkcije. Upošteva se, da pri tej temperaturi les spremeni strukturo in postane oglje. Prav tako standard EN 1995-1-2 za iskanje efektivnega prečnega prereza upošteva izotermo 300 °C kot mejno temperaturo med efektivnim in rezidualnim prerezom [37]. Pri numeričnem modeliranju se globina oglečenja določa s pomočjo izoterme 300 °C. Rezultati se nato uporabijo za določevanje hitrosti oglečenja  $\beta$  [65], ki jo lahko uporabimo pri poenostavljenih računskih modelih.

Pri numeričnem modeliranju upoštevamo, da les nad temperaturo 300 °C zogljeni, zoglelemu lesu pa pripišemo temperaturne karakteristike, ki veljajo za oglje.. Predpostavi se, da oglje ostane na svojem mestu, vse dokler se ne pojavi delaminacija sloja. Bilo je izvedenih precej raziskav na področju določanja karakteristik lesa in oglja v odvisnosti od temperature.. Odvisnost elastičnega modula toplotne prevodnosti, specifične toplotne kapacitete gostote od temperature je prikazan Grafikon 11.



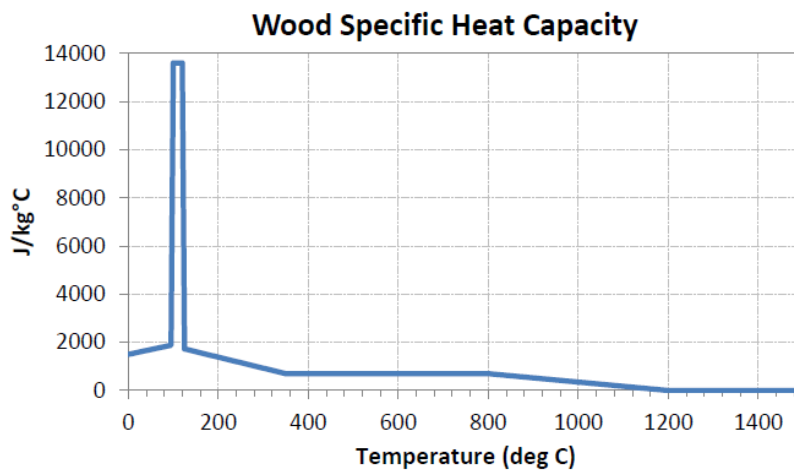
Grafikon 8: Faktor redukcije elastičnega modula (Aguanno, 2013, str. 24) [65]

Graph 8: Modulus of elasticity reduction factor (Aguanno, 2013, p. 24) [65]



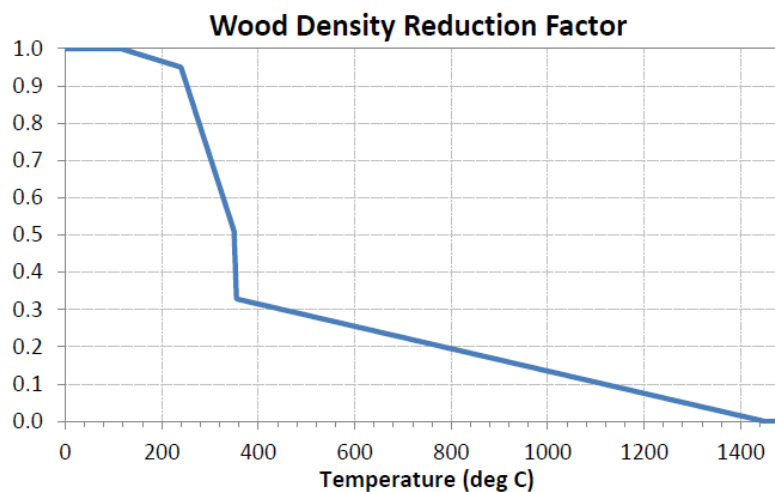
Grafikon 9: Toplotna prevodnost križno lepljenega lesa v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 27) [65]

Graph 9: Thermal conductivity of CLT with temperature dependence (Aguanno, 2013, p. 27) [65]



Grafikon 10: Specifična toplotna kapaciteta križno lepljenega lesa glede na temperaturo (Aguanno, 2013, str. 28) [65]

Graph 10: Specific heat capacity of CLT with temperature dependence (Aguanno, 2013, p. 28) [65]



Grafikon 11: Faktor redukcije gostote križno lepljenega lesa v odvisnosti od temperature (Aguanno, 2013, str. 30) [65]

Graph 11: Temperature-dependent density ratio for CLT (Aguanno, 2013, p. 30) [65]

Pri tem lahko odvisnost gostote od temperature (Grafikon 11) zapišemo tudi z enačbo (Enačba 5.2), vrednosti so določene za štiri specifične točke, vmes pa jih lahko linearno interpoliramo, za kar lahko zapišemo funkcijo.

$$\text{Normirana gostota } \bar{\rho} = \begin{cases} 1 & T \leq 115^{\circ}\text{C} \\ 1,046 - 0,0004 T & 115^{\circ}\text{C} < T \leq 240^{\circ}\text{C} \\ 1,910 - 0,004 T & 240^{\circ}\text{C} < T \leq 350^{\circ}\text{C} \\ 0,435 - 0,0003 T & 350^{\circ}\text{C} < T \end{cases} \quad (5.2)$$

Kot je bilo omenjeno že v poglavju 5.3, modeliranje odpadanja slojev zaenkrat še ni mogoče. Predpostavljeno je tudi, da segrevanje v lesu povzroči trajne spremembe, kar pomeni, da v računu ne upoštevamo morebitno izboljšanje materialnih lastnosti zaradi ohlajanja. Na grafikonih 8 do 9 lahko opazimo medsebojno povezanost različnih materialnih lastnosti. Ob padcu gostote in toplotne kapacitete je opazen dvig toplotne prevodnosti. Ko temperatura lesa naraste do 1200 °C, les ohrani zgolj še 7,5 % gostote glede na prvotno vrednost, nično toplotno kapaciteto, trend prevodnosti pa je še vedno naraščajoč. S tem se lahko določi približek pretoka toplote skozi oslabljeni ali morda celo odluščeni sloj.

Segreto področje je določeno kot razdalja med ogljem in požaru neizpostavljeno stranjo s temperaturo višjo od 200 °C [86].

## 5.5 KRITERIJ PORUŠITVE

Kriterij porušitve se v evropskih in kanadskih standardih malenkostno razlikuje, vseeno pa splošno veljajo tri definicije porušitve elementa v pogojih požara: nosilnost (R), izolativnost (I) in celovitost (E) [86]. Kriterij porušitve zahteva, da element ohranja nosilnost za zahtevan čas izpostavljenosti standardnemu požaru. Izolacijski kriterij porušitve je definiran kot trenutek, ko na neobremenjeni strani elementa povprečna temperatura naraste za vsaj 140 °C ali se kjerkoli v elementu pojavi temperatura za 180 °C višja od osnovne. Oba kriterija sta enako definirana tako kanadski kot evropski. Kriterij celovitosti pa se malenkostno razlikuje, saj je v EN 1995-1-2 [37] porušitev po kriteriju celovitosti definirana kot dogodek, ko na neobremenjeni strani lamele niso več povezane s celoto [37]. Kanadski standard pa porušitev po kriteriju celovitosti opisuje kot dogodek, ko se na neizpostavljeni strani pojavijo plameni ali plini, katerih temperatura je zadostna za vžig bombaža [86]. Raziskave kažejo, da pri križno lepljenih lesenih elementih običajno ni težav z izpolnjevanjem zahtev glede kriterija celovitosti, saj se temperatura na neizpostavljeni strani dvigne kvečjemu za nekaj stopinj, ne pa bistveno. Na drugi strani pa je glede na rezultate poseben poudarek potrebno posvetiti zagotavljanju kriterija nosilnosti, predvsem pri ploščah [65].

### 5.5.1 Določitev upogibne nosilnosti

Ob nanosu obtežbe na plošče iz križno lepljenega lesa je glede na upogibno in strižno togost razvidno, da je razen v izjemnih primerih pri požaru vedno merodajna upogibna porušitev, saj gre v večini primerov za prostoležeče podrte plošče. Sicer bi bila lahko merodajna tudi strižna porušitev. Izjeme se

pojavi pri izredno kratkih razponih, kjer se lahko pojavijo velike prečne sile in tako tudi pri požaru postane merodajen strižni kriterij porušitve. Kot omenjeno je običajno merodajen kriterij pri modeliranju elementov pod vplivom požarne obremenitve tako upogibna nosilnost [65].

Pri požaru se prečni prerez začne zmanjševati, torej se mehansko gledano zmanjšuje tudi nosilnost križno lepljene plošče. Pri modeliranju se upogibna nosilnost elementa določi za vsak časovni korak posebej v odvisnosti od temperature. Za to obstaja več metod, vendar kot osnovo lahko privzamemo metodo opisano v priročniku CLT Handbook [34]. Ta predlaga račun globine ogljenja na podlagi upoštevane konstantne hitrosti ogljenja  $\beta = 0,65$  mm/min, podobno kot to predlaga standard EN 1995-1-2 v preglednici 3.1 [37]. Za razliko od standarda EN 1995-1-2, ki zogleneli plasti doda sloj nične nosilnosti  $d_0$  [37], priročnik CLT Priročnik priporoča upoštevanje debelino segrete plasti 10,5 mm po 20 minut trajajočem požaru v katerem je zajet tudi sloj nične nosilnosti [34]. Pri numeričnem modeliranju pa zaradi željene povečane natančnosti raje uporabljamo reducirani elastični modul v odvisnosti od temperature, kot je prikazano v prejšnjem poglavju (Grafikon 8). Račun potek po naslednjih korakih, najprej se izračuna temperature v vsakem vozlišču končnih elementov, kot je to opisano v poglavju 5.2, nato pa se z reduciranim elastičnim modulom izračuna reducirano upogibno trdnost elementa. Numerični model je za metodo končnih diferenc, ki se uporablja pri numeričnem modeliranju, prikazan na sliki zgoraj (Slika 25). Na podlagi reducirane upogibne trdnosti se nato določi nevtralna os efektivnega prečnega prereza  $\bar{y}$  (Enačba 5.3), efektivna togost  $EI_{eff}$  (Enačba 5.4) in efektivni faktor oblike prečnega prereza  $S_{eff}$  (Enačba 5.5), kot to narekuje priročnik CLT Handbook [34]. Ta postopek lahko zapišemo z naslednjimi enačbami:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i \tilde{y}_i h_i E_i}{\sum_i h_i E_i} \xrightarrow{E_1=E_2=\dots} \bar{y} = \frac{\sum_i \tilde{y}_i h_i}{\sum_i h_i} \quad (5.3)$$

kjer je:

$\bar{y}$  – razdalja od nevtralne osi do neobremenjenega roba

$\tilde{y}_i$  – razdalja od težišča  $i$ -tega sloja do neobremenjenega roba

$h_i$  – preostala debelina sloja  $i$

$E_i$  – elastični modul sloja  $i$  v smeri glavne osi

$$EI_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_i b_i h_i d_i^2 E_i \quad (5.4)$$

kjer je:

$EI_{eff}$  – efektivna upogibna togost

$d_i$  – razdalja med nevtralno osjo in težiščem sloja  $i$

$b_i$  – enotna širina križno lepljenega panela (običajno se računa 1 m)

$h_i$  – debelina sloja  $i$

$$S_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E(h_{fire} - \bar{y})} \quad (5.5)$$

kjer je:

$S_{eff}$  – efektivni faktor oblike prečnega prereza

$E$  – elastični modul najbolj obremenjenega sloja, običajno  $E_i$

S pomočjo zgornjih podatkov je nato mogoče določiti upogibno nosilnost v vsakem časovnem koraku sklano s spodnjo enačbo (Enačba 5.6) [65].

$$M_R = \Phi F_b S_{eff} K_{zb} K_L \quad (5.6)$$

kjer je:

$F_b - f_b (K_D, K_H, K_{sb}, K_T)$

$\Phi = 0,9$  – faktor odpornosti

$f_b$  – upogibna trdnost

$K_{zb}$  – faktor velikosti v upogibu

$K_L$  – faktor bočne stabilnosti

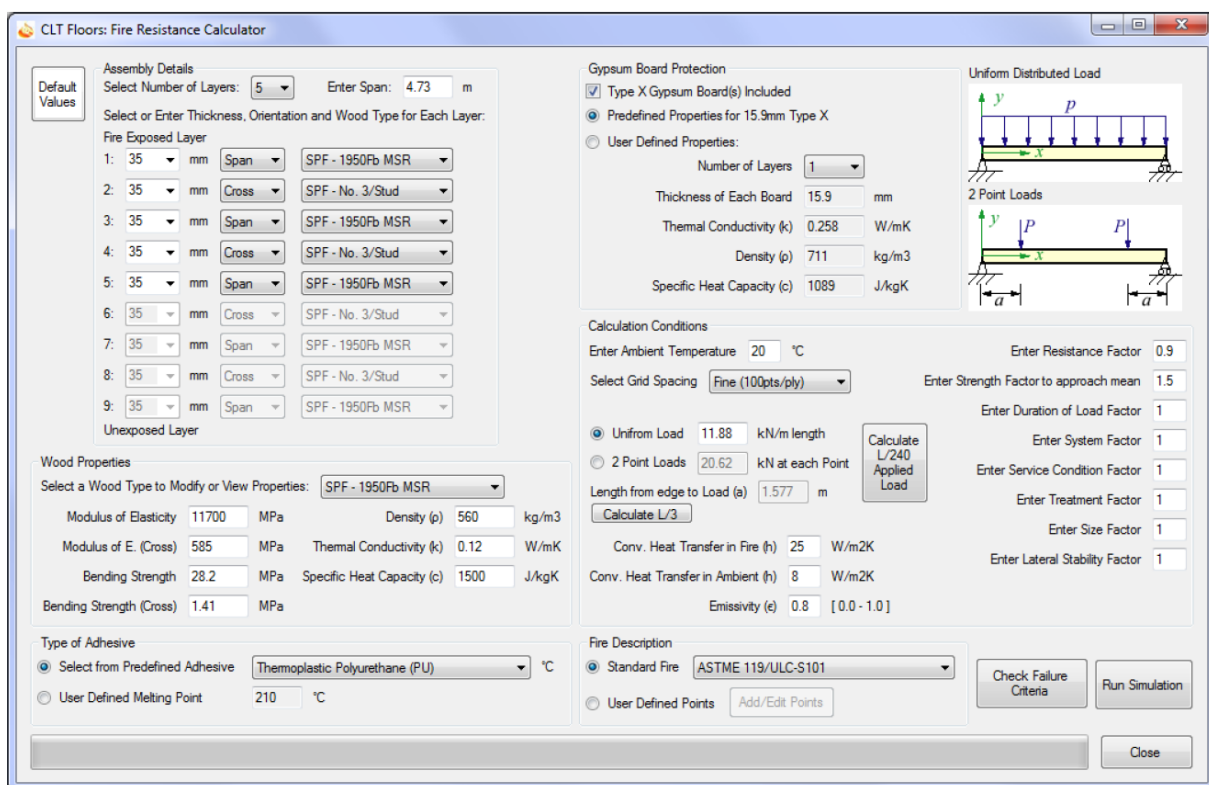
$K_D$  – faktor trajanja obtežbe

$K_H$  – faktor sistema

$K_{sb}$  – faktor, ki zajema vpliv možnosti vzdrževanja

$K_T$  – faktor obdelave

V osnovi se vrednosti vseh faktorjev vzamejo 1,0 nato pa jih skladno s primerom korigiramo. Takšen primer je bil s pomočjo programskega orodja »CLT Floor Fire Resistance Calculator« predstavljen v [65] in je prikazan spodaj (Slika 26).



Slika 26: Grafični vmesnik za pripravo numeričnega modela namenjenega računu požarne odpornosti križno lepljenega lesa (Aguanno, 2013, str. 129) [65]

Figure 26: Graphical user interface for numerical model to calculate the fire resistance of CLT (Aguanno, 2013, p. 129) [65]

Za zagotovitev ustrezne nosilnosti prostoležeče križno lepljene plošče mora veljati da je upogibna nosilnosti določena po enačbi 5.12 večja od obremenitve določene pri požarni obtežni kombinaciji  $M_{f,Ed}$ :

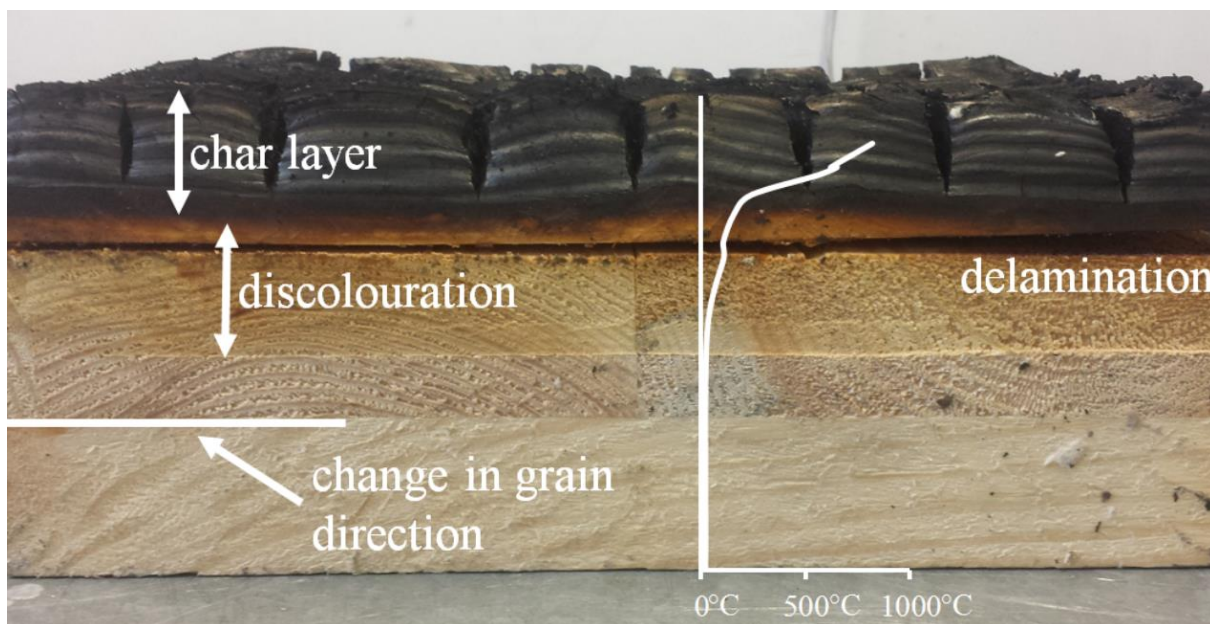


$$M_{Rd} \geq M_{f,Ed} = \frac{qL^2}{8} \quad (5.7)$$

Računski postopek se zaključi pri času, ko pogoj ni več izpolnjen [65].

## 5.6 DELAMINACIJA

Delaminacija je pogost pojav pri požarni obremenitvi lameliranih križno lepljenih elementov, saj pri določeni temperaturi vezno sredstvo (lepilo) odpove. Glede na rezultate različnih eksperimentov, ki so bili izvedeni širom sveta (večina v Švici, Skandinaviji in ZDA), se temperatura delaminacije giblje med 200 °C in 300 °C [57][65][73]. Če ostanemo na varni strani, lahko za primer vzamemo rezultate raziskav, objavljene v [65], kjer navajajo, da se delaminacija pojavi pri 210 °C. Uporabljeno je bilo lepilo na poliuretanski osnovi, kar za modeliranje pomeni uporabo termoplastičnega poliuretanskega veznega sredstva, kot je to prikazano na zgornji sliki (Slika 26). Z izbiro modela za lepilo izberemo tudi temperaturo tališča, ki nam določa temperaturo, ob kateri pride do delaminacije pri simulaciji. Ta je običajno vezana na izbor lepila, lahko pa se jo poda tudi ročno v primeru drugačnih karakteristik lepila. Z uporabo termično odpornega lepila se delaminaciji lahko izognemo, saj velja, da pri temperaturi 300 °C les začne ogleneti, kar pomeni porušitev v lesu, lepilo pa še vedno opravlja svojo povezovalno funkcijo [57]. Primer delaminacije med požarnim testom je viden na spodnji sliki (Slika 27).



Slika 27: Križno lepljen prerez na katerem je prikazan primer delaminacije (Bartlett, 2015, str. 4) [90]

Figure 27: A CLT sample showing delamination (Bartlett, 2015, p. 4) [90]

## 5.7 VHODNI PARAMETRI NUMERIČNEGA MODELA

### 5.7.1 Obtežba

Pri modeliranju obtežbe je kot običajno pomembno, ali gre za porazdeljeno ali točkovno obtežbo.. Kot je prikazano na posnetku simulatorja zgoraj (Slika 26) v desnem zgornjem kotu, sta na razpolago dve

različni opciji obremenjevanja: točkovna obtežba dveh točk ali enakomerna porazdeljena linijska obtežba. Pri točkovni obtežbi je poleg vrednosti pomemben podatek tudi oddaljenost obtežbe od podpore, medtem ko je pri porazdeljeni obtežbi pomembna le vrednost.

### 5.7.2 Kontrola kriterija porušitve

Kot porušitev se upošteva stanje, kadar je računski nosilnost premajhna, glej kriterij (Enačba 5.8). Sicer je odvisno od standarda, vendar se običajno mejnega stanja uporabnosti v primeru nezgodnih projektnih stanj, kot je požar, ne preverja [65].

$$E_d > R \quad (5.8)$$

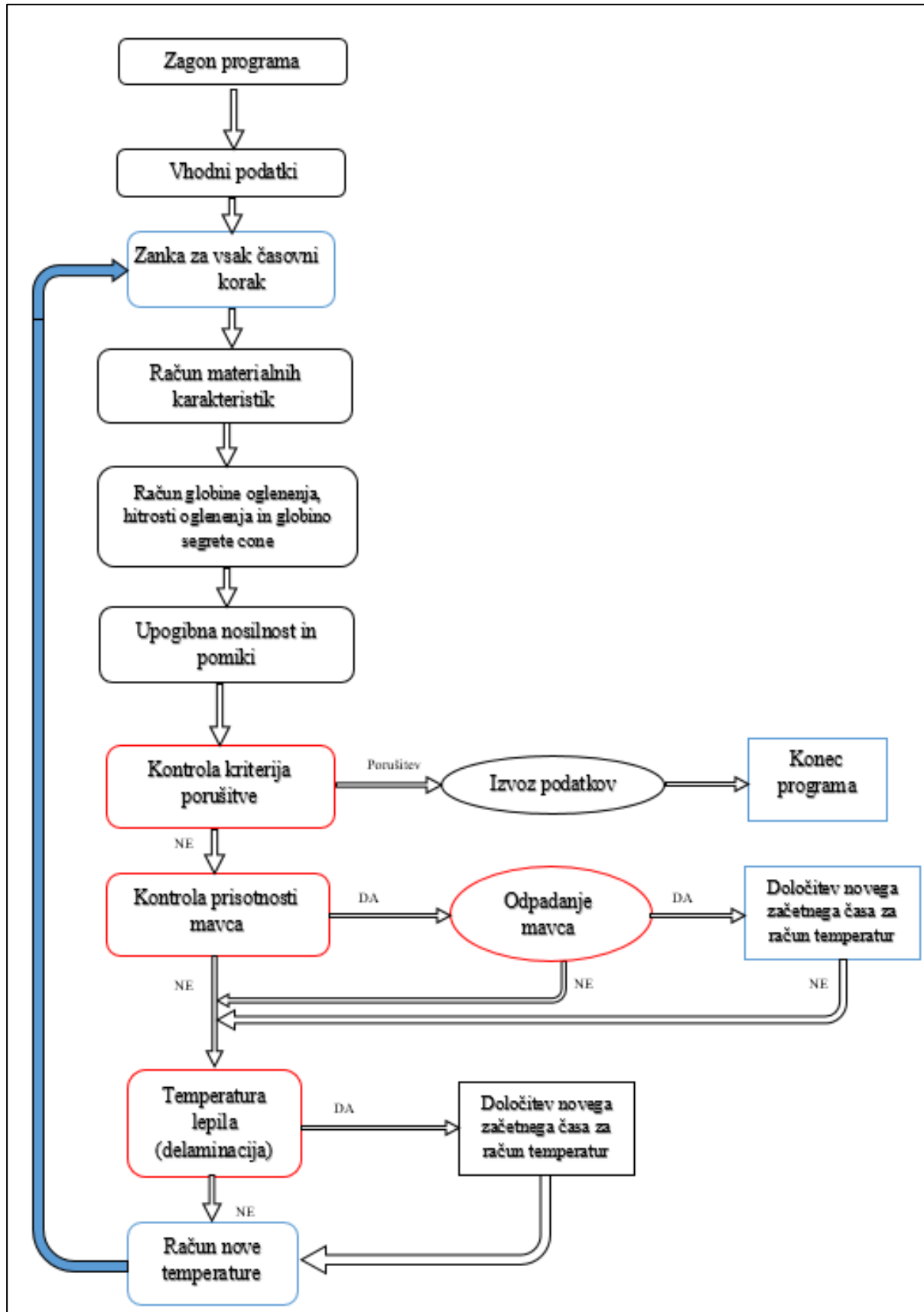
### 5.7.3 Faktor nosilnosti za srednji približek

Karakteristične vrednosti materiala se med različnimi standardi nekoliko razlikujejo, vendar so v večini primerov definirane kot vrednosti s 5 % fraktile. To pomeni, da ima lahko le 5 % vzorcev nižjo vrednost od karakteristične vrednosti. Če želimo določiti srednjo vrednost upogibne nosilnosti lesa moramo karakteristično vrednost izračunati v odvisnosti od porazdelitve. Poenostavljeno pa to lahko storimo tako, da karakteristično vrednost pomnožimo z ustreznim faktorjem, ki je odvisen od vrste lesa. Za lepljen lesa velja, da se karakteristična vrednost pomnoži s faktorjem 1,5.

### 5.7.4 Postopek numeričnega modeliranja in vrstni red operacij

Celoten postopek numeričnega modeliranja križno lepljenih lesenih elementov in simulacija je prikazan na diagramu spodaj (Slika 28). Postopek se začne z vstavljanjem vhodnih podatkov v grafičnem vmesniku, kot je primer prikazan na Slika 26. Ko so vstavljeni vsi potrebni vhodni podatki, lahko začnemo z računom. Račun se začne z določevanjem robnih oziroma začetnih pogojev, ki so običajno vezani na začetno sobno temperaturo. Karakteristike pri sobni temperaturi in začetno temperaturo podamo kot vhodni podatek, saj jih poznamo. Za križno lepljen les in morebiti zaščitno plast (na primer mavčno ploščo) bo program na podlagi tega znal določiti začetne pogoje. Skladno z razvojem temperature program preverja pogoje in korigira karakteristike prereza. Za točko lesenega elementa, ki ima temperaturo preko 300 °C, tako program ve, da se je spremenila v oglje in so njene mehanske in termične karakteristike popolnoma drugačne. Simulator na podlagi temperatur iz prejšnjega koraka za vsako točko/vozišče določi zogleneli volumen, globine oglečenja, hitrost oglečenja in posledično segreto plast. Pri tem je v prvem koraku kot vhodni podatek vzel začetne pogoje. Postopek se bo za različne čase ponavljal vse dokler ne bo upogibni moment, ki ga izračuna na podlagi podane obtežbe, presegel upogibne nosilnosti, izračunane na podlagi efektivne upogibne nosilnosti elementa z upoštevanjem zoglenele plasti (Enačba 5.8). Ob morebitni zaščiti se v vsakem koraku simulacije pojavi kontrola prisotnosti zaščitne plasti. Ta kriterij je običajno določen s temperaturo med plastjo zaščite in prvo leseno plastjo. Če temperatura ne presega mejne temperature, ki bi pomenila porušitev, program upošteva zaščito tudi v naslednjem koraku. V primeru presežene temperature se upošteva delaminacija

oziroma odpoved zaščitne plasti. To za naslednji korak pomeni neupoštevanje zaščite. Račun temperatur in karakteristik v lesenem križno lepljenem elementu se še naprej določa na enak način kot prej za vsako točko posebej. Z določenim kriterijem porušitve stika med lamelami oziroma plastmi v križno lepljenem sestavu se preverja tudi temperatura na stiku med dvema slojema. V primeru, ko temperatura preseže s kriterijem določeno temperaturo, v naslednjem koraku simulator upošteva delaminacijo lesenega sloja. To pomeni, da vsa vozlišča, ki so bila v tem sloju, odpadejo in se jih v naslednjih korakih zato zanemari. Na opisan in spodaj grafično prikazan način (Slika 28) program ponavlja račun za vsak časovni korak v vsakem modeliranem vozlišču. V primeru, ko so vnaprej podani kriteriji izpolnjeni, se simulacija nadaljuje za naslednji čas. Nov čas pomeni tudi novo temperaturo in nove ostale karakteristike. V primeru zavrnitve kriterija se simulacija zaključi in dobimo čas zadnje uspešne kontrole kriterija in vse podatke, ki spadajo k temu časovnemu koraku. S tem pa tudi odpornost, določeno v časovnih enotah, ki jo ima določen element pri določeni simulirani obtežbi [65].

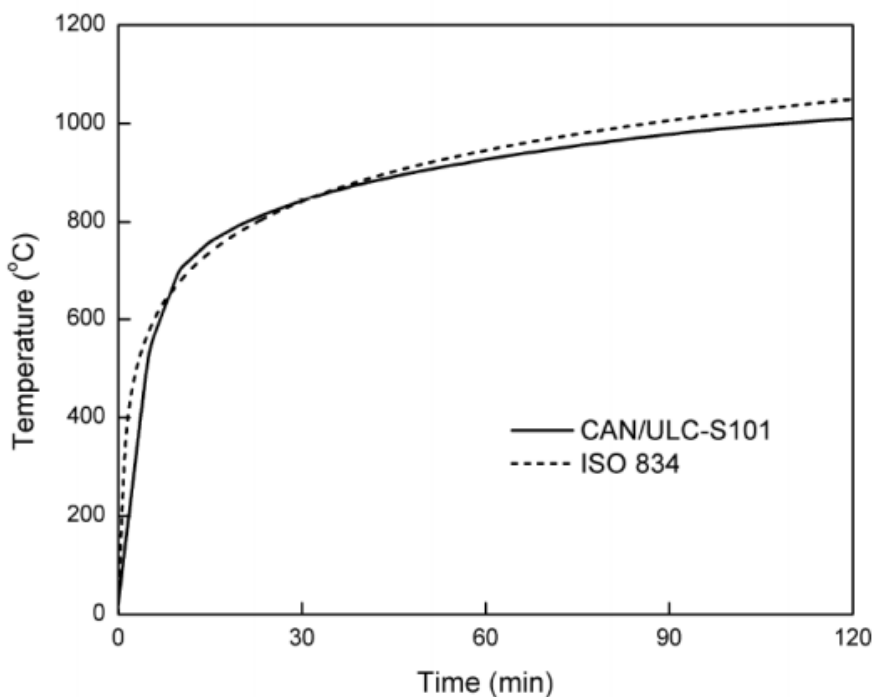


Slika 28: Algoritem računa požarne odpornosti križno lepljenega lesa (Aguanno, 2013, str. 134) [65]

Figure 28: Process completed by numerical model to calculate fire resistance of CLT (Aguanno, 2013, p. 134) [65]

## 5.8 PRIMERJAVA REZULTATOV NUMERIČNEGA IN EKSPERIMENTALNEGA MODELA

Glede na stanje raziskav po svetu so rezultati raziskav med seboj nekoliko različni, saj se vsakodnevno pojavljajo naprednejši pristopi in nova spoznanja. Za primerjavo rezultatov numeričnega modeliranja in eksperimentalnih testov na področju križno lepljenega lesa se kot osnovni vir uporablja rezultate objavljene v [65]. Preizkušene so bile križno lepljene plošče, za morebitno zaščito pa so se uporabljale mavčne plošče. Izvedeni so bili eksperimenti tako za zaščitene kot tudi za nezaščitene elemente. Eksperimenti so bili izvedeni v Kanadi, zato je bil upoštevan standardni požar CAN-ULC S101 (Grafikon 12) in nestandardni požar podan v [86]. Ob prikazu krivulje standardnega požara spodaj (Grafikon 12) pa lahko opazimo dobro ujemanje s standardno požarno krivuljo po evropskih standardih ISO 834 [37].



Grafikon 12: Standardna požarna krivulja po CAN/ULS-101 in ISO834 (Saidu, 2011, str. 6) [92]

Graph 12: CAN/ULS-S101 and ISO834 standard fire exposure curve (Saidu, 2011, p. 6) [92]

### 5.8.1 Mavčne plošče kot zaščita

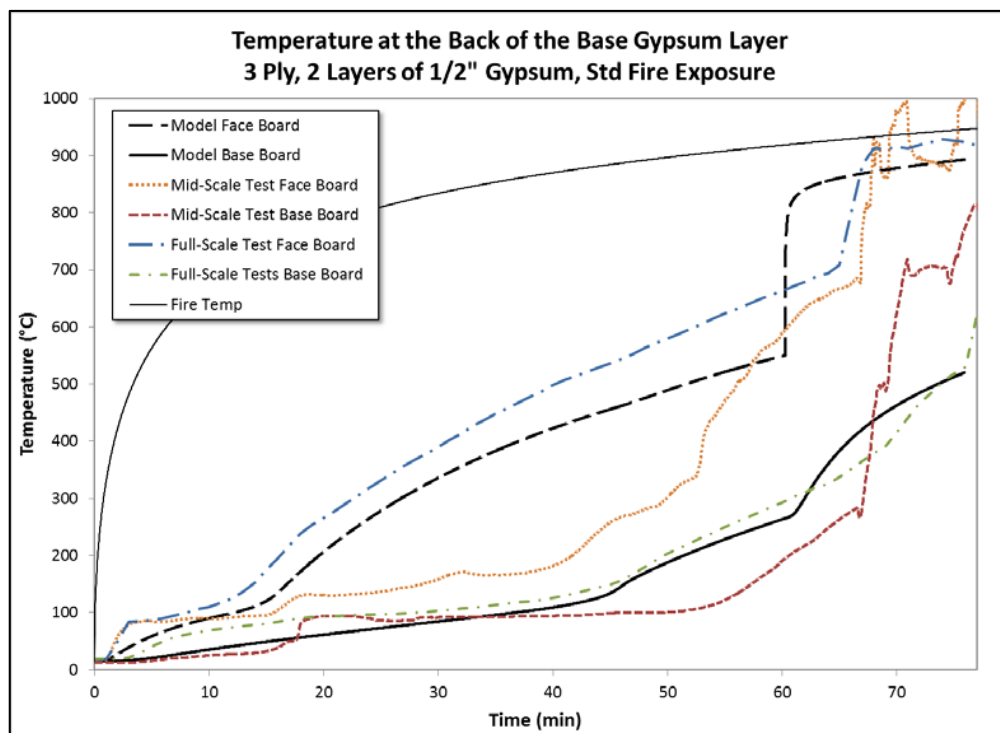
Pri primerjavi rezultatov obnašanja mavčnih plošč kot zaščitnega elementa križno lepljenega lesenega elementa je najpomembnejši podatek čas, po katerem mavčna plošča odpove. Odpoved se upošteva kot odpadanje plošče oziroma luščenje in razpad plošče, ki omogoči plamenu do direktnega kontakta z lesom. Referenčni rezultati eksperimentov so objavljeni v [65]. Ti so se izvajali z mavčnimi ploščami debelin 15,9 mm (5/8 inch) in 12,7 mm (1/2 inch) z eno in dvoslojno izvedbo. Seznam eksperimentov je prikazan v spodnji preglednici (Preglednica 10), kjer so istočasno prikazani tudi delni rezultati. Predvsem je pomemben čas odpovedi, ki je naveden za različen eksperiment. Rezultati so tudi grafično

prikazani spodaj (Grafikon 13), kjer se vidi primerjava med rezultati numeričnega in eksperimentalnega modela. Potrebno je upoštevati, da mavčne plošče različnih proizvajalcev lahko prinesejo različne rezultate, vendar vseeno le te nebi smeli bistveno vplivati na obnašanje pri požaru [65]. Pri odčitavanju in primerjavi rezultatov je potrebno upoštevati, da se modelira hipno odpoved plošče. Ob določeni temperaturi plošča odpove v celoti, medtem ko se v realnosti deli plošče še vedno ohranijo na površini in še naprej opravljajo svojo nalogo, kar glede na primerjalni grafikon (Grafikon 13) prinese določena odstopanja. Ta so najbolj opazna pri skokih krivulje. Primer se vidi pri primerjavi krivulje za izpostavljeno mavčno ploščo, katere temperatura modela se pri času 60 minut drastično dvigne krivulja eksperimenta pa prikazuje skok nekoliko kasneje (pri času 65 minut) ter manj drastično.

Preglednica 10: Dejanski in modeliran Čas ob odpovedi mavčne plošče (Aguanno, 2013, str. 135) [65]

Table 10: Gypsum fall-off times from numerical model and experiments (Aguanno, 2013, p. 135) [65]

Št. slojev	Mavčne plošče	Požar	Izpostavljena plošča		Druga plošča	
			Dejanski čas odpovedi [min]	Modeliran čas odpovedi [min]	Dejanski čas odpovedi [min]	Modeliran čas odpovedi [min]
3	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	/	/	52	55
3	2x 13 mm (1/2 inch)	CAN/ULC	65	60	76	76
3	2x 13 mm (1/2 inch)	Nestandarden	28	40	82	Ni odpovedala
5	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	/	/	26	54
3	1x 16 mm (5/8 inch)	Nestandarden	/	/	26	30



Grafikon 13: Primerjava med modeliranimi in eksperimentalno izmerjenimi temperaturami na neizpostavljeni strani mavčne plošče pri troslojni križno lepljeni plošči z dvema mavčnima ploščama, pri standardnem požaru (Aguanno, 2013, str. 136) [65]

Graph 13: Comparison between model and experimental temperatures found at the back of the gypsum layers from a 3-ply panel with 2 layers of gypsum standard fire test (Aguanno, 2013, p.136) [65]

### 5.8.2 Odlepljanje lamel (delaminacija)

Podobno kot pri kriteriju odpovedi mavčne plošče se tudi pri modeliranju kriterija delaminacije pojavlja težava s hipno odpovedjo celotnega sloja v modelu namesto postopne odpovedi, kot smo ji priča v realnosti. Običajno se v modeliranju kriterij odpovedi sloja povezuje s temperaturo lepila. Odpoved celotnega sloja je hipna ob nastopu zadostne temperature na meji med slojema, kjer se nahaja lepilo. Sicer odvisno od vrste lepila, vendar delaminacija običajno nastopi pri temperaturi do 350 °C, čeprav proizvajalci različnih lepil podajajo drugačne rezultate [43]. V spodnji preglednici (Preglednica 11) so zbrani podatki odpovedi različnih lepil glede na temperaturo.

Preglednica 11: Temperatura odpovedi lepila (Emberly idr., 2015, str. 7) [43]

Table 11: Temperature of cohesion failure (Emberly et. Al, 2015, p. 7) [43]

Oznaka lepila	Temperatura ob odpovedi
Kauresin 460 (R-F)	> 170 °C
Kauranat 970 (1K-PUR)	180°C – 190 °C
Balcotan 107 TR (1K-PUR)	50 °C – 60 °C
Balcotan 60 190 (1K-PUR)	190 °C – 200 °C
Purbond HB 110(1K-PUR)	60°C – 70 °C
Purbond VN 1033(1K-PUR)	150 °C – 160 °C
Araldite AW 136 H (epoksi)	50 °C – 60 °C

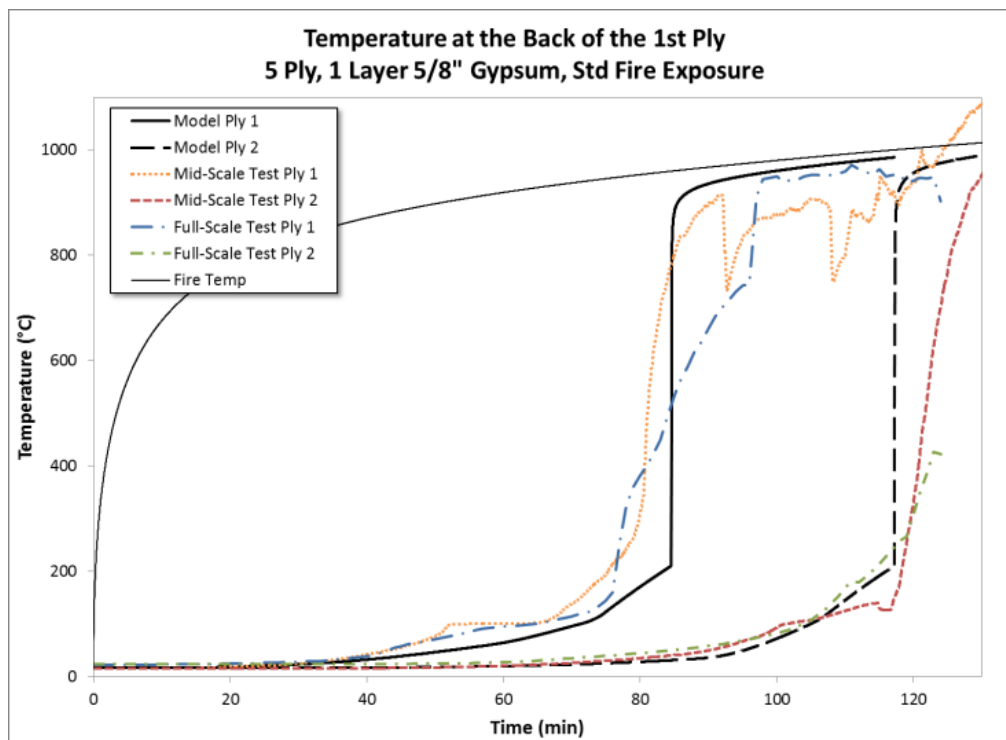
Glede na rezultate preizkusov primerjanih z rezultati eksperimentov se pokaže dobro ujemanje. Spodaj je v preglednici (Preglednica 12) zbran seznam eksperimentov, ki so bili izvedeni in nato primerjani z rezultati numeričnega modela, objavljeni v [65]. Opazimo lahko, da v resnici sloji odpadejo še nekoliko kasneje, kot je to izračunano v numeričnih modelih. Na grafikonu na naslednji strani (Grafikon 14) pa lahko opazimo podoben pojav kot pri mavčnih ploščah, kjer se na krivuljah numeričnega modela pojavijo hipne spremembe temperature, meritve eksperimenta pa kažejo na nekoliko bolj umirjeno rast. Ponovno je razlog v tem, da numerični model upošteva odpoved celotnega sloja ob določeni temperaturi, v resnici pa sloj odpoveduje postopoma. Grafikon je izdelan za primer obremenitve s standardno požarno krivuljo po kanadskem standardu CAN/ULC-S101 [86], Razberemo lahko, da numerični model določi temperaturo prvega sloja enako kot je temperatura požara (približno 900 °C) pri času 85 minut, medtem ko drugi sloj temperaturo standardnega požara ujame nekje pri skoraj 120 minutah (približno 950 °C). Eksperimentalni rezultati kažejo, da do ujemanja temperatur pride še kasneje. Temperaturi se ujameta pri prvi plasti nekje po 95 minutah, pri čemer so od tega časa naprej opazna manjša nihanja. Druga plast pa do konca požara (125 minut) ne doseže temperature po standardni požarni krivulji.

Preglednica 12: Dejanski in modeliran čas delaminacije (Aguanno, 2013, str. 137) [65]

Table 12: Ply layer fall-off times from numerical model and experiments (Aguanno, 2013, p. 137) [65]

Št. slojev	Mavčne plošče	Požar	Izpostavljeni sloj		Drugi sloj	
			Dejanski čas odpovedi [min]	Modeliran čas odpovedi [min]	Dejanski čas odpovedi [min]	Modeliran čas odpovedi [min]
3	Nezaščiten	CAN/ULC	64,5	57	/	/
3	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	>80	86	/	/
3	2x 13 mm (1/2 inch)	CAN/ULC	107-111	107	/	/
3	2x 13 mm (1/2 inch)	Nestandarden	/	89	/	/
5	Nezaščiten	CAN/ULC	60-65	55	>92	90
5	Nezaščiten	Nestandarden	38-53	41	/	88
5	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	75-81	85	26	17
5	1x 16 mm (5/8 inch)	Nestandarden	54-80	69	/	/





Grafikon 14: Primerjava temperatur numeričnega model in eksperimenta na hrbtni strani lesenega sloja petslojne križno lepljene plošče, zaščitene z eno mavčno ploščo pri standardnem požaru (Aguanno, 2013, str. 137) [65]

Graph 14: Comparison between model and experimental temperatures found at the back of ply layers from a 5-ply panel with one layer of gypsum, standard fire test (Aguanno, 2013, p. 137) [65]

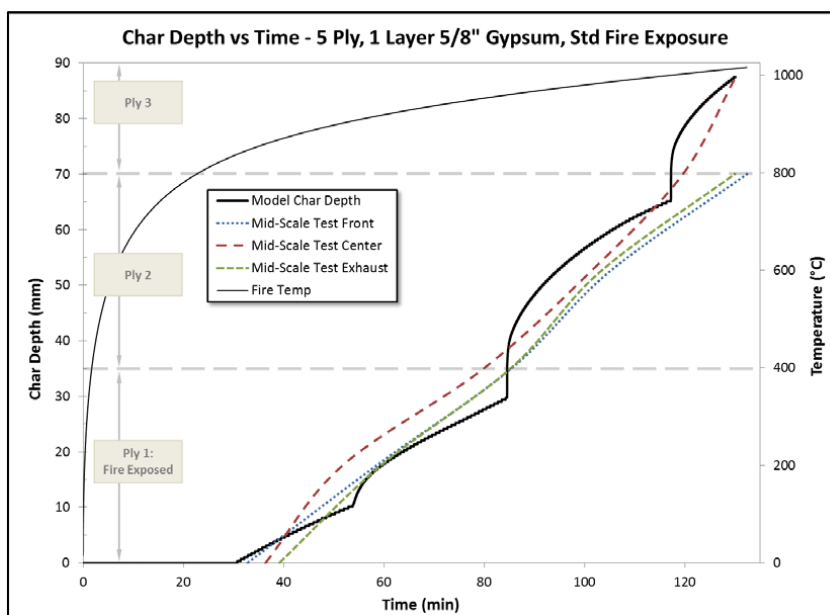
### 5.8.3 Oglenenje

Za primerjavo rezultatov ogleenja v numeričnem modelu in eksperimentu se je v ploščo namestilo 8 merilcev temperature (termočlenov) na 8,75 mm ali na  $2 \times 8,75 \text{ mm} = 17,5 \text{ mm}$  po globini. V numeričnem modelu se je modeliralo vozlišča na 0,35 mm. V spodnji preglednici (Preglednica 13) so zbrani rezultati numeričnega modela za različne primere. Rezultati so podani za različno število slojev v križno lepljenih elementih, različne oblike zaščite z mavcem in različne požarne obtežbe. Primerjava med rezultati numeričnega modela in eksperimenta je prikazana na grafikonu pod preglednico (Grafikon 15).

Preglednica 13: Povzetek povprečnih hitrosti oglenenja pri različnih globinah v numeričnem modelu (Aguanno, 2013, str. 138) [65]

Table 13: Summary of average charring rates calculated at various depths from numerical model (Aguanno, 2013, p. 138) [65]

Število slojev	3	3	3	3	5	5	5	5	
Mavčne plošče [mm]	/	1x 16 (5/8")	2x 13 (1/2")	2x 13 (1/2")	/	/	1x 16 (5/8")	1x 16 (5/8")	
Požar	ULC	ULC	ULC	Nestan.	ULC	Nestan.	ULC	Nestan.	
Pojav oglenenja [min]	2,7	31	62	44	2,5	1,5	31	21	
Povprečna hitrost oglenenja [mm/min]	8,75 mm	0,87	0,44	0,64	0,5	0,9	1,51	0,45	0,91
	17,50 mm	0,66	0,59	0,84	/	0,69	1,04	0,60	1,00
	26,25 mm	0,55	0,55	0,70	/	0,57	0,82	0,56	0,68
	35,00 mm	0,54	0,54	0,66	/	0,56	0,76	0,55	0,74
	43,75 mm	0,77	0,76	0,93	/	0,79	1,05	0,78	0,86
	52,50 mm	0,8	0,81	0,96	/	0,82	1,05	0,82	0,74
	70,00 mm	/	/	/	/	0,75	0,81	0,76	/
87,50 mm	/	/	/	/	0,87	/	0,88	/	
Povprečje	0,70	0,62	0,79	0,50	0,74	1,01	0,68	0,82	
Standardna deviacija	0,14	0,14	0,14	/	0,13	0,26	0,15	0,12	



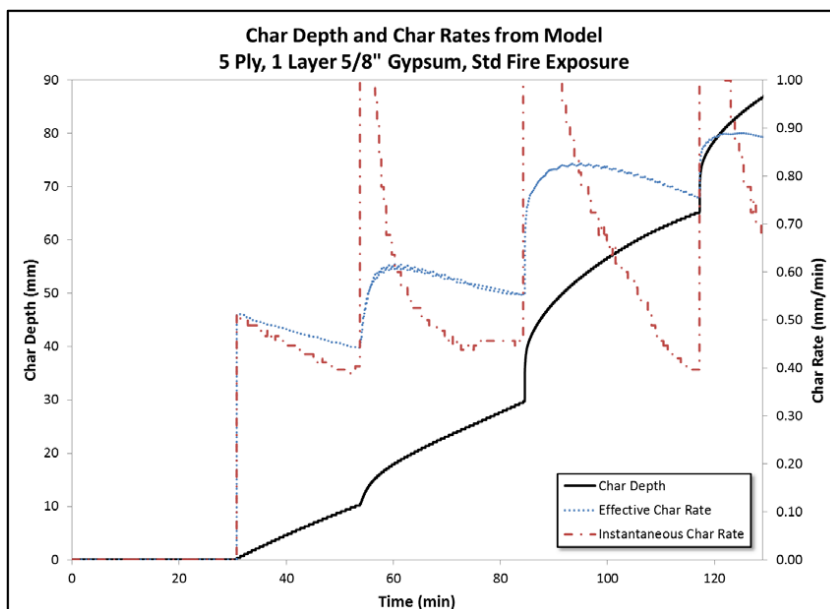
Grafikon 15: Primerjava globine oglenenja v numeričnem modelu in eksperimentu v petslojnjem panelu z eno mavčno ploščo (Aguanno, 2013, str. 139) [65]

Graph 15: Comparison between model and experiment char depth in a 5-ply panel with 1 layer of gypsum (Aguanno, 2013, p. 139) [65]

Primerjava rezultatov, ki so prikazani v zgornji preglednici (Preglednica 13) in zgornjem grafikonu (Grafikon 15), kaže na ujemanje trendov hitrosti oglenenja, vrednosti pa nekoliko odstopajo. Razberemo lahko, da numerični model vrne precej dobre rezultate, ki bi se jih lahko uporabilo pri projektiranju, ima pa še svoje pomanjkljivosti. Primer pomanjkljivosti je najbolj opazen v skokih, ki na grafikonu dejanskih rezultatov niso tako očitni. Skoki v rezultatih numeričnega modela se pojavijo zaradi vnaprej določene temperature delaminacije, ki se v modelu zgodi hipno. Po odpovedi sloja se upošteva povečana hitrost

oglenenja zaradi povišane požarne obremenitve na naslednji sloj, ki je že segret. Pojav je opisan v poglavju 394.4 in prikazan na Slika 19. Fenomen je bil dokazan in rezultati objavljeni v [32].

Hitrosti oglenenja so lahko v numeričnem modelu določene natančneje kot pri meritvah v eksperimentih. V modelu lahko merimo čas, ki je potreben, da oglje napreduje iz enega vozlišča do naslednjega, kar omogoča določitev »hipne hitrosti oglenenja« [65]. Za izračun efektivne hitrosti oglenenja, ki se običajno uporablja, ni težav. Globino napredovanja oglenenja delimo s časom, ki je potreben za napredek iz enega vozlišča do naslednjega in dobimo efektivno hitrost oglenenja. Zadostne informacije o hitrosti oglenenja križno lepljenega lesa lahko pripeljejo do poenostavljene metode za določitev globine oglenenja. Na spodnjem grafikonu (Grafikon 16) je prikazana primerjava globine oglenenja, efektivne hitrosti in hipne hitrosti oglenenja zvezno s časom.



Grafikon 16: Globina oglenenja, efektivna hitrost in hipna hitrost oglenenja pri modelu petslojnega panela z eno mavčno ploščo, izpostavljen standardnemu požarnemu test (Aguanno, 2013, str. 140) [65]

Graph 16: Char depth, effective charring rate and instantaneous charring rate determined by the model in 5-ply panel with 1 layer of gypsum during a standard fire test (Aguanno, 2013, p. 140) [65]

Na zgornjem grafikonu (Grafikon 16) so opazne špice v krivulji za hipno hitrost oglenenja, ki segajo do hitrosti preko 1,00 mm/min. Razlog za takšen pojav je, da po odpovedi mavčne plošče in delaminaciji lesenega sloja, pride do hipno povečanega toplotnega toka na naslednji, že segreti sloj, in posledično je nova začetna hitrost oglenenja precej povečana. Med eksperimentom takšnega dogajanja niso zasledili saj je praktično nemogoče meriti hipno hitrost prenosa toplote oz. oglenenja. Dejanska povprečna hitrost oglenenja sama po sebi ni problematična, njene hipne spremembe pa predstavljajo velik zalogaj. Potrebno je natančno poznavanje obnašanja križno lepljenega panela med požarom, njegovo oglenenje in predvsem nenadnih pojavov in ekstremov. Za upoštevanje vsega tega v numeričnih model ni enostavnega postopka [65]. Iz zgornjega grafikona (Grafikon 16) lahko razberemo, da efektivna hitrost oglenenja ne predstavlja dovolj dobrega nadomestka za račun požarne odpornosti križno lepljenega lesa.

#### 5.8.4 Temperaturni profil in debelina segretega sloja

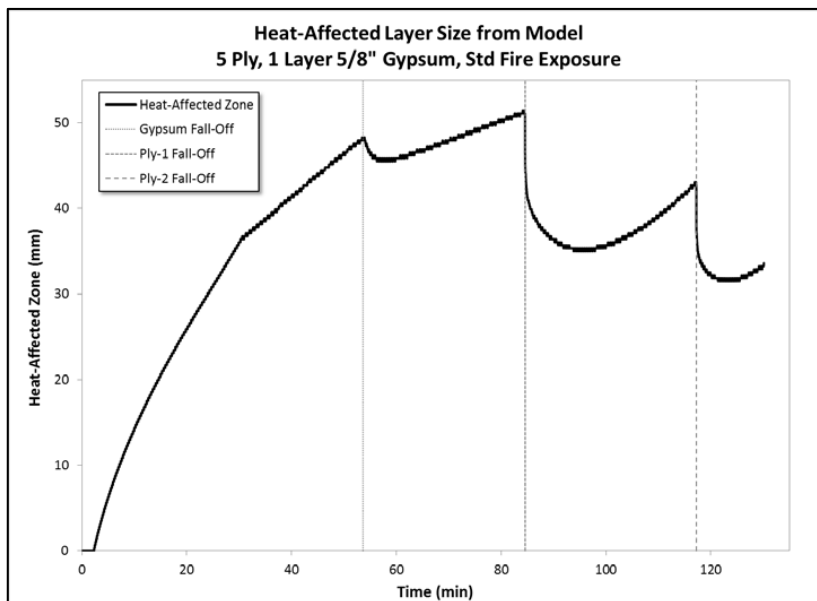
Večkrat je že bilo omenjeno, da se za slojem oglja pojavi segreti sloj, katerega nosilnost je še vedno večja od nič in ki ima temperaturo višjo od 200 °C, vendar je temperatura še vedno manjša od temperature oglečenja 300 °C. Ob dodatnem segrevanju oglje napreduje in segreti sloj se segreje nad 300 °C in s tem zogleni. Pri numeričnem modeliranju, pa ne moremo upoštevati, da ima del prereza, katerega temperatura še ni dosegla 300 °C, enake karakteristike kot tisti pri sobni temperaturi. Pri modeliranju se kot segreti sloj upošteva sloj, ki ima temperaturo višjo od 200 °C, a še vedno manjšo od 300 °C. Del s temperaturo nižjo od 200 °C se upošteva kot polno nosilen brez redukcije [86]. V spodnji preglednici (Preglednica 14) so zbrani rezultati numeričnega modela in eksperimenta, kjer se lahko vidi tudi primerjavo med obema vrednostma. Navedeni so število slojev, količina in debelina zaščitne z mavčnimi ploščami in povprečna globina segrete cone.

Preglednica 14: Povzetek povprečnih debelin segretega sloja iz numeričnega modela (Aguanno, 2013, str. 141) [65]

Table 14: Summary of average heat-affected layer from numerical model (Aguanno, 2013, p. 141) [65]

Število slojev	Mavčne plošče	Požar	Povprečna globina segrete cone [mm]	
			Eksperiment	Numerični model
3	Nezaščiten	CAN/UCL	46	33
3	1x 16 mm (5/8")	CAN/UCL	45	36
3	2x 13 mm (1/2")	CAN/UCL	50	47
3	2x 13 mm (1/2")	Nestandarden	66	54
5	Nezaščiten	CAN/UCL	40	40
5	Nezaščiten	Nestandarden	42	51
5	1x 16 mm (5/8")	CAN/UCL	41	40
5	1x 16 mm (5/8")	Nestandarden	49	51

Opazimo lahko, da je predvsem pri troslojnih ploščah model prikazal rezultate na nevarni strani, medtem ko je pri petslojnih elementih rezultate v večini primerov izračunal na varni strani ali približno enako. Za primerjavo rezultatov numeričnega modela in eksperimenta, je na naslednji strani prikazan grafikon (Grafikon 17), kjer se ponovno lahko vidijo skoki krivulje, ki prikazuje globino segrete cone. Bolj zanimivo pa je gibanje globine glede na obnašanje elementa. Do odpovedi zaščitne mavčne plasti se globina segrete cone povečuje hitro, ob njeni odpovedi pa se pojavi manjši padec, nato pa ponovno sledi počasnejše naraščanje vse do delaminacije prvega lesenega sloja. Ob odpovedi prvega lesenega sloja in delaminacije sledi hipen in močan padec globine segretega sloja, ki je posledica hitrega spreminjanja obremenjenega lesa v oglje, segreti sloj zadaj pa vpliv požara zazna nekoliko zakasnjeno. Kljub nadaljnjemu segrevanju se globina segrete cone ne dvigne nazaj na globino ob odpovedi prvega lesenega sloja, saj pred tem odpove drugi leseni sloj.

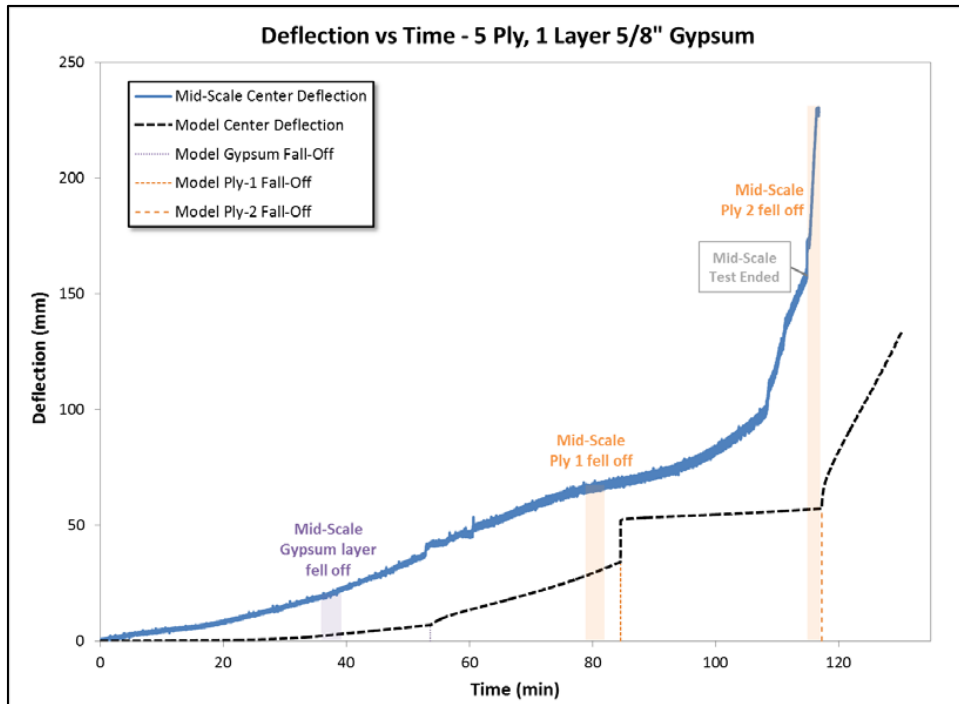


Grafikon 17: Globina segrete cone v numeričnem modelu za petslojni element zaščiten z eno mavčno ploščo pri standardnem požarnem preizkusu (Aguanno, 2013, str. 142) [65]

Graph 17: Heat-affected layer size determined by model in 5-ply panel with 1 layer of gypsum, standard fire test (Aguanno, 2013, p. 142) [65]

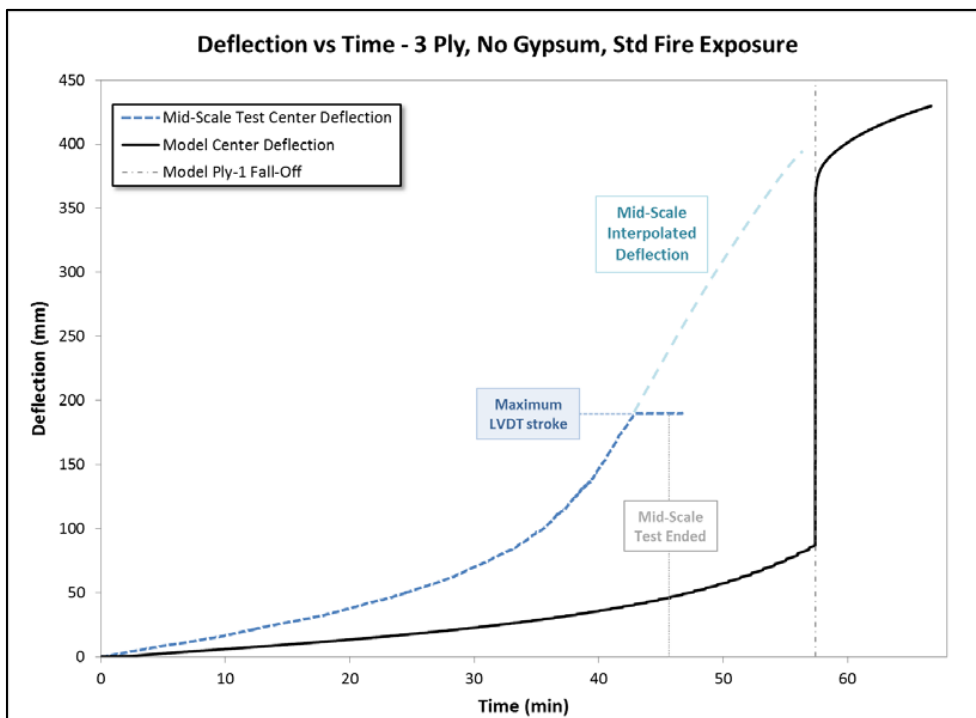
### 5.8.5 Upogib

Pri prostoležečih lesenih elementih je pogosto merodajen povos oziroma pomik na sredini nosilca, ki mu pogosto rečemo tudi upogib, [89]. Različni trdnostni razredi imajo skladno s standardom [89] določeno srednjo vrednost gostote, elastičnega modula in drugih karakteristik, ki se jo upošteva v računu. V resnici je les precej anizotropen material, kar je v numeričnih modelih težko zajeti, zato les pogosto modeliramo kot izotropen material z efektivnimi materialnimi vrednostmi. Pri upogibnem obremenjevanju križno lepljenih elementov lahko med eksperimentom slišimo pokanje, ki pomeni trganje posameznih vlaken. Zaradi neenakomernega prevzema obremenitve se v nekaterih vlaknih pojavi prevelika napetost, ki je niso sposobni prenesti. Vsak pretrg vlakna pa pomeni hipno povečanje povesa, ki sicer ni veliko, vsota vseh pa prinese precejšen del h končnemu povesu. Na grafikonu 18 in 19 je prikazan razvoj eksperimentalnega in numeričnega povesa za 3 ter 5 slojno križno lepljeno ploščo izpostavljeno standardnemu požaru. Pri numeričnih rezultatih lahko opazimo skoke, ki se pojavijo zaradi delaminacije sloja. Opazimo, da so numerično določeni povos manjši od eksperimentalnih (grafikon 18 in 19), kar je najverjetneje posledica neupoštevanja anizotropnega obnašanja lesa [65].



Grafikon 18: Primerjava povesa numeričnega modela in eksperimenta v petslojnem panelu z eno mavčno ploščo (Aguanno, 2013, str. 143) [65]

Graph 18: Comparison between model and experimental deflection in a 5-ply panel with 1 layer of gypsum (Aguanno, 2013, p. 143) [65]

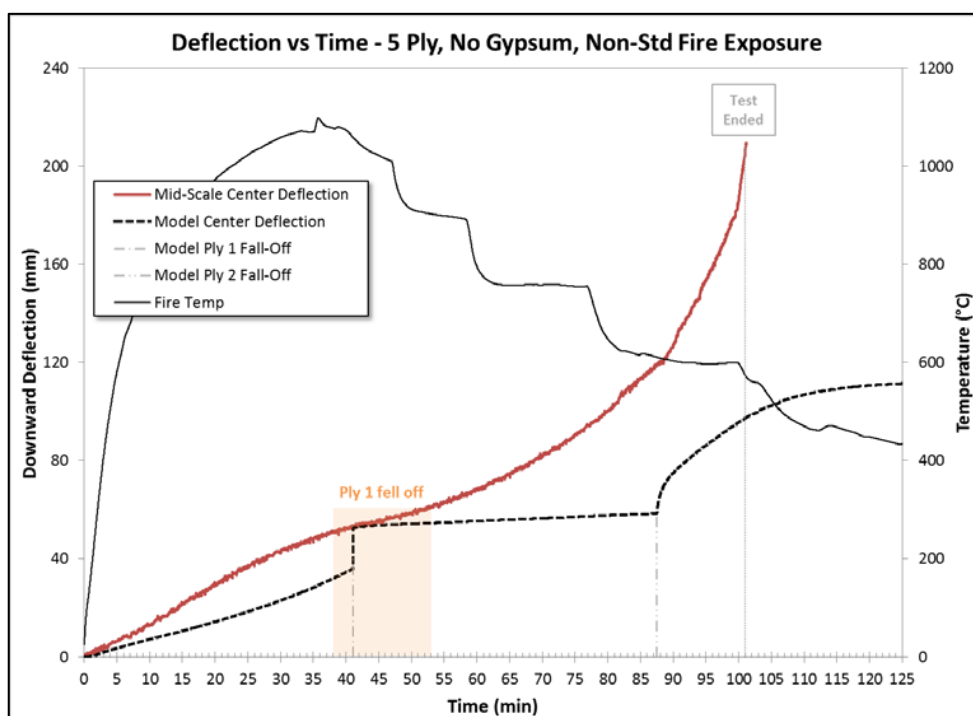


Grafikon 19: Primerjava povesa med numeričnim modelom in eksperimentom v trislojnem panelu (Aguanno, 2013, str. 143) [65]

Graph 19: Comparison between model and experimental deflection in a 3-ply panel (Aguanno, 2013, p. 143) [65]

Na grafikonu za troslojno ploščo (Grafikon 19) se jasno vidi, da je odpoved spodnjega nosilnega sloja kritična za požarno odpornost plošče. Kmalu po odpovedi, ki se zgodi nekje po 57 minutah, sledi odpoved celotne plošče oziroma porušitev. Pri panelu s petimi sloji (Grafikon 18) je odpoved prvega sloja manj kritična. Čeprav krivulja numeričnega modela prikazuje hipno povečanje povesa, rezultati eksperimenta tega ne zaznajo, saj se odpoved sloja ne zgodi hipno v trenutku, ko temperatura lepila doseže temperaturo odpovedi lepila. Popuščanje sloja zaradi oglenjenja se dogaja že prej in zato je dejanski povese toliko večji od rezultata numeričnega modela, ob kritični temperaturi lepila pa ni hipnega zmanjšanja nosilnosti in zato tudi ne hipnega povečanja povesa.

Podoben pojav lahko zasledimo tudi pri analizi za nestandarden požar, katere rezultati so prikazani na spodnjem grafikonu (Grafikon 20). Krivulja numeričnega modela prikazuje hipno povečanje povesa ob odpovedi prvega lesenega sloja, ki se zgodi kmalu po doseženi maksimalni temperaturi v požarni krivulji, to je po 40 minutah. Do tega časa je opazen povečan povese numeričnega modela in eksperimenta ponovno ujame prav v točki po hipnem skoku krivulje numeričnega modela. Torej lahko predvidevamo, da sta dejanska togost panela in modelirana enaki po upoštevanem odpadlem sloju. Potrebni pa bi bilo več analiz tudi z drugimi modeli, da bi to lahko potrdili.



Grafikon 20: Primerjava povesa numeričnega modela in eksperimenta na petoslojnem panelu izpostavljenem nestandardnem požaru (Aguanno, 2013, str. 144) [65]

Graph 20: Comparison between model and experimental deflection in a 5-ply panel exposed to the non-standard fire (Aguanno, 2013, p. 144) [65]

Črna krivulja na zgornjem grafikonu (Grafikon 20) prikazuje potek temperature v odvisnosti od časa, iz katere lahko razberemo, da po 40 minutah nastopi že faza pojemajočega požara. Kljub ohlajevanju pa opazimo nadaljnje povečanje povesa. Razlog je v tem, da notranjost lesenega elementa še vedno ohranja

visoko temperaturo in oglenenje napreduje, saj les še naprej tli. Tega numerični model ne zajema, zato krivulja po odpovedi drugega (nenosilnega) sloja sicer poskoči, a ne tako drastično, kot kažejo rezultati eksperimenta. V tem primeru se krivulji numeričnega modela in eksperimentalnih rezultatov ne ujemata tudi po skoku krivulje numeričnega modela, ki se zgodi po odpovedi drugega sloja. Za upoštevanje nadaljnjega tlenja v jedru lesa, numerični model nebi smel temeljiti zgolj na temperaturi na površini, ki jo diktira požarna krivulja. Pri eksperimentih na standardno požarno krivuljo tega fenomena numerični model ne potrebuje, saj se temperatura ves čas dviguje. Ob naravni požarni krivulji pa smo priča upadu temperature po končani fazi polno razvitega požara, za kar bi bilo potrebno nadgraditi numerični model [65].

#### 5.8.6 Požarna odpornost

Požarna odpornost konstrukcije je določena s kriterijem nosilnosti R, ki ga običajno izrazimo v časovni enoti. Ta nam pove čas, po katerem se ob nanosu obtežbe pojavi porušitev. Z eksperimenti in raziskavami želimo čim bolj natančno opisati dogajanje v elementu med požarom in preveriti verodostojnost rezultatov, z namenom pridobiti zadovoljivo natančne metode za račun. Cilj je pridobiti rezultate eksperimenta in jih primerjati z rezultati numeričnega modela ter nato preveriti ujemanje [65]. Izvedeni so bili preizkusi na modelu v naravnem in zmanjšanem merilu, rezultati pa primerjani z rezultati numeričnega modela (Preglednica 15).

Preglednica 15: Primerjava med požarno odpornostjo numeričnega modela in eksperimenta (Aguanno, 2013, str. 145) [65]

Table 15: Comparison between numerical model and experimental fire resistance (Aguanno, 2013, p. 145) [65]

Število slojev	Mavčna plošče	Požar	Požarna odpornost [min]		
			Numerični model	Pomanjšano merilo	Polna velikost
3	/	CAN/ULC	67	46	/
3	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	96	74	86
3	2x 13 mm (1/2 inch)	CAN/ULC	116	92	77*
3	2x 13 mm (1/2 inch)	Nestandarden	83 <sup>x</sup>	93	/
5	/	CAN/ULC	104	99	96
5	/	Nestandarden	111 <sup>x</sup>	101	/
5	1x 16 mm (5/8 inch)	CAN/ULC	130	115	124
5	1x 16 mm (5/8 inch)	Nestandarden	98 <sup>x</sup>	122	/

\* = Preizkus je končan pred porušitvijo zaradi varnostnih razlogov

<sup>x</sup> = Preizkus je bil končan, ker se je globina oglenjenja prenehala povečevati

Iz zgornje preglednice (Preglednica 15) lahko razberemo, da so rezultati preizkusa in numeričnega modela precej podobni. Pri vseh troslojnih panelih, obremenjenih s požarom po standardni požarni krivulji CAN/ULC-S101 [86], je porušitev nastopila približno 10 minut po odpovedi (delaminaciji) prvega lesenega sloja. Tega podatka ni mogoče primerjati, saj je bil preizkus prekinjen ravno pred odpovedjo prvega lesenega sloja [65]. Napovedi numeričnega modela o času odpovedi prvega lesenega sloja se odlično ujemajo z eksperimentalnimi rezultati. Kot je prikazano v prejšnjem poglavju 5.8.5 na



Grafikon 19, je porušitev troslojnega panela pogojena z odpovedjo prvega sloja, saj sta ta dva dogodka skoraj istočasna. Odpoved prvega sloja pomeni praktično porušitev za troslojni panel. Ta hipoteza se je potrdila tudi v eksperimentih, saj je do porušitve prišlo približno 10 minut kasneje po odpovedi prvega sloja. Rezultati eksperimenta v polnem merilu kažejo tudi na problematiko zagotavljanja kriterija celovitosti (E), ki je v določenih primerih postal bolj merodajen od kriterija nosilnosti (R) [65].

Pri petslojnih panelih so napovedani rezultati numeričnega modela napovedovali porušitev približno 14 minut po odpovedi drugega lesenega sloja. Eksperimenti so bili sicer zaključeni pred porušitvijo, ob hipnem močnem povečanju pomikov, katerim bi evidentno sledila porušitev. Časi prekinitev zaradi hipnega močnega povečanja pomikov so bili za nekaj minut krajši od napovedanih v numeričnem modelu, kar kaže na dobro ujemanje rezultatov eksperimenta in numeričnega modela. Tudi pri petslojnih panelih pa se pojavi težava z izpolnjevanje zahteve celovitosti (E), pred kriterijem nosilnosti (R) [65].

Pri eksperimentih s požarom po nestandardni požarni krivulji se tako v numeričnem kot eksperimentalnem modelu polne velikosti kriterij nosilnosti izkaže kot nekritičen. Zaradi padanja temperature po požarni krivulji se oglenenje in povesi v numeričnem modelu ustavijo pri določeni vrednosti. Dejansko pa se pri zaščitenem petslojnim panelu oglenenje ustavi šele 20 minut kasneje, kot je to napovedal numerični model, pri nezaščitenem pa se je ustavilo že 10 minut prej (Preglednica 15).

Pri eksperimentih z nestandardnim požarom je bil preizkus pri troslojnih ploščah prekinjen preden je odpovedal prvi leseni sloj in pri petslojnih panelih preden je odpovedal drugi sloj. Preizkus je bil ustavljen ob nenadnem močnem povečanju povosov, katerim bi sledila porušitev v bližnji prihodnosti. Porušitev bi kljub zmanjševanju temperature glede na nestandardno požarno krivuljo sledila zaradi nadaljevanja oglečenja znotraj prereza, ki bi s tlenjem še naprej oglečel. Zaradi varnostnih razlogov in možnosti uničenja določenih instrumentov, se je preizkus prekinil pred porušitvijo. Kljub temu lahko na podlagi pomikov ocenimo predviden čas odpovedi [65].

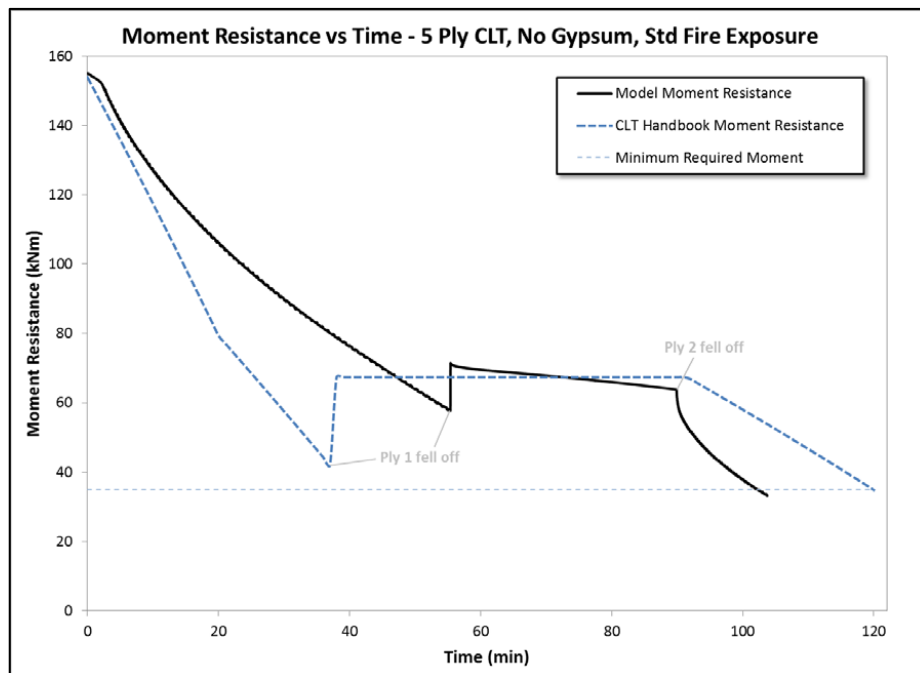
Glede na primerjavo rezultatov numeričnega modela in eksperimentov lahko ugotovimo dokaj dobro ujemanje za obremenitev v skladu s standardno požarno krivuljo. Pri obremenjevanju v skladu z nestandardno požarno krivuljo so rezultati nekoliko slabši. Razlog se najverjetneje skriva v predpostavkah o prenosu toplote in določevanju karakteristik v odvisnosti od temperature, ki temeljijo na standardnih požarnih preizkusih. Pri preizkusih z upoštevanjem nestandardnih požarnih krivulj se pojavijo padci temperature oziroma ohlajanje, medtem ko les v notranjosti še vedno tli in ogleni. Numerični modeli zaenkrat tega še ne vključuje, ampak ob padanju temperature še naprej upošteva situacijo v času najvišje temperature. V primeru padanja temperature model napredovanja oglečenja ne upošteva, čeprav te bistveno zmanjšajo prečni prerez z napredovanjem izoterme 300 °C in posledično upogibno togost. Za natančnejše obravnavanje in numerično modeliranje dogajanja v fazi pojemajočega požara bi bile potrebne še dodatne raziskave na tem področju [65].

### 5.8.7 Določitev požarne odpornosti po priročniku CLT Handbook

Svetovno najbolj priznana knjiga o načrtovanju križno lepljenega lesa je priročnik CLT Handbook, ki med drugim v poglavju 8 vsebuje tudi poenostavljen postopek za načrtovanje križno lepljenega lesa v primeru požarne obtežbe [34]. Postopek je opisan za primer obtežbe s požarom skladno s standardno požarno krivuljo in je bil opisan tudi v poglavju 5.5.1. Za nestandardne požare postopka ni navedenega. Metoda temelji na metodi efektivnega prečnega prereza po EN 1995-1-2 [37]. Namesto računa temperatur po prerezu z metodo enodimenzionalnega prenosa toplote se za določitev globine oglenenja in hitrosti oglenenja upošteva konstantno hitrost oglenenja 0,65 mm/min skladno z EN 1995-1-2 [37].

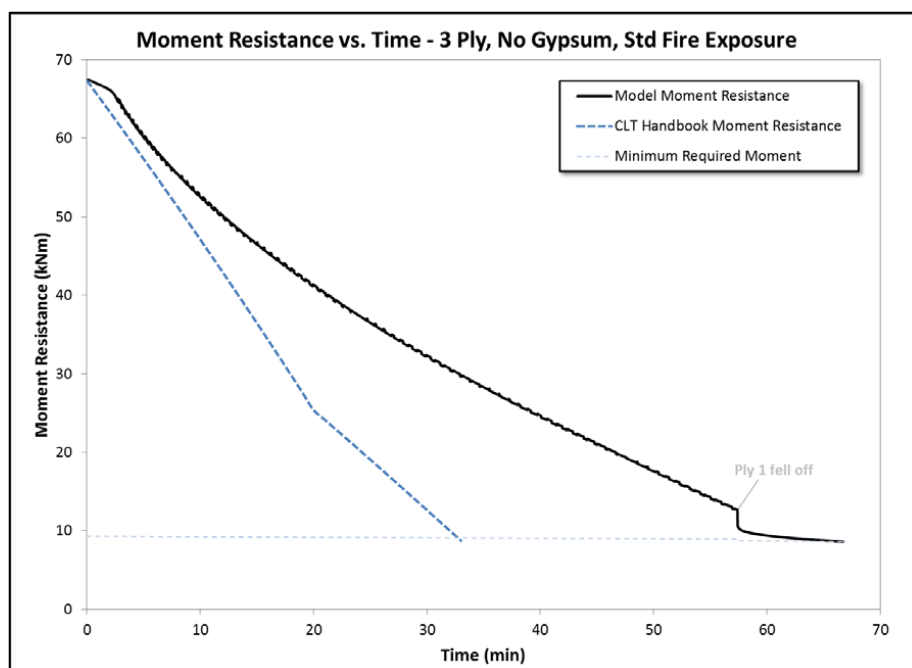
Za primerjavo z rezultati numeričnega modela in eksperimentov je v nadaljevanju določena upogibna nosilnost troslojnega in petslojnega panela brez zaščite z mavčno ploščo. Primerjava je prikazana na spodnjih grafikonih ločeno za petslojno (Grafikon 21) in troslojno ploščo (Grafikon 22). Prikazana je upogibna nosilnost  $M_R$  v odvisnosti od časa. Glede na eksperimente [65] je določena tudi minimalna upogibna nosilnost, ki določa mejo porušitve. Za namen te naloge ni posebej pomembna dejanska vrednost, ampak prikaz odvisnosti med metodami.

Pri petslojnem panelu, katerega togost je prikazana na Grafikon 21, je opazen nenaden skok togosti ob odpovedi prvega lesenega sloja. Dejstvo je, da ob odpovedi petega sloja obremenitev prevzame tretji sloj, ki je usmerjen enako kot peti, saj lahko upoštevamo, da prečni sloji ne prevzemajo upogibne obremenitve. Zaradi odpovedi petega sloja se bistveno skrajša razdalja od nevtralne osi do najbolj oddaljene točke še ne zoglenega lesa upogibno obremenjenega sloja, torej neobremenjene strani, ki se v tem primeru iz petega prestavi v tretji sloj. Posledica je višji efektivni modul prečnega prereza, ki je določen po enačbi (Enačba 5.5) v poglavju 5.5.1 in posledično večjo upogibno odpornost po enačbi 5.4. V resnici odpoved sloja ni hipna in se tudi hipni dvig upogibne nosilnosti ne bi pojavil. Ob obremenjevanju petega sloja bi tudi tretji sloj prevzel določen del obtežbe. V realnosti tudi odpoved petega sloja ni hipna, temveč postopna, kar pomeni postopno povečanje obremenitve na tretjem sloju. Razdalja od nevtralne osi do neobremenjenega sloja pa se spreminja zvezno in počasneje. Opisani postopek pa je izredno težko upoštevati v numeričnem modelu. Potrebovali bi programsko opremo, ki deluje na osnovi metode končnih elementov, hkrati pa bi čas računa izredno podaljšali, celoten model pa zapletli. Vseeno sta spodaj prikazana grafikona za primerjavo med upogibno odpornostjo, ki je določena z numeričnim modelom skladno s priročnikom CLT Handbook [34] za petslojno (Grafikon 21) in troslojno ploščo (Grafikon 22).



Grafikon 21: Primerjava upogibne nosilnosti po numeričnem modelu in priručniku CLT Handbook za petstojni panel brez mavčne zaščite izpostavljen standardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 149) [65]

Graph 21: Comparison between model and CLT Handbook prediction for structural failure of a 5-ply panel without gypsum exposed to the standard fire (Aguanno, 2013, p. 149) [65]



Grafikon 22: Primerjava upogibne nosilnosti po numeričnem modelu in priručniku CLT Handbook za troslojni panel brez mavčne zaščite izpostavljen standardnemu požaru (Aguanno, 2013, str. 150) [65]

Graph 22: Comparison between model and CLT Handbook prediction for structural failure of a 3-ply panel without gypsum exposed to the standard fire (Aguanno, 2013, p. 150) [65]

Iz zgornjih grafikonov je jasno razvidno, da postopka dveh različnih metod ne vrmeta enakih rezultatov.

Še posebej je očitno odstopanje pri troslojnem panelu, kjer račun skladno s priručnikom CLT Handbook

podaja hitrost oglenjenja 0,65 mm/min. Minimalna upogibna odpornost dosežena že po 33 minutah, medtem ko je z numeričnim modelom tako nizka upogibna odpornost dosežena šele po 67 minutah.

Pomembno je poudariti, da numerični model upošteva delaminacijo, priročnik CLT Handbook pa delaminacije ne upošteva, temveč se predpostavi zvezen prehod oglja iz enega v drugi sloj, pri tem pa se upošteva še dodaten sloj nične nosilnosti v debelini 10,5 mm [34]. Na grafikonu za petslojni panel (Grafikon 21) se opazi odpoved prvega sloja petslojne plošče pred delaminacijo prvega sloja po numeričnem modelu. Vendar je globina oglenjenja skupaj z dodanim slojem nične nosilnosti že preko spodnje linije drugega sloja, torej več kot je potrebno za delaminacijo drugega sloja po kriteriju numeričnega modela. Hitrost oglenjenja po priročniku CLT Handbook je v začetni fazi občutno višja kot hitrost, ki se razvije v numeričnem modelu, vendar se v drugem delu, ko temperatura naraste, hitrost oglenjenja v numeričnem modelu poviša preko konstantne vrednosti 0,65 mm/min po priročniku CLT Handbook [34][65]. Posledično se petslojni panel z metodo po priročniku poruši kasneje, kot to podaja numerični model (Grafikon 21), pri troslojnem panelu pa porušitev po numeričnem modelu nastopi bistveno hitreje kot po metodi iz priročnika CLT Handbook (Grafikon 22).

Kot omenjeno priročnik CLT Handbook ne vsebuje vpliva delaminacije lesenih slojev [34]. Za upoštevanje delaminacije priporoča, da se le ta lahko upošteva s sledečim kriterijem. Kadar se debelina med lepilom in mejo oglenjenja stanjša na 12 mm, se upošteva delaminacija [65]. Pogoj izvira iz omejene temperature 150 °C na meji sloja, skladno z enačbo (Enačba 5.9), ki je bila definirana v [34].

$$T = T_i + (T_p - T_i) \left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 \quad (5.9)$$

kjer je:

$T$  – temperatura [°C]

$T_i$  – začetna temperatura [°C]

$T_p$  – temperatura oglja [°C]

$x$  – razdalja do meje oglenjenja [mm]

$a$  – globina toplotnega vpliva [mm] (34 mm za smreko)

Če velja, da temperatura 150 °C ustreza debelini oglja 12 mm, lahko z linearno interpolacijo ugotovimo, da debelini 7 mm ustreza temperatura 210 °C. Za lažjo primerjavo rezultatov numeričnega modela in eksperimenta lahko vzamemo debelino oglja 7 mm, kar ustreza temperaturi 210 °C. Debelina dodanega sloja nične nosilnosti je že večja od 7 mm, saj je ta debela 10,5 mm. Torej bi bili rezultati, ki jih vrača metoda po priročniku CLT Handbook z uporabo kriterija delaminacije z debelino 7 mm, identični kot tisti prikazani na Grafikon 21 in Grafikon 22.

Pri zaščiti križno lepljenih plošč ima priročnik CLT Handbook precej enostavno metodo [34]. V primeru dodane mavčne plošče debeline 5/8 inch ali 15,9 mm, se odpornost podaljša za 30 min. Za dodani dve mavčni plošči debeline 1/2 inch ali 12,7 mm se odpornost podaljša za 60 minut. Omogoča tudi, da namesto tega uporabimo metodo po EN 1995-1-2 na strani 23 [34][37], ki v primeru uporabe mavčne plošče predpisuje upoštevanje časovnega zamika začetka oglenjenja  $t_{ch}$ .

Glede na primerjave v prejšnjih poglavjih lahko zaključimo, da metoda po priročniku CLT Handbook vrača primerljive rezultate za petslojne križno lepljene elemente, medtem ko pri troslojnih elementih rezultati bistveno odstopajo. Torej lahko predvidevamo, da je metoda uporabna za pet- ali večslojne elemente. Izpopolnitve bi bile dobrodošli tudi pri hitrosti oglenenja, saj rezultati kažejo, da je ocena v začetni fazi previsoka, v kasnejši pa prenizka, za tri- in petslojne elemente. Rezultati eksperimentov se nanašajo na rezultate objavljene v [65], kjer je bil očitno razvit model za napovedovanje obnašanja različnih vrst križno lepljenih elementov in lepil pri požarni obtežbi.

## 6 RAČUNSKI PRIMER

### 6.1 PRIMERJAVA RAČUNSKIH METOD NA PRIMERU OBJEKTA BRDO F3 – OPIS PROBLEMA

Primerjava računskih metod predstavljenih v poglavju 2 in 3 je izvedena na primeru objekta Brdo F3, katerega investitor je Stanovanjski Sklad Republike Slovenije (SSRS), zgradilo pa ga je podjetje Strabag d.o.o. Objekt se nahaja na Brdu na zahodnem delu Ljubljane v naselju Zeleni Gaj in predstavlja vzorčni objekt celotnega naselja. Zasnova objekta je pravokotnik, ki v dolžino meri nekaj manj kot 80 m, v širino slabih 15 m, višina objekta pa je skoraj 16 m. Objekt ima vkopano garažo iz armiranega betona, pritličje in prvo nadstropje iz armiranobetonske branaste konstrukcije, drugo nadstropje in terasna (najvišja) etaža pa sta izvedeni iz križno lepljenih lesenih plošč in lesenih okvirnih sten. Objekt je razdeljen na štiri dele, imenovane lamela A, B, C in D, ki si sledijo kot našete od juga proti severu [90]. Za potrebe te magistrske naloge je uporabljena geometrija enega izmed stanovanj v tretji, najvišji etaži (dvoetažno stanovanje), katerega nosilna konstrukcija je v celoti izvedena iz križno lepljenih plošč. Stanovanje se nahaja v lameli B in je označeno kot B10. V nalogi obravnavamo le prostor T.B10.11 – soba, ki se nahaja v terasni etaži in je orientirano na vzhod s površino 16,15 m<sup>2</sup> (Slika 29).

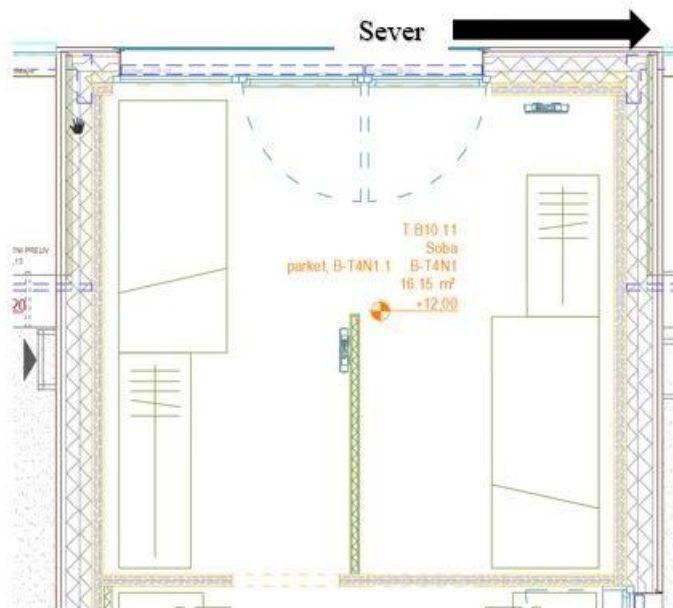


Slika 29: Pozicija stanovanja B10 v celotnem objektu F3 [90]

Figure 29: Position of apartment B10 in F3 building [90]

Prostor ima na vzhodni strani okno s površino  $b/h = 300/240$  cm, na zahodni strani pa vrata v velikosti  $b/h = 90/200$  cm. Steni na severno in južno stran prostora sta polni križno lepljeni lošči. Vse stene so izvedene kot troslojne tipa KLH DQ 3s debeline 94 mm. Višina prostora od nosilne talne plošče do nosilne stropne plošče je 280 cm. Talna in stropna/strešna plošča sta izvedeni kot petslojni tipa KLH DQ 5s debeline 174,6 mm. Prostor je predviden kot otroška soba z dvema posteljama in dvema omarama za oblačila, kar lahko upoštevamo kot pretežno celulozni tip požare obtežbe. Med severnim in južnim delom sobe se nahaja pregradna stena izvedena po suho-montažnem sistemu z mavčno oblogo, zato se ne prišteva v požarno obremenitev.

Stropna plošča je istočasno tudi strešna plošča, ki je obremenjena s stalno obtežbo strehe in koristno obtežbo strehe. V plošči ni odprtin za dostop do strehe ali kakršen koli drug namen.



Slika 30: Tloris stanovanja B10 [90]

Figure 30: Footprint of apartment B10 [90]

### 6.1.1 Podatki

Osnovni podatki o geometriji požarnega sektorja so podani spodaj (Preglednica 16). Pri računu parametrične študije so bili upoštevani spremenjeni vhodni podatki, kar pa je posebej opisano v nadaljevanju.

Preglednica 16: Osnovni geometrijski podatki požarnega sektorja

Table 16: Basic geometrical characteristics of fire sector

<b>Okno</b>	b [m]	3
	h [m]	2,4
<b>Vrata</b>	b [m]	0
	h [m]	0
<b>Tloris</b>	b [m]	4,27
	l [m]	4
	h [m]	2,8

Za primerjavo rezultatov računskih metod je pri računu požarne odpornosti križno lepljenih elementov obravnavana stropna plošča tipa KLH DL 5s debelina 174,6 mm, za katero so materialni podatki prikazani v spodnjih preglednicah (Preglednica 17 in Preglednica 18).

Preglednica 17: Karakteristične trdnosti plošče glede na smer obremenitve in trajanje obtežbe [37]

Table 17: Characteristic load-bearing strengths of slab for different load directions and load durations [37]

Trdnosti [kN/cm <sup>2</sup> ]:			upogib	nateg	nateg ⊥	tlak	tlak ⊥	strig
Karakteristična trdnost [N/cm <sup>2</sup> ]			2300	1650	12	2400	270	270
Računska trdnost glede na trajanje obtežbe [kN/cm <sup>2</sup> ]	P (nad 10 let)	$k_{mod} = 0,6$	1104	792	6	1152	130	130
	L (od 6 mes. do 10 let)	$k_{mod} = 0,7$	1288	924	7	1344	151	151
	M (od 1 tedna do 6 mes.)	$k_{mod} = 0,8$	1472	1056	8	1536	173	173
	S (manj kot 1 teden)	$k_{mod} = 0,9$	1652	1188	9	1728	194	194

Preglednica 18: Togost plošče v različnih smereh [37]

Table 18: Slab stiffness for different directions [37]

Togosti (modul) [N/cm <sup>2</sup> ]:		
elast. m. paral.	$E_{0,g,mean}$	1200
elast. m. paral.	$E_{0,05,g}$	
elast. m. prav.	$E_{90,g,mean}$	37
strižni modul	$G_{g,mean}$	69 (25)

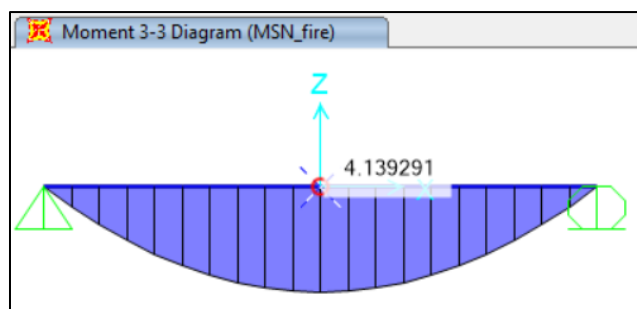
Za račun obremenitve pri požarnem projektne stanju, ki spada med nezgodno kombinacijo upoštevamo:

stalna obtežba v velikosti:  $g_{st} = 0,85 \text{ kN/m}^2$

in prevladujoča koristna obtežba v velikosti:  $q = 3,0 \text{ kN/m}^2$  [90].

Površinska obtežba križno lepljene plošče pri nezgodni požarni kombinaciji tako znaša:

$$MSN\text{-fire: } Q_d = 1,00 g_{st} + 0,3 q = 0,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,3 * 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



Slika 31: Upogibni momenti v plošči zaradi kombinacije MSN-fire

Figure 31: Bending moments in combination MSN-fire

Plošča je nosilna samo v eni smeri in jo zato lahko modeliramo kot 1 m širok nosilec. Geometrijske karakteristike analizirane plošče so podane v Preglednica 18. Dolžina razpona je 4,35 m, upogibni moment pri požarni kombinaciji pa znaša:

$$M_{Ed,MSN\text{-fire}} = \frac{(1,00 * 0,85 + 0,3 * 3) * 4,35^2}{8} = 4,14 \text{ kNm} \quad (6.1)$$



Nosilnost plošče KLH 5s 145 (Preglednica 19) pri sobni temperaturi za MSN (Enačba 6.2) brez upoštevanja efekta »rolling shear« določena z enačbami (6.2) do (6.9). Kot to lahko vidimo je kriteriju nosilnosti zadoščeno (enačba 6.9).

$$M_{Ed,MSN} = \frac{(1,35 * 0,85 + 1,5 * 3) * 4,35^2}{8} = 13,36 \text{ kNm} \quad (6.2)$$

Preglednica 19: Geometrijske karakteristike plošče

Table 19: Geometry characteristics of CLT slab

<i>KLH 5s TL 174,6 mm</i>	$t_i$ [mm]	$t_i$ [inch]
$h_1$	35	1,375
$h_2$	35	1,375
$h_3$	35	1,375
$h_4$	35	1,375
$h_5$	35	1,375
<b>Skupaj</b>	174,6	6,875

$$A = b * h_{tot} = 100 \text{ cm} * (3,4925 * 5) \text{ cm} = 1746,25 \text{ cm}^2 \quad (6.3)$$

$$A_{v,x} = b * \sum h_x = 100 \text{ cm} * (3,4925 * 3) \text{ cm} = 1047,75 \text{ cm}^2 \quad (6.4)$$

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3} \quad (6.5)$$

$$= 1 - \left(1 - \frac{37}{1200}\right) \frac{(2 * 3,49 + 3,49 \text{ cm})^3 - 3,49^3}{(3 * 3,49 + 2 * 3,49)^3} = 0,798$$

$$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3} \quad (6.6)$$

$$= \frac{37}{1200} - \left(1 - \frac{37}{1200}\right) \frac{(2 * 3,49 + 3,49 \text{ cm})^3 - 3,49^3}{(3 * 3,49 + 3,49)^3} = 0,232$$

$$W_{eff} = \frac{bh^2}{6} k_1 = \frac{100 * 17,5^2}{6} 0,798 = 4058 \text{ cm}^3 \quad (6.7)$$

$$I_{eff} = \frac{bh^3}{12} k_1 = \frac{100 * 17,5^3}{12} 0,798 = 35430 \text{ cm}^3 \quad (6.8)$$

$$\sigma_{m,0,d} = \frac{M_{Ed}}{W_{eff}} \leq f_{m,eff,0,d} = k_{mod} \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_M} \rightarrow \quad (6.9)$$

$$\frac{1336 \text{ kNcm}}{4058 \text{ cm}^3} \leq 0,8 \frac{2,3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,25} \rightarrow 0,329 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 1,472 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

V enačbah do 6.3 do 6.9 je pomen oznak naslednji:

$b$  – računška širina plošče (=100 cm) [cm],

$h_{tot}$  – debelina celotne plošče [cm],

$A$  – površina računskega prereza [cm<sup>2</sup>],

$A_{v,x}$  – površina računskega prereza, ki se ga upošteva pri prevzemu strižnih sil v smeri nosilnosti plošče [cm<sup>2</sup>],

$E_{90}$  – elastični modul v smeri pravokotno na vlakna [kN/cm<sup>2</sup>],

$E_0$  – elastični modul v smeri vlaken [kN/cm<sup>2</sup>],

$k_I$  – sestavni koeficient za upogibno obremenitev vzporedno z vlakni [-],

$k_2$  – sestavni koeficient za upogibno obremenitev pravokotno na vlakna [-],

$W_{eff}$  – efektivni odpornostni moment [ $\text{cm}^3$ ],

$I_{eff}$  – efektivni vztrajnostni moment [ $\text{cm}^4$ ],

$f_{m,0,k}$  – karakteristična upogibna trdnost vzporedno z vlakni [ $\text{kN/cm}^2$ ],

$\sigma_{m,0,d}$  – projektna upogibna napetost vzporedno z vlakni [ $\text{kN/cm}^2$ ].

## 6.2 RAČUN POŽARNE ODPORNOSTI KRIŽNO LEPLJENE PLOŠČE PO EN 1995-1-2

### 6.2.1 Splošno

Projektna vrednost trdnostnih in togostnih karakteristik je določena kot:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.10)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.11)$$

kjer je:

$f_{d,fi}$  – projektna trdnost v požaru,

$S_{d,fi}$  – projektna togost v požaru,

$k_{mod,fi}$  – faktor upoštevanja trajanja obtežbe in vlage,

$\gamma_{M,fi}$  – delni varnostni faktor za les v požaru ( $\gamma_{M,sobna} = 1,25$  za križno lepljen les),

$f_{20}$  – 20 % fraktila trdnosti pri sobni temperaturi,

$S_{20}$  – 20 % fraktila togosti pri sobni temperaturi.

Projektna vrednost požarne odpornosti (nosilnosti) je določena kot:

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.12)$$

kjer je:

$R_{d,fi}$  – projektna vrednost nosilnosti v požarnem scenariju,

$\eta$  – pretvorbni faktor zaradi zmanjšanja odpornosti pri požarnem scenariju,

$R_{20}$  – 20 % fraktila nosilnosti pri sobni temperaturi brez upoštevanja trajanja obtežbe in vlage ( $k_{mod} = 1$ ).

Vrednost 20 % fraktil se določi po spodnjih enačbah.

$$f_{20} = k_{fi} f_k \quad (6.13)$$

$$S_{20} = k_{fi} S_{05} \quad (6.14)$$

$$R_{20} = k_{fi} R_k \quad (6.15)$$

V enačbah 6.13 do 6.15 je pomen oznak naslednji:

$f_k$  – karakteristična trdnost pri sobni temperaturi,

$R_k$  – karakteristična mehanska odpornost pri normalni temperaturi brez upoštevanja vpliva trajanja obtežbe in vlage ( $k_{mod} = 1$ ),

$k_{fi}$  – faktor v odvisnosti od vrste lesene konstrukcije podan spodaj (Preglednica 20),

$S_{05}$  – 5 % fraktila togosti (elastičnega ali strižnega modula) pri sobni temperaturi.

Preglednica 20: Vrednosti faktorja  $k_{fi}$  [91]Table 20: Factor  $k_{fi}$  [91]

	$k_{fi}$
<b>Masiven les</b>	1,25
<b>Lameliran lepljen les</b>	1,15
<b>Leseni paneli</b>	1,15
<b>Lepljeni furnirji</b>	1,1

### 6.2.2 Določitev projektne vrednosti gostote požarne obtežbe

Karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe je bila določena v študiji požarne varnosti objekta Brdo F3 [90]. Standardna obremenitev za stanovanja je med  $300 \text{ MJ/m}^2$  in  $400 \text{ MJ/m}^2$ . V obravnavanem primeru je vrednost znašala  $400 \text{ MJ/m}^2$ . Projektna vrednost gostote je nato skladno s standardom EN 1991-1-2 [6] določena glede na različne faktorje nevarnosti nastanka požara (Enačba 6.16) in upoštevanje morebitnih aktivnih ukrepov požarne varnosti:

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q,1} * \delta_{q,2} * \delta_n = 400 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} * 0,8 * 1,199 * 0,834 * 0,87 = 278 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad (6.16)$$

kjer je:

$q_{f,d}$  – projektna vrednost gostote požarne obtežbe [ $\text{MJ/m}^2$ ],

$q_{f,k}$  – karakteristična vrednost gostote požarne obtežbe [ $\text{MJ/m}^2$ ],

$m$  – zgorevalni faktor (= 0,8 za pretežno celulozne materiale),

$\delta_{q,1}$  – faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na velikost sektorja (Enačba 6.17),

$\delta_{q,2}$  – faktor, ki upošteva nevarnost nastanka požara glede na rabo (naselitev) (Enačba 6.18),

$\delta_n$  – faktor, ki upošteva uporabo različnih aktivnih ukrepov gašenja (Enačba 6.19).

$$\delta_{q,1} = 1,1 + \frac{A_t - 25}{250 - 25} * (1,5 - 1,1) = 1,199 \quad (6.17)$$

kjer je:

$A_t$  – površina tal požarnega sektorja [ $\text{m}^2$ ] (Preglednica 16)

$$\delta_{q,2} = 0,78 + \frac{A_t - 25}{250 - 25} * (1,0 - 0,78) = 0,834 \quad (6.18)$$

$$\delta_n = \sum_{i=1}^{10} \delta_{n,i} = 1 * 1 * 0,87 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 = 0,87 \quad (6.19)$$

### 6.2.3 Račun standardne požarne odpornosti križno lepljene plošče

Za račun požarne odpornosti pri standardnem požaru skladno z EN 1995-1-2 so bili uporabljeni podatki, prikazani v spodnji preglednici (Preglednica 21). Časovni potek požarne odpornosti križno lepljene plošče je prikazan v preglednici na naslednji strani (Preglednica 22), kjer je razvidna zadostna nosilnost vse do časa 153 minut.

Preglednica 21: Podatki za račun odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 – standardni požar

Table 21: Data for calculation of CLT slab fire resistance according to EN 1995-1-2 – standard fire

EN 1995-1-2 Standard - podatki		
$E_0$	1,2	kN/cm <sup>2</sup>
$E_{90}$	0,037	kN/cm <sup>2</sup>
$G_{mean}$	0,078	kN/cm <sup>2</sup>
$\rho$	410	kN/cm <sup>3</sup>
$b$	100	cm
$\beta_0$	0,076	cm/min
$f_{m,eff}$	2,3	kN/cm <sup>2</sup>

Preglednica 22: Izračun standardne požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2

Table 22: Standard fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2

t	t	$\beta_0$	$d_{char,0}$	$d_{ef}$	$h_{preostali}$	$k_1$	$W_{eff}$	$M_{Ed}$	$M_{Rd}$	Kontrola
[min]	[h]	[cm/min]	[cm]	[cm]	[cm]		[cm <sup>3</sup> ]	[kNm]	[kNm]	
0	0	0,076	0	0,000	17,45	0,798	4052	14,00	93,20	OK
10	0,17	0,076	0,76	0,766	16,68	0,769	3569	13,75	82,09	OK
20	0,33	0,076	1,52	2,220	15,23	0,697	2694	13,27	61,95	OK
30	0,5	0,076	2,28	2,980	14,47	0,646	2256	13,02	51,89	OK
37	0,62	0,076	2,812	3,512	13,938	0,964	3122	12,85	71,80	OK
40	0,67	0,076	3,04	3,740	13,71	0,964	3020	12,77	69,47	OK
50	0,83	0,076	3,8	4,500	12,95	0,964	2695	12,52	61,98	OK
60	1	0,076	4,56	5,260	12,19	0,964	2388	12,27	54,92	OK
70	1,17	0,076	5,32	6,020	11,43	0,964	2099	12,03	48,28	OK
80	1,33	0,076	6,08	6,780	10,67	0,964	1829	11,78	42,08	OK
83	1,38	0,076	6,308	7,008	10,442	0,964	1751	11,70	40,28	OK
90	1,5	0,076	6,84	7,540	9,91	0,958	1568	11,53	36,05	OK
100	1,67	0,076	7,6	8,300	9,15	0,946	1320	11,28	30,37	OK
110	1,83	0,076	8,36	9,060	8,39	0,930	1091	11,03	25,10	OK
120	2	0,076	9,12	9,820	7,63	0,907	880	10,78	20,25	OK
129	2,15	0,076	9,804	10,504	6,946	1,000	804	10,55	18,49	OK
130	2,17	0,076	9,88	10,580	6,87	1,000	787	10,53	18,09	OK
140	2,33	0,076	10,64	11,340	6,11	1,000	622	10,28	14,31	OK
150	2,5	0,076	11,4	12,100	5,35	1,000	477	10,03	10,97	OK
153	2,55	0,076	11,628	12,328	5,12	1,000	437	9,96	10,06	OK
154	2,57	0,076	11,704	12,404	5,05	1,000	424	9,93	9,76	NI OK

$\beta$  – hitrost oglečenja (0,67 mm/min v primeru oglečenja izključno zunanje plasti oziroma 0,76 mm/min v primeru oglečenja celotnega panela preko več plasti)

#### 6.2.4 Račun požarne odpornosti križno lepljene plošče v primeru parametričnega požara

Požarno odpornost križno lepljene plošče v primeru parametričnega požara določimo skladno z dodatkom A, ki ga podaja standard EN 1995-1-2. Skladno s to metodo je potrebno v primeru parametričnega požara določiti povečano stopnjo oglečenja lesa  $\beta_{par}$ , ki se razlikuje od standardne stopnje oglečenja  $\beta_n$  in je večinoma višja ter odvisna od faktorja odprtin  $O$ , ter parametra  $b$ , ki zajema toplotne lastnosti obodnih materialov. Postopek izračuna parametra  $\beta_{par}$  je prikaza z enačbami (6.20) – (6.26).

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 \cdot 0,076 \frac{cm}{min} \cdot \frac{0,2\sqrt{363} - 0,04}{0,16\sqrt{363} + 0,08} = 1,37 \frac{mm}{min} \quad (6.20)$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = \frac{\left(\frac{0,192}{292}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = 363 \quad (6.21)$$

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}} = \frac{9,0}{71,47} \sqrt{2,32} = 0,192 m^{0,5} \rightarrow \quad (6.22)$$

$$0,02 \leq O = 0,192 \leq 0,2 \checkmark$$

$$A_v = 3,00 \cdot 2,4 + 0,9 \cdot 2 = 9,0 m^2 \quad (6.23)$$

$$A_t = 2 \cdot 4,27 \cdot 4 + 2,8 \cdot (2 \cdot 4 + 2 \cdot 4,27) - 9 m^2 = 71,47 m^2 \quad (6.24)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{410 \frac{kg}{m^3} \cdot 1600 \frac{J}{kg K} \cdot 0,13 \frac{W}{m K}} = 292 \frac{J}{m^2 s^{0,5} K} \rightarrow \quad (6.25)$$

$$100 \leq b = 292 \leq 2200 \checkmark$$

$$h_{eq} = \sum_i \frac{A_i h_i}{A} = \frac{0,9 \cdot 2 + 2,4 \cdot 3,0 \cdot 2,4}{0,9 \cdot 2 + 2,4 \cdot 3,0} = 2,32 m \quad (6.26)$$

V preglednici spodaj (Preglednica 22) so prikazani rezultati za parametrični požar, vendar je ugotovljeno, da do porušitve ne pride. Pri parametričnem požaru je oglenenje določeno skladno z enačbo A.6 v standardu EN 1995-1-2 (enačba 6.27) v odvisnosti od parametrične hitrosti oglenjenja. Enačba je glede na fizikalno ozadje navedena nekoliko napačno. V drugem koraku med časoma  $t_0$  in  $3t_0$  je potrebno upoštevati popravek, kot je to prikazano v naslednji enačbi (enačba 6.27).

$$d_{char} = \begin{cases} \beta_{par} t & \text{za } t \leq t_0 \\ \beta_{par} \left( 1,5 t^{ii} - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right) & \text{za } t_0 \leq t \leq 3t_0 \\ 2\beta_{par} t & \text{za } 3t_0 \leq t \leq 5t_0 \end{cases} \quad (6.27)$$

Skladno z zgoraj omenjenim popravkom pridemo do rezultata, ki je prikazan v spodnjih primerih (Preglednica 24, Preglednica 26, Preglednica 28 in Preglednica 30) Kljub povečanemu požarnemu sektorju in zmanjšanju odprtin, ki imajo za posledico ventilacijsko kontroliran požar, pa križno lepljena plošča še vedno precej dolgo prenese obremenitev, vendar v tem primeru pride do porušitve. Odpornost  $M_{Rd,fi}$  je manjša od obremenitve  $M_{Ed,fi}$  pri času 169 minut. Pri tem je največja debelina zoglenega prereza  $d_{char}$  narasla že preko 11 cm (Preglednica 30).

Preglednica 30 Preglednica 30). Pri osnovnem primeru globina oglenjenja  $d_{char}$  doseže največjo vrednost 0,85 cm pri času  $3t_0 = 9,37$  min in je nato konstantna vse do časa  $5t_0 = 15,61$  min, ko se zaključí proces

<sup>ii</sup> V standardu EN 1995-1-2 – Dodatek A [37], enačba A.7 je napačna, saj je namesto  $t$  napisan  $t_0$ .

analize parametričnega požara. Obremenitev je kljub upadanju požarne odpornosti plošče še vedno precej manjša in zato element prenese parametrični požar brez porušitve.

Običajno je razvoj požara odvisen od več ključnih parametrov, ki jih skušamo zajet z naslednjo parametrično študijo. Poleg osnovnega primera so analizirani še trije primeri. Analiziranje vpliva velikosti odprtin in velikosti požarnega sektorja.

#### Primer 1: Osnovni primer

Skladno z izračuni zgoraj so vhodni podatki za parametrično študijo podani v spodnji preglednici spodaj (Preglednica 23), rezultati pa so zbrani v naslednji preglednici (Preglednica 24).

Preglednica 23: Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 1

Table 23: Input data for parametric fire analysis no. 1

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE				MATERIALNE KARAKTERISTIKE				OBTEŽBA IN MEJNI ČASI						
<b>Okno</b>	b [m]	3	$A_v$	9	m <sup>2</sup>	$\beta_0$	0,076	cm/min	$q_{f,k}$	400	MJ/m <sup>2</sup>	$t_0$	3,122	min
	h [m]	2,4	$A_t$	80,47	m <sup>2</sup>	$f_{m,eff}$	2,3	kN/cm <sup>2</sup>	$q_{f,d}$	278	MJ/m <sup>2</sup>	$2 t_0$	6,243	min
<b>Vrata</b>	b [m]	0,9	$h_{eq}$	2,32	m	$b$	100	cm	$q_{t,d}$	59,09	MJ/m <sup>2</sup>	$3 t_0$	9,365	min
	h [m]	2	$O$	0,170	m <sup>0.5</sup>	$k_{mod,fi}$	1		$\delta_{q,1}$	1,199		$5 t_0$	15,608	min
<b>Tloris</b>	b [m]	4,27	$b$	292		$\rho$	410	kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{q,2}$	0,834				
	l [m]	4	$\Gamma$	286		$c$	1600	J/kgK	$\delta_{q,n}$	0,87				
	h [m]	2,8	$\beta_{par}$	0,137	cm/min	$\lambda$	0,13	W/mK	$m$	0,8				

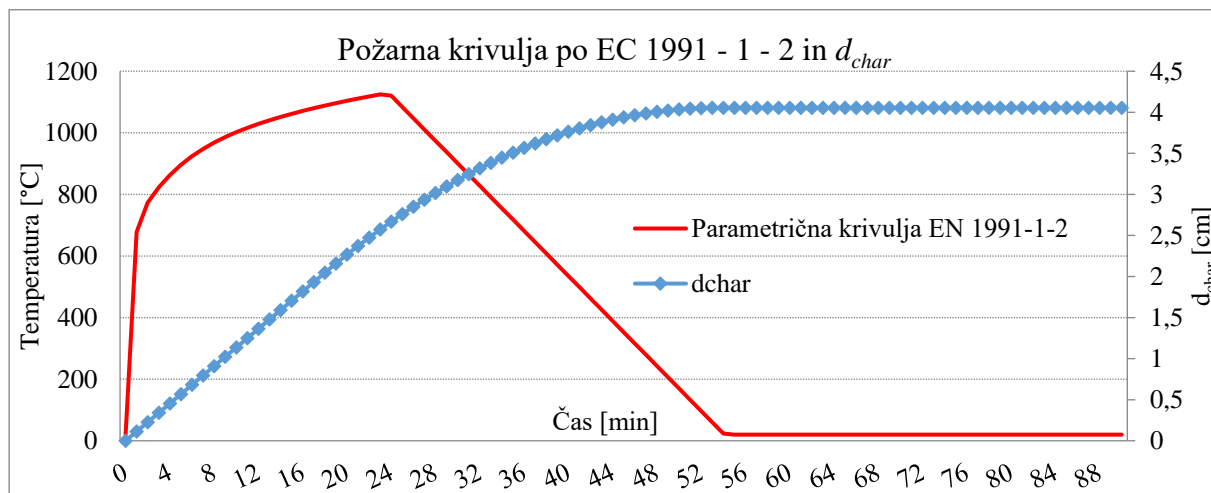
Preglednica 24: Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 1

Table 24: Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 1

t [min]	t [h]	$\beta_{par}$ [cm/min]	$d_{char,par}$ [cm]	$d_{ef}$ [cm]	$h_{preostali}$ [cm]	$k_1$	$W_{eff}$ [cm <sup>3</sup> ]	$M_{Ed}$ [kNm]	$M_{Ra}$ [kNm]	Kontrola
0	0,000	0,137	0,000	0,000	14,50	0,867	3039	4,14	69,91	OK
1	0,017	0,137	0,137	0,137	14,36	0,864	2969	4,13	68,28	OK
2	0,033	0,137	0,274	0,275	14,23	0,860	2899	4,11	66,67	OK
3	0,050	0,137	0,410	0,412	14,09	0,855	2830	4,10	65,08	OK
4	0,067	0,118	0,539	0,541	13,96	0,851	2765	4,09	63,59	OK
5	0,083	0,096	0,645	0,648	13,85	0,848	2711	4,08	62,36	OK
6	0,100	0,074	0,730	0,733	13,77	0,845	2669	4,07	61,39	OK
7	0,117	0,052	0,793	1,493	13,01	0,816	2302	3,99	52,94	OK
8	0,133	0,030	0,834	1,534	12,97	0,815	2282	3,99	52,50	OK
9	0,150	0,008	0,852	1,552	12,95	0,814	2273	3,99	52,29	OK
9,365	0,156	0	0,854	1,554	12,95	0,814	2273	3,99	52,27	OK
11	0,183	0	0,854	1,525	12,98	0,815	2287	3,99	52,59	OK
12	0,200	0	0,854	1,478	13,02	0,987	2788	4,00	64,13	OK
13	0,217	0	0,854	1,409	13,09	0,987	2818	4,00	64,81	OK
14	0,233	0	0,854	1,319	13,18	0,987	2857	4,01	65,71	OK
15	0,250	0	0,854	1,554	12,95	0,987	2756	3,99	63,38	OK
16	0,267	0	0,854	1,554	12,95	0,987	2756	3,99	63,38	OK



Na spodnjem grafikonu (Grafikon 24) je prikazano napredovanje oglenenja glede na parametrično požarno krivuljo. Kljub upadanju temperature oglenenje še vedno napreduje do časa  $5t_0$ . Kljub precej daljšem požaru pa plošča še vedno brez težav prenese požarno obtežbo, ki se konča pri času  $5t_0$ .



Grafikon 24: Razvoj temperatur in oglenenja pri parametričnem požaru za primer 2

Graph 24: Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 2

Preglednica 26: Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 2

Table 26: Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 2

t [min]	t [h]	$\beta_{par}$ [cm/min]	$d_{char,par}$ [cm]	$d_{ef}$ [cm]	$h_{preostali}$ [cm]	$k_1$	$W_{eff}$ [cm <sup>3</sup> ]	$M_{Ed}$ [kNm]	$M_{Rd}$ [kNm]	Kontrola
0	0,000	0,114	0,000	0,000	14,50	0,867	3039	4,14	69,91	OK
1	0,017	0,114	0,114	0,114	14,39	0,864	2981	4,13	68,56	OK
3	0,050	0,114	0,341	0,343	14,16	0,857	2864	4,11	65,88	OK
6	0,100	0,114	0,682	0,686	13,81	0,847	2693	4,07	61,93	OK
9	0,150	0,114	1,023	1,723	12,78	0,806	2193	3,97	50,45	OK
12	0,200	0,114	1,364	2,064	12,44	0,987	2543	3,94	58,49	OK
15	0,250	0,114	1,705	2,405	12,09	0,987	2405	3,91	55,32	OK
18	0,300	0,113	2,037	2,737	11,76	0,987	2275	3,87	52,33	OK
21	0,350	0,104	2,207	2,907	11,59	0,987	2210	3,86	50,83	OK
24	0,400	0,094	2,378	3,078	11,42	0,987	2145	3,84	49,34	OK
27	0,450	0,084	2,548	3,248	11,25	0,987	2082	3,82	47,88	OK
30	0,500	0,075	2,719	3,419	11,08	0,987	2019	3,81	46,44	OK
33	0,550	0,065	2,889	3,589	10,91	0,987	1957	3,79	45,02	OK
36	0,600	0,056	3,060	3,760	10,74	0,987	1897	3,77	43,62	OK
39	0,650	0,046	3,230	3,930	10,57	0,987	1837	3,76	42,25	OK
42	0,700	0,037	3,401	4,101	10,40	0,987	1778	3,74	40,90	OK
45	0,750	0,027	3,571	4,271	10,23	0,987	1720	3,73	39,57	OK
48	0,800	0,018	3,742	4,442	10,06	0,987	1663	3,71	38,26	OK
51	0,850	0,008	3,912	4,612	9,89	0,987	1607	3,69	36,97	OK
54	0,900	0	4,054	4,754	9,75	0,987	1562	3,68	35,92	OK
...										
90	1,500	0	4,054	4,754	9,75	0,987	1562	3,68	35,92	OK



## Primer 3: Povečan prostor, osnovne odprtine

V tem scenariju je predpostavljen dvakrat večji požarni sektor, ki sedaj v dolžino namesto 4 m meri 8 m, pri čemer pa se širina sektorja ne spremeni in ostane 4,27 m. Vse ostale geometrijske karakteristike ostanejo nespremenjene (Preglednica 27). Opazimo lahko, da kljub dvakratnem povečanju prostora in ohranjanju osnovnih velikosti odprtin, požarna krivulja po dosegu maksimuma zelo hitro upade. Razlog je isti kot v primeru 1, saj je požar tudi tokrat kontroliran s strani zaloge gorljivega materiala. Globina ogljenja ne preseže 2 cm (Preglednica 28), tako da element prav tako brez težav prenese požarno obremenitev s parametričnim požarom. Omenimo, da večja dolžina prostora ne vpliva na statični sistem križno lepljene plošče, saj je le-ta nosilna v prečni smeri prostora in tako je statični sistem v vseh parametričnih primerih enak.

Preglednica 27: Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 3

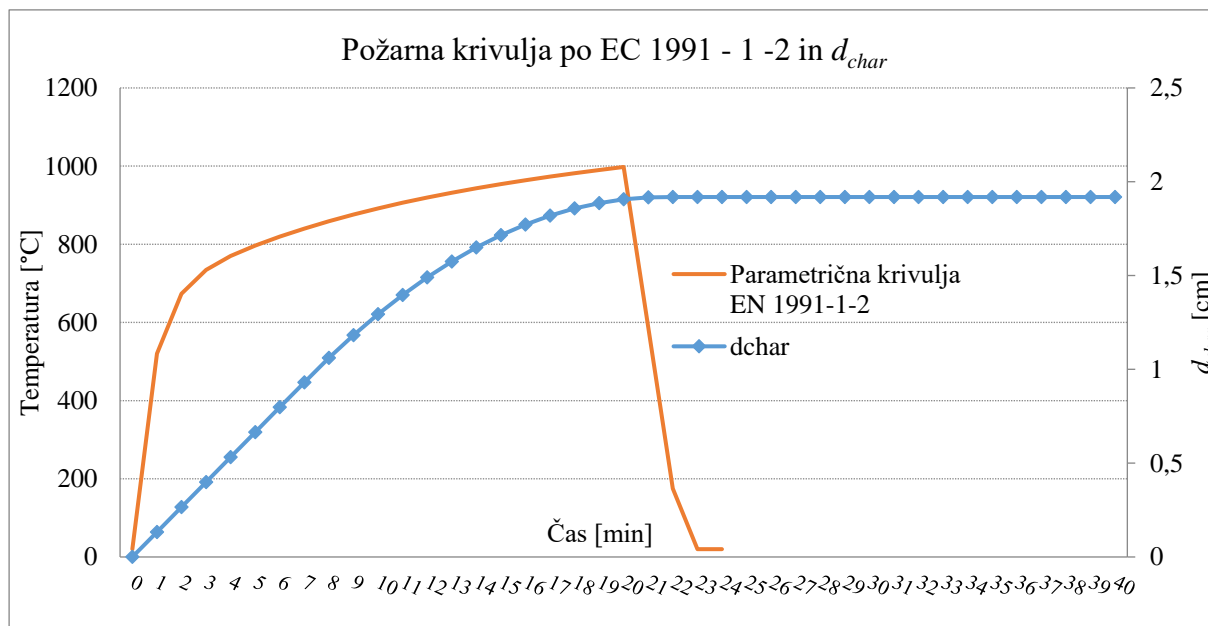
Table 27: Input data for parametric fire analysis no. 3

GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE					MATERIALNE KARAKTERISTIKE					OBTEŽBA IN MEJNI ČASI				
<b>Okno</b>	b [m]	3	$A_v$	9	m <sup>2</sup>	$\beta_0$	0,076	cm/min	$q_{f,k}$	400	MJ/m <sup>2</sup>	$t_0$	7,216	min
	h [m]	2,4	$A_t$	137,03	m <sup>2</sup>	$f_{m,eff}$	2,3	kN/cm <sup>2</sup>	$q_{f,d}$	322	MJ/m <sup>2</sup>	$2 t_0$	14,431	min
<b>Vrata</b>	b [m]	0,9	$h_{eq}$	2,32	m	$b$	100	cm	$q_{t,d}$	80,20	MJ/m <sup>2</sup>	$3 t_0$	21,647	min
	h [m]	2	$O$	0,100	m <sup>0,5</sup>	$k_{mod,fi}$	1		$\delta_{q,1}$	1,299		$5 t_0$	36,078	min
<b>Tloris</b>	b [m]	4,27	$b$	292		$\rho$	410	kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{q,2}$	0,890				
	l [m]	8	$\Gamma$	99		$c$	1600	J/kgK	$\delta_{q,n}$	0,87				
	h [m]	2,8	$\beta_{par}$	0,133	cm/min	$\lambda$	0,13	W/mK	m	0,8				

Preglednica 28: Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 3

Table 28: Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 3

$t$ [min]	$t$ [h]	$\beta_{par}$ [cm/min]	$d_{char,par}$ [cm]	$d_{ef}$ [cm]	$h_{preostali}$ [cm]	$k_1$	$W_{eff}$ [cm <sup>3</sup> ]	$M_{Ed}$ [kNm]	$M_{Rd}$ [kNm]	Kontrola
0	0,000	0,133	0,000	0,000	14,50	0,867	3039	4,14	69,91	OK
1	0,017	0,133	0,133	0,134	14,37	0,864	2971	4,13	68,33	OK
3	0,050	0,133	0,399	0,401	14,10	0,856	2835	4,10	65,21	OK
6	0,100	0,133	0,798	0,801	13,70	0,843	2636	4,06	60,62	OK
9	0,150	0,117	1,078	1,778	12,72	0,804	2168	3,97	49,86	OK
12	0,200	0,089	1,277	1,977	12,52	0,987	2579	3,95	59,31	OK
15	0,250	0,061	1,477	2,177	12,32	0,987	2497	3,93	57,43	OK
18	0,300	0,034	1,676	2,376	12,12	0,987	2417	3,91	55,59	OK
21	0,350	0,006	1,875	2,575	11,92	0,987	2338	3,89	53,78	OK
24	0,400	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
27	0,450	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
30	0,500	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
33	0,550	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
34	0,567	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
36	0,600	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK
37	0,617	0,000	1,918	2,618	11,88	0,987	2321	3,89	53,39	OK



Grafikon 25: Razvoj temperatur in oglečenja pri parametričnem požaru za primer 3

Graph 25: Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 3

## Primer 4: Povečan prostor, zmanjšane odprtine

V tem scenariju je obravnavan primer, kjer požarni sektor predstavlja povečan prostor, ki obsega celotno vrhno etažo stanovanja B10 (Slika 29). V tem primeru je dolžina požarnega sektorja 15 m, širina in s tem tudi statični sistem pa ostajata enaka kot v osnovnem primeru, in sicer je širina enaka 4,27 m. Spremenijo pa se velikosti odprtin in sicer upoštevamo eno okno dolžine 3m in višine 1,5 m. (Enačba 6.22). Kot lahko vidimo spodaj (Preglednica 29), se čas požara precej podaljša.

Preglednica 29: Vhodni podatki za analizo parametričnega požara, primer 4

Table 29: Input data for parametric fire analysis no. 4

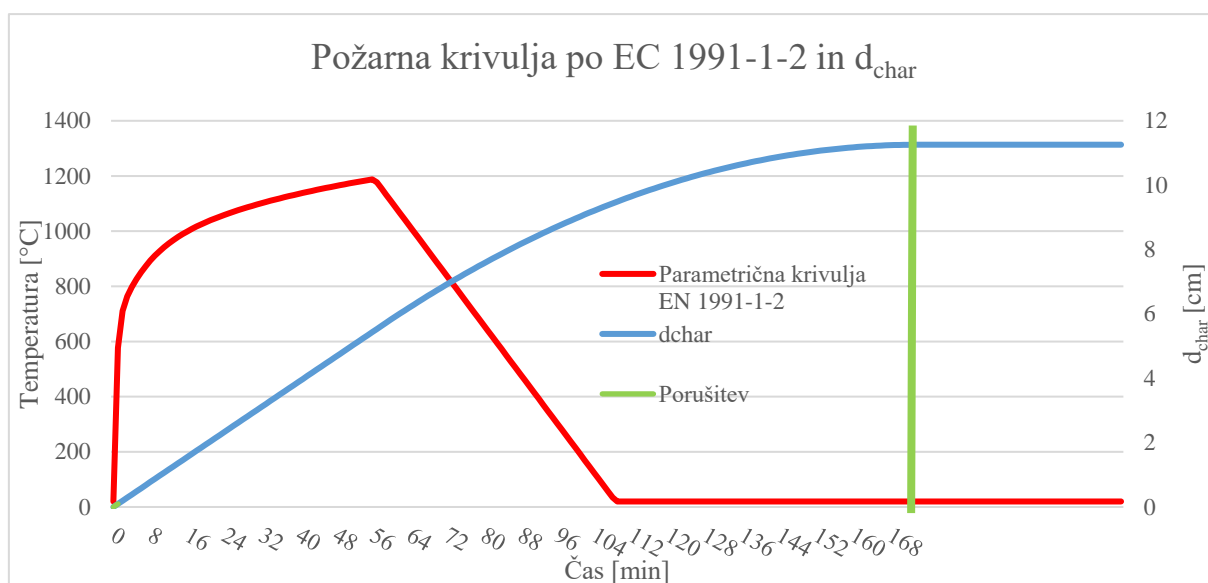
GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE				MATERIALNE KARAKTERISTIKE				OBTEŽBA IN MEJNI ČASI						
<b>Okno</b>	b [m]	3		$\beta_0$	0,076	cm/min	$q_{f,k}$	400	MJ/m <sup>2</sup>	$t_0$	58,01	min		
	h [m]	1,5	$A_v$	2,4	m <sup>2</sup>	$f_{m,eff}$	2,3	kN/cm <sup>2</sup>	$q_{f,d}$	405	MJ/m <sup>2</sup>	$2 t_0$	116,03	min
<b>Vrata</b>	b [m]	0	$A_t$	236	m <sup>2</sup>	$b$	100	cm	$q_{t,d}$	109,93	MJ/m <sup>2</sup>	$3 t_0$	174,04	min
	h [m]	0	$h_{eq}$	2,8125	m	$k_{mod,fi}$	1		$\delta_{q,1}$	1,475		$5 t_0$	290,06	min
<b>Tloris</b>	b [m]	4,27	$O$	0,017	m <sup>0,5</sup>	$\rho$	410	kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{q,2}$	0,986				
	l [m]	15	$b$	292		$c$	1600	J/kgK	$\delta_{q,n}$	0,87				
	h [m]	2,8	$\Gamma$	3		$\lambda$	0,13	W/mK	$m$	0,8				
			$\beta_{par}$	0,097	cm/min									

Kljub povečanemu požarnemu sektorju in zmanjšanju odprtin, ki imajo za posledico ventilacijsko kontroliran požar, pa križno lepljena plošča še vedno precej dolgo prenese obremenitev, vendar v tem primeru pride do porušitve. Odpornost  $M_{Rd,fi}$  je manjša od obremenitve  $M_{Ed,fi}$  pri času 169 minut. Pri tem je največja debelina zoglenega prereza  $d_{char}$  narasla že preko 11 cm (Preglednica 30).

Preglednica 30: Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče po EN 1995-1-2 za parametrično požarno krivuljo, primer 4

Table 30: Fire resistance calculation of CLT slab according to EN 1995-1-2 for parametric fire, case 4

t [min]	t [h]	$\beta_{par}$ [cm/min]	$d_{char,par}$ [cm]	$d_{ef}$ [cm]	$h_{preostali}$ [cm]	$k_1$	$W_{eff}$ [cm <sup>3</sup> ]	$M_{Ed}$ [kNm]	$M_{Rd}$ [kNm]	Kontrola
0	0,000	0,097	0,000	0,000	14,50	0,867	3039	4,14	69,91	OK
10	0,167	0,097	0,970	1,670	12,83	0,809	2218	3,98	51,02	OK
20	0,333	0,097	1,941	2,641	11,86	0,987	2313	3,88	53,19	OK
30	0,500	0,097	2,911	3,611	10,89	0,987	1950	3,79	44,84	OK
40	0,667	0,097	3,881	4,581	9,92	0,987	1618	3,70	37,21	OK
50	0,833	0,097	4,851	5,551	8,95	0,987	1317	3,60	30,28	OK
60	1,000	0	5,725	6,425	8,07	0,987	1072	3,52	24,66	OK
70	1,167	0	6,210	6,910	7,59	0,987	947	3,47	21,78	OK
80	1,333	0	6,695	7,395	7,10	0,987	830	3,42	19,09	OK
90	1,500	0	7,181	7,881	6,62	0,987	720	3,38	16,57	OK
100	1,667	0	7,666	8,366	6,13	0,987	619	3,33	14,23	OK
110	1,833	0	8,151	8,851	5,65	0,987	525	3,28	12,07	OK
120	2,000	0	8,636	9,336	5,16	0,987	438	3,23	10,09	OK
130	2,167	0	9,121	9,821	4,68	0,987	360	3,19	8,28	OK
140	2,333	0	9,606	10,306	4,19	0,987	289	3,14	6,65	OK
150	2,500	0	10,091	10,791	3,71	0,987	226	3,09	5,20	OK
160	2,667	0	10,576	11,276	3,22	0,987	171	3,05	3,93	OK
168	2,800	0	10,965	11,665	2,84	0,987	132	3,01	3,04	OK
169	2,817	0	11,013	11,713	2,79	0,987	128	3,00	2,94	NI OK



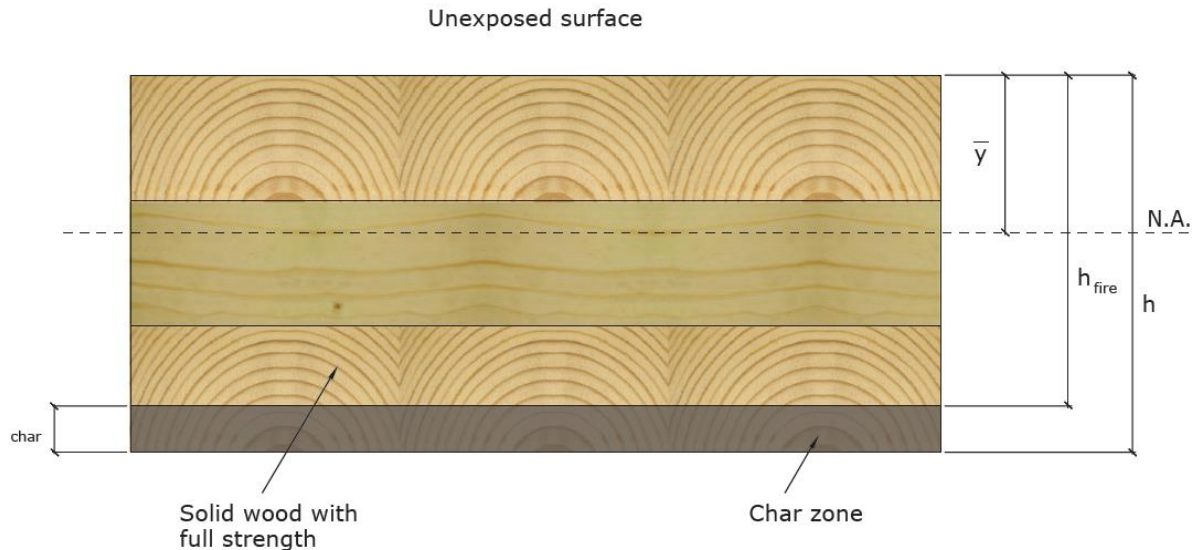
Grafikon 26: Razvoj temperatur in oglenjenja pri parametričnem požaru za primer 4

Graph 26: Temperature and charring depth progress considering parametric fire in case 4

### 6.3 RAČUN PO PRIROČNIKU CLT HANDBOOK

Priročnik CLT Handbook [34] sloni na ameriških standardih, kar za dotični primer pomeni izračun standardne požarne odpornosti pri standardni požarni krivulji ASTM E119. Določevanje požarne odpornosti je sestavljeno iz petih korakov, ki so opisani v nadaljevanju. Korak 5b ni bistven za primer upogibno obremenjene plošče in se zato v tej magistrski nalogi ne bomo. Čas, pri katerem element ni

več sposoben prenesti obtežbe, se imenuje požarna odpornost in je označen kot  $t_{struc}$ . Smiselno je omeniti, da pri računu ne upoštevamo nosilnost prečnih slojev, torej velja  $E_{90} = G_0 = G_{90} = 0$ . Podobna predpostavka je bila tudi pri postopkih po EN 1995-1-2. Za enostavnejši prikaz simbolov je spodaj prikazan simbolični prerez (Slika 32).



Slika 32: Prikaz uporabljen simbolov v računu požarne odpornosti križno lepljenega elementa [34]  
Figure 32: Nomenclature used in calculating fire resistance of a CLT exposed to fire from below [34]

### Korak 1: Račun delaminacije prvega sloja

$$t_{fo} = \left( \frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1,23} = \left( \frac{1,34 \text{ in}}{1,5 \text{ in./h}} \right)^{1,23} = 0,869 h \text{ ali } \left( \frac{0,85 \text{ in}}{1,5 \text{ in./h}} \right)^{1,23} = 0,495 h \quad (6.28)$$

kjer je:

$t_{fo}$  – čas dosega lepljenega stika [h],

$h_{lam}$  – debelina lamele [cm],

$\beta_n$  – nominalna hitrost oglenenja (1,5 inch/h = 0,64 mm/min).

$$n_{lam} = INT \left( \frac{t}{t_{fo}} \right) = INT \left( \frac{t}{0,869 h} \right) \text{ ali } INT \left( \frac{t}{0,495 h} \right) \quad (6.29)$$

kjer je:

$n_{lam}$  – število lamel, ki lahko odpadejo, zaokroženo navzdol [-],

$t$  – zahtevana požarna odpornost [h].

### Korak 2: Račun efektivne globine oglenenja

$$a_{char} = 1,2[n_{lam} \cdot h_{lam} + \beta_n(t - (n_{lam} \cdot t_{fo}))^{0,813}] \quad (6.30)$$

kjer je:

$a_{char}$  – efektivna globina oglenenja [in.].

### Korak 3: Določitev efektivnega prečnega prereza

$$h_{fire} = h - a_{char} \quad (6.31)$$

kjer je:

$h$  – začetna višina prečnega prereza [in.],  
 $h_{fire}$  – efektivna višina prečnega prereza [in.].

#### **Korak 4: Določitev pozicije nevtralne osi in karakteristik efektivnega prečnega prereza**

$$\bar{y} = \frac{\sum_i \tilde{y}_i h_i E_i}{\sum_i h_i E_i} \xrightarrow[\text{vseh slojev}]{\text{enak material}} \frac{\sum_i \tilde{y}_i h_i}{\sum_i h_i} \quad (6.32)$$

kjer je:

$\bar{y}$  – razdalja med neizpostavljeno stranjo in nevtralno osjo [in.],  
 $\tilde{y}_i$  – razdalja med neizpostavljeno stranjo in težiščem  $i$ -te lamele [in.],  
 $h_i$  – preostala debelina  $i$ -te lamele [in.],  
 $E_i$  – elastični modul  $i$ -tega sloja v glavni smeri [psi].

$$EI_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_i b_i h_i d_i^2 E_i \xrightarrow[\text{vseh slojev}]{\text{enak material}} I_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_i b_i h_i d_i^2 \quad (6.33)$$

kjer je:

$EI_{eff}$  – efektivna upogibna togost [ $\text{lb} \cdot \text{in.}^2$ ].  
 $d_i$  – razdalja med nevtralno osjo in težiščem  $i$ -te lamele [in.],  
 $b_i$  – enotna širina križno lepljenega panela [tipično 1 čevlj = 1 ft.],  
 $h_i$  – razdalja med nevtralno osjo in težiščem  $i$ -te lamele [in.],  
 $I_{eff}$  – vztrajnosti moment efektivnega prečnega prereza [ $\text{in.}^4$ ].

#### **Korak 5: Račun požarne odpornosti - nosilnosti**

Račun je razdeljen na dva dela: določitev projektnega odpornostnega momenta (korak 5a) in določitev osne tlačne nosilnosti (korak 5b). Korak 5b ni bistven za primer upogibno obremenjene plošče in se zato v tej magistrski nalogi ne bomo ukvarjali z njim.

#### **Korak 5a: Račun projektnega odpornostnega momenta**

$$S_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E(h_{fire} - \bar{y})} \xrightarrow[\text{vseh slojev}]{\text{enak material}} \frac{I_{eff}}{h_{fire} - \bar{y}} \quad (6.34)$$

kjer je:

$S_{eff}$  – odpornostni efektivnega prečnega prereza [ $\text{in.}^3$ ],  
 $I_{eff}$  – vztrajnosti moment efektivnega prečnega prereza [ $\text{in.}^4$ ].

$$M' = KF_b S_{eff} = 2,85 F_b S_{eff} \geq M \quad (6.35)$$

kjer je:

$M'$  – projektna vrednost odpornosti v požarnem projektne stanju [ $\text{lb} \cdot \text{in.}$ ],  
 $K$  – korekcijski faktor upogiba po preglednici spodaj (Preglednica 31),  
 $F_b$  – projektna upogibna napetost v lesu enotna širina križno lepljenega panela [tipično 1 čevlj = 1 ft.],  
 $S_{eff}$  – odpornostni moment efektivnega prereza [ $\text{in.}^3$ ],  
 $M$  – največji moment [ $\text{lb} \cdot \text{in.}$ ].

Preglednica 31: Korekcijski faktorji za požarno projektiranje [34]

Table 31: Adjustment factors for fire design [34]

Strength	Strength Adjustment Factor (K)	Size Factor (1)	Volume Factor (1)	Flat Use Factor (1)	Beam Stability Factor (2)	Column Stability Factor (2)
Bending ( $F_b$ )	2.85	$C_F$	$C_V$	$C_{fu}$	$C_L$	-
Tensile ( $F_t$ )	2.85	$C_F$	-	-	-	-
Axial Compression ( $F_c$ )	2.58	$C_F$	-	-	-	$C_p$
Beam Buckling ( $F_{bE}$ )	2.03	-	-	-	-	-
Column Buckling ( $F_{cE}$ )	2.03	-	-	-	-	-

Prečni prerez, nevtralna os, vztrajnostni moment in odpornostni moment so odvisni od časa  $t$ , zato so rezultati zbrani na koncu v preglednici, ki je bila pripravljena v primernemu programu za račun vrednosti pri različnih časih.

V spodnjih preglednicah so zbrani podatki (Preglednica 33 in Preglednica 34) in rezultati analize (Preglednica 35) po postopku, ki ga predpisuje CLT Handbook. Priročnik je pripravljen z ameriškimi enotami (Preglednica 32 in Preglednica 33), zato so tudi izračuni izvedeni z njihovimi enotami. Pomembna je tako končna kontrola, kjer se primerja obremenitev in odpornost. Večina parametrov se spreminja s časom, zato je bil uporabljen časovni korak 3 min. Analiza je bila sicer izvedena vse do časa 180 min, ko pogori celoten element, vendar ta ni prikazana, ker element odpove že prej.

Za lažje razumevanje je spodaj razlaga kratic imperialnih enot.

$in.$  = inch = palec = 2,54 cm,  $ft.$  = foot = čevelj = 30,48 cm,  $psf$  = pound per square foot = funt na kvadratni čevelj = 4,88 kg/m<sup>2</sup>,  $lb.$  = funt = 0,454 kg.

Preglednica 32: Pretvornik med inchi in centimetri

Table 32: Inch to centimeter converter

cm	inch
1	0,394
2,540	1

Preglednica 33: Sestava križno lepljene plošče v imperialnih in metričnih enotah

Table 33: CLT structure in imperial and metric units

SLOJ	$h_i$ [inch]	$h_i$ [cm]	$\hat{y}$ [inch]	$\hat{y}$ [cm]
1	1,34	3,40	5,039	12,8
2	0,85	2,15	3,947	10,0
3	1,34	3,40	2,854	7,3
4	0,85	2,15	1,762	4,5
5	1,34	3,40	0,669	1,7

Ratej, J. 2016. Požarna odpornost lesenih elementov iz križno lepljenih plošč.

Mag. d. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program II. stopnje Gradbeništvo, Gradbene konstrukcije

Preglednica 34: Vhodni podatki za račun križno lepljene plošče po priručniku CLT Handbook

Table 34: Required data for CLT slab calculation according to CLT Handbook

<b>CLT Handbook - PODATKI</b>					
$h_1$	3,4	cm	$t_{fo-3,4}$	132,5	min
$h_2$	2,15	cm	$t_{fo-2,15}$	75,4	min
$h_1$	1,34	in	$t_{fo-3,4}$	0,869	h
$h_2$	0,85	inch	$t_{fo-2,15}$	0,495	h
$h_{tot}$	14,5	cm	$L_{span}$	435	cm
$h_{tot}$	5,709	inch	$L_{span}$	171	inch
$1/2 h_{tot}$	2,854	inch	$L_{span}$	14,27	foot
$b$	12	inch	<b>Obtežba</b>		
$b$	1	foot	$q$	3	kN/m <sup>2</sup>
$\beta_n$	0,064	cm/min	$q$	62,66	psf
$\beta_n$	1,5	in./h	$g$	26,1	lb/ft <sup>3</sup>

Preglednica 35: Izračun požarne odpornosti križno lepljene plošče skladno s priručnikom CLT Handbook

Table 35: Fire resistance calculation of CLT panel according to CLT Handbook

$t$ [min]	$t$ [h]	$N_{lam}$	$a_{char,dej}$ [in.]	$a_{char}$ [in.]	$a_{char, sloj}$ [in.]	$h_{fire}$ [in.]	$\bar{y}$ [in.]	$I_{eff}$ [in. <sup>4</sup> /ft.]	$S_{eff}$ [in. <sup>3</sup> /ft.]	$M'$ [lb ft./ft.]	$W_{total}$ [psf]	$M_{max}$ [lbft./ft.]	Kontrola
0	0	0	0,000	-	0,000	6,875	3,438	257,36	74,87	13,225	77,61	1,976	OK
5	0,083	0	0,199	0,239	0,199	6,636	3,268	229,41	68,12	12,032	77,09	1,963	OK
10	0,167	0	0,350	0,419	0,350	6,456	3,135	208,54	62,81	11,095	76,70	1,953	OK
15	0,25	0	0,486	0,583	0,486	6,292	3,011	189,79	57,85	10,218	76,34	1,944	OK
20	0,333	0	0,614	0,737	0,614	6,138	2,890	172,29	53,04	9,370	76,01	1,935	OK
25	0,417	0	0,736	0,883	0,736	5,992	2,771	155,65	48,33	8,536	75,69	1,927	OK
30	0,5	0	0,854	1,025	0,854	5,850	2,652	139,64	43,65	7,711	75,38	1,919	OK
35	0,583	0	0,968	1,161	0,968	5,714	2,532	124,09	39,00	6,889	75,08	1,912	OK
40	0,667	0	1,079	1,295	1,079	5,580	2,411	108,87	34,35	6,068	74,79	1,904	OK
45	0,75	0	1,187	1,425	1,187	5,450	2,288	99,87	31,58	5,579	74,51	1,897	OK
50	0,833	0	1,293	1,552	1,293	5,323	2,163	99,87	31,60	5,582	74,23	1,890	OK
55	0,917	1	1,433	1,719	0,058	5,156	2,063	67,59	21,85	3,860	73,87	1,881	OK
60	1	1	1,609	1,930	0,234	4,945	2,063	67,59	23,45	4,142	73,41	1,869	OK
65	1,083	1	1,755	2,106	0,380	4,769	2,063	67,59	24,98	4,412	73,03	1,859	OK
70	1,167	1	1,889	2,267	0,514	4,608	2,063	67,59	26,56	4,691	72,68	1,850	OK
75	1,25	1	2,016	2,419	0,641	4,456	2,063	67,59	28,24	4,989	72,35	1,842	OK
80	1,333	1	2,137	2,565	0,762	4,310	2,063	67,59	30,07	5,311	72,03	1,834	OK
85	1,417	1	2,254	2,705	0,879	4,170	2,063	67,59	32,07	5,664	71,73	1,826	OK
90	1,5	1	2,367	2,841	0,992	4,034	2,063	67,59	34,28	6,055	71,43	1,819	OK
95	1,583	1	2,478	2,973	1,103	3,902	2,063	67,59	36,75	6,491	71,14	1,811	OK
100	1,667	1	2,585	3,103	1,210	3,772	2,063	67,59	39,53	6,982	70,86	1,804	OK
105	1,75	1	2,691	3,229	1,316	3,646	2,063	67,59	42,70	7,542	70,59	1,797	OK
110	1,833	2	2,851	3,422	0,101	3,453	1,986	62,48	42,57	7,519	70,17	1,786	OK
115	1,917	2	3,017	3,620	0,267	3,255	1,855	54,37	38,85	6,862	69,74	1,775	OK
120	2	2	3,160	3,792	0,410	3,083	1,737	47,56	35,34	6,242	69,36	1,766	OK
125	2,083	2	3,293	3,951	0,543	2,924	1,622	41,40	31,81	5,618	69,02	1,757	OK
130	2,167	2	3,418	4,101	0,668	2,774	1,508	35,66	28,18	4,978	68,69	1,749	OK
135	2,25	2	3,538	4,246	0,788	2,629	1,392	30,21	24,42	4,313	68,38	1,741	OK
140	2,333	2	3,654	4,385	0,904	2,490	1,274	24,94	20,50	3,622	68,07	1,733	OK
145	2,417	2	3,767	4,520	1,017	2,355	1,151	19,79	16,44	2,904	67,78	1,726	OK
150	2,5	2	3,876	4,652	1,126	2,223	1,022	14,70	12,24	2,162	67,49	1,718	OK
152	2,533	2	3,920	4,703	1,170	2,172	0,969	12,66	10,53	1,860	67,38	1,715	OK
153	2,55	2	3,941	4,729	1,191	2,146	0,942	11,64	9,67	1,708	67,32	1,714	NI OK

Iz zgornje preglednice lahko ugotovimo, da plošča prenese 152 minut požara. Skladno s tem bi lahko ploščo uvrstili v požarni razred R150. Pri tem odpadeta 2 najbolj izpostavljena sloja, kar pomeni, da nam ostaneta v funkciji še dva nosilna in en prečni sloj. V primerjavi z analizo po EN 1995-1-2 je

odpornost nekoliko manjša, tam je znašala 153 min, kar je zgolj minuto dlje. Glede na izvedeno analizo lahko predvidevamo, da metoda v priročniku CLT daje bolj konzervativne rezultate.

#### 6.4 PARAMETRIČNA ŠTUDIJA VPLIVA ŠTEVILA SLOJEV ELEMENTA IN RAZPONA NA RAZLIKOVANJE REZULTATOV ZA STANDARDNI POŽAR

To poglavje je namenjeno primerjavi rezultatov, ki jih vrmeta metoda po EN 1991-1-2 in metoda po priročniku CLT. V obeh primerih je element izpostavljen standardnemu požaru, zanima pa nas predvsem kako se spreminja razlika med rezultatoma obeh metod. Kot osnovni primer bomo ponovno vzeli stanovanje B10 (Slika 29), kjer je plošča petslojna in orientirana v smeri jug-sever, tako da je razdalja med podporama enaka 4 m. V parametrični študiji spreminjamo število slojev. In sicer poleg osnovne petslojne obravnavamo še troslojno in sedemslojno križno lamelirano ploščo. Analiziramo pa tudi vpliv razpona na požarno odpornost plošče in sicer je pri trislojni plošči upoštevan razpon 4 m, pri petslojni 4 m in 8 m ter pri sedemslojni 4, 8 in 12 m (Preglednica 36).

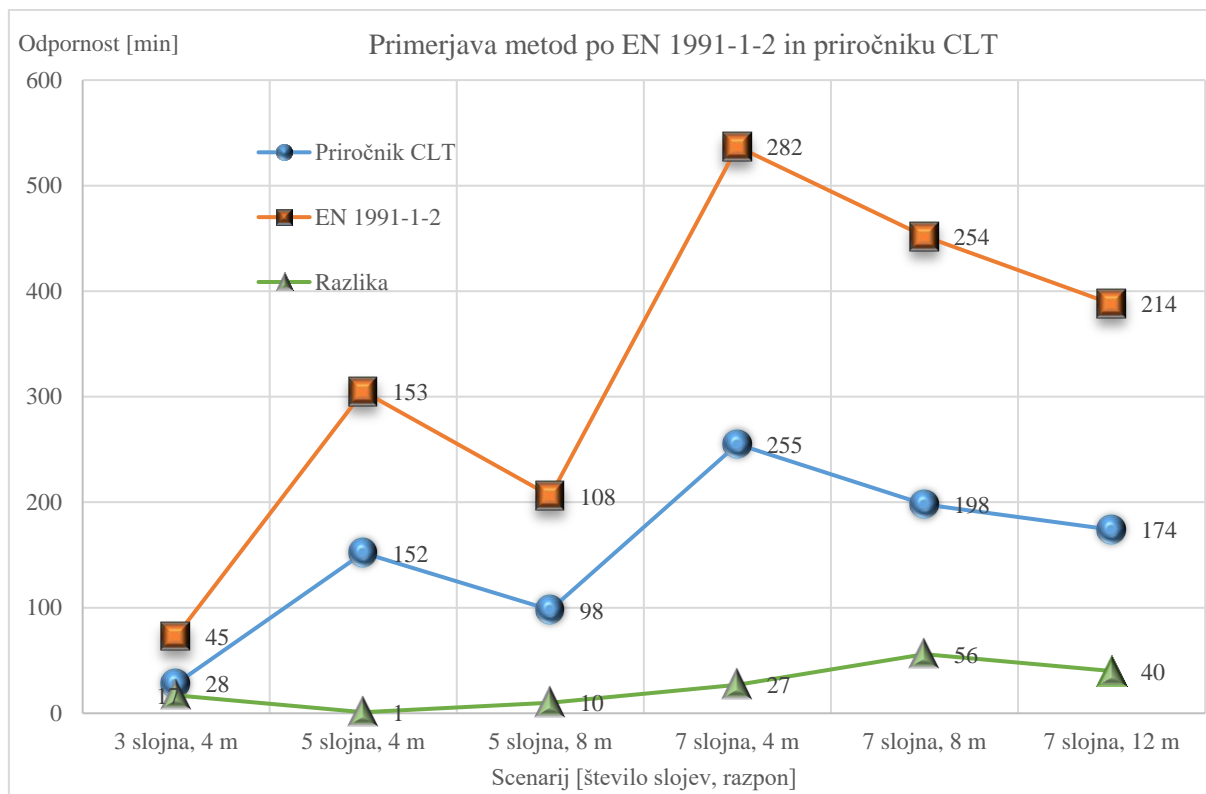
V spodnji preglednici (Preglednica 36) so zbrani rezultati vseh šestih analiz po obeh metodah. Na grafikonu (Grafikon 27) pod preglednico je še grafično prikazana razlika med obema metodama, glede na spreminjane zgoraj omenjenih faktorjev.

Preglednica 36: Standardna požarna odpornost križno lepljene plošče določena z obema metodama za različne zasnove

Table 36: Standard fire resistance of CLT slab, determined by both methods and different structural conditions

Število slojev	Razpon [m]	Odpoved plošče po času [min]	
		EN 1991-1-2	Priročnik CLT
3	4	45	28
5	4	153	152
5	8	108	98
7	4	282	255
7	8	254	198
7	12	214	174





Grafikon 27: Primerjava rezultatov obeh metod za standardno požarno krivuljo različne scenarije  
Graph 27: Standard fire curve methods results comparison for both scenarios

Na zgornjem grafikonu je razvidno, da metoda po evropskem standardu EN 1995-1-2 praviloma vrne daljše čase, metoda po kanadskem priročniku CLT Handbook pa krajše, torej bolj konzervativne. Najbolj podobni sta si metodi za primer petslojne plošče z razponom 4 m, kjer se rezultati razlikujejo zgolj za eno minuto, največja razlika pa je pri sedemslojni plošči in razponu 8 m.

## 6.5 KOMENTAR REZULTATOV

Glede na rezultate analiz, ki so predstavljeni v tem poglavju, lahko zaključimo, da pri analizi konstrukcijskih elementov pri standardnem požaru metoda po priročniku CLT Handbook daje manjše čase, torej nižjo požarno odpornost, oziroma je bolj konzervativna v primerjavi z metodo po EN 1995-1-2. Analize kažejo na večje odstopanje med rezultati obeh metod pri daljših razponih in pri večjem številu slojev. Najbolje se metodi ujemata pri pet slojni plošči in razponu 4 m, kar predstavlja izvirni scenarij. V tem primeru se razlikujeta zgolj za eno minuto. Največja razlika med metodama pa se pojavi pri analizi sedem slojne plošče in razponu 8 m, kjer le ta znaša 56 min. Pri tem je požarna odpornost plošče po metodi podani v CLT Handbook je 198 min, po EN 1995-1-2 metodi pa 254 min in s tem je požarna odpornost večja za 28 %.

Pri računu požarne odpornosti križno lepljene plošče izpostavljene parametričnemu požaru skladno s EN 1991-1-2 [6] so bili analizirani štiri različni scenariji. V vseh štirih parametričnih analizah je bila obravnavana petslojna plošča debeline 14,5 cm z razponom 4,27 m. Izvirni scenarij je upošteval prvotno

velikost prostora 4 m x 4,27 m in odpoved odprtih v njihovi polni velikosti, torej okno v velikosti  $l/h = 3/2,4$  m in dvoje vrat v velikosti  $b/h = 0,9/2$  m. Skupna površina odprtih je tako znašala 9 m<sup>2</sup>. Oglenenje se zaključi po času  $5t_0 = 15,6$  min, v scenariju pa je dosežena največja temperatura 948 °C pri času 20 min (preveri!). Element kljub vplivu požara prenese obremenitev.

V drugem primeru so upoštevane manjše velikosti okna, hkrati pa so vrata obravnavana kot požarno varna in so izločena iz površine odprtih. Tako je končna velikost odprtih upoštevana kot 2,4 m<sup>2</sup>. Velikost požarnega sektorja ostane nespremenjena. Oglenenje se zaključi pri času  $5t_0 = 89,2$  min, maksimalna temperatura v prostoru pa se pojavi pri časi  $t = 23$  min in doseže 1125 °C. Požar je ventilacijsko kontroliran, element pa kljub podaljšanju požara in povečanju temperatur požar prenese.

V tretjem scenariju je bil analiziran primer, če se požar zaradi slabe požarne zaščite hitro razširi v sosednji prostor enake velikosti. S tem se požarni sektor poveča na 4,27 m x 8 m. Velikosti odprtih so v tem scenariju enake kot v osnovnem primeru in znašajo 9 m<sup>2</sup>. Trajanje požara se kljub večjemu požarnem sektorju občutno skrajša v primerjavi z drugim primerom zaradi večjih odprtih. Posledično požar ponovno postane kontroliran s strani zaloge gorljivega materiala. Oglenenje se zaključi po času  $5t_0 = 36,1$  min. Maksimalna temperatura pri časi  $t = 20$  min pa doseže 998 °C. Element pri tem požarnem scenariju ohrani svojo nosilno funkcijo.

Zadnji, četrti scenarij obravnava primer, kjer se požar razširi širom celotnega stanovanja v terasni etaži objekta, torej se požarni sektor poveča na 4,27 m x 15 m. Pri tem se ponovno upošteva omejeno velikost odprtih zaradi enakega razloga kot v drugem scenariju. S tem požar ponovno preide v ventilacijsko kontroliran požar, čas požara pa se občutno poveča. Oglenenje se zaključi po času  $5t_0 = 290,1$  min, maksimalna dosežena temperatura v prostoru pa pri časi  $t = 56$  min doseže 1188 °C. V tem scenariju element proti koncu požara odpove in sicer pri času 168 min. Pri tem času znaša globina oglenjenja  $d_{char} = 11,3$  cm, celotna debelina križno lepljene plošče pa je 14,5 cm. Vidimo, da je zoglenela večina križno lepljene plošče in posredno pride do porušitve.

## 7 ZAKLJUČEK

Pisanja naloge sem se lotil, ker sem želel raziskati trenutno stanje računskih metod za dokazovanje križno lepljenih elementov pri požarni obtežni kombinaciji. Naloga je osredotočena na metode za dokazovanje požarne odpornosti križno lepljenih plošč, ki običajno predstavljajo kritičen element zaradi direktnega vpliva ognja pod njimi. S pregledom literature sem na podlagi analize trenutno razpoložljivih metod in različnih priporočil, ki so bila predstavljena strokovni javnostim prišel do zanimivih zaključkov. Predvsem se mi zdi pomembno priporočilo za upoštevanje povečane debeline dodatnega sloja nične nosilnosti  $d_0$  v EN 1995-1-2 [37]. Trenutna verzija standarda zahteva upoštevanje debeline 7 mm, raziskave pa kažejo, da je ta vrednost za račun požarne odpornosti križno lepljenih elementov premajhna in bi bilo potrebno upoštevati večjo vrednost.

Ugotovljeno je bilo, da je pri določevanju globine oglečenja  $d_{char}$  v enačbi A.6 v standardu EN 1995-1-2 – Dodatek A napaka, saj se mora pri časih med  $t_0$  in  $3t_0$  v pravem členu znotraj oklepaja upoštevati dejanski čas  $t$  namesto  $t_0$ . S tem dobimo smiseln potek globine oglečenja.

Ugotovil sem, da je numerično modeliranje križno lepljenih lesenih elementov precej zahtevno, največjo težavo pa predstavlja modeliranje fenomena delaminacije, saj zaradi presežene mejne temperature lepila lamele začnejo odpadati. Težava nastane, ker eksperimenti kažejo na neenakomerno odpadanje lamel. Po delaminaciji zaradi odpovedi lepila se pojavi pospešeno oglečenje. Kakšna pa je najbolj realna in pravilna hitrost tega pospešenega oglečenja, pa je še vedno stvar diskusije.

S to nalogo sem prišel do zanimivih zaključkov glede vpliva upoštevanja odprtih in velikosti požarnega sektorja na razvoj parametričnega požara skladno z EN 1991-1-2 [6]. Ugotavljam, da pri velikih odprtinah pride do požara, ki je omejen s strani količine gorljivega materiala in se požar zaključi precej hitreje, kot v primeru manjših odprtih in ventilacijsko kontroliranega požara. Pri primerjavi rezultatov standardne požarne odpornosti med postopkoma v EN 1995-1-2 in priročniku CLT Handbook sem spoznal, da postopek po priročniku CLT Handbook praviloma vrne rezultate, ki so bolj na varni strani.

Po pregledu literature, ki je bila predelana za namen izdelave te naloge, sem opazil, da je literature na razpolago razmeroma veliko, vendar je opaziti, da je križno lepljen les razmeroma nov lesni proizvod. Menim da bi bilo potrebno izvesti še več raziskav in stremeti k temu, da bi se v bodoče fenomen delaminacije in povečane hitrosti oglečenja po odpadu sloja lahko bolj natančno lahko vključil v postopek vsakodnevnega projektiranja.

Uporabnost te naloge vidim predvsem v predstavitvi trenutnega stanja raziskav na področju določevanja požarne odpornosti križno lepljenih elementov in kot komentar na trenutne metode. Uporabno vrednost ima tudi primerjava rezultatov med obema omenjenima metodama za standardni požar.

V nadaljevanju bi bilo smiselno nadaljevati z raziskavami tega področja in v sodelovanju z drugimi institucijami in morebitnimi dodatnimi eksperimentalnimi raziskavami priti do poenostavljenih, a bolj natančnih računskih postopkov za določitev požarne odpornosti križno lepljenih elementov.

**8 VIRI**

- [1] Vrednost odkupa okroglega lesa v aprilu 2016 za 22% višja kot v aprilu 2015. 2015. Ljubljana, Statistični urad Republike Slovenije.  
<http://www.stat.si/StatWeb/prikazi-novico?id=5990&idp=2&headerbar=1> (Pridobljeno 28.6.2016.)
- [2] Hozjan, T., 2016. Uvod v požarno varnost. Študijsko gradivo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko.
- [3] Masters, J. 2014. California Drought, El Nino, Warm Earth one more time.  
<https://www.wunderground.com/blog/RickyRood/comment.html?entrynum=320&page=2> (Pridobljeno 30.6.2016.)
- [4] Danelek, J. 2011. Top 10 Most Famous Fires in History.  
<http://www.toptenz.net/top-10-most-famous-fires-in-history.php> (Pridobljeno 30.6.2016.)
- [5] Promat International. 2015. Types of Fire Exposure.  
<http://www.promat-tunnel.com/en/advice/fire-protection/fire%20curves> (Pridobljeno 30.6.2016.)
- [6] EN 1991-1-2:2004. Eurocode 1, Actions on structures – General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels, European Committee for Standardisation.
- [7] Hozjan, T. 2016. Postopki projektiranja požarno varnih lesenih konstrukcij. Študijsko gradivo Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko.
- [8] Smernica uporabe računalniških modelov na področju varstva pred požarom. 2007. Ljubljana, Ministrstvo za obrambo Republika Slovenija. Dostopno na:  
[http://www.sos112.si/slo/tdocs/smernica\\_21.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/smernica_21.pdf) (Pridobljeno 30.6.2016.)
- [9] Hall, J.R., Defining the challenge: selecting fire scenarios for fire protection systems design and evaluation. Not dated: National Fire Protection Association:  
<http://www.nfpa.org/~media/files/proceedings/supdet11hallabstract.ashx>. (Pridobljeno 1.7.2016.)
- [10] NFPA 101:2002. Standard for Health Care Facilities (National Fire Protection Association)
- [11] Bailey, C. 2011. Nominal Fires. One Stop Shop in Structural Fire Engineering. Manchester, University of Manchester.  
<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/Design/performance/fireModelling/nominalFireCurves/default.htm#top> (Pridobljeno 1.7.2016.)
- [12] ISO 834-1:2014. Fire-resistance test – Elements of building construction – Part 1: General requirements. Geneva, Switzerland: International Standard Organization
- [13] Lennon, T. 2008. Dissemination of information workshop on Eurocode 1: Actions on structures – Part 1, 2: General Actions – Actions on structures exposed to fire.  
[http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/Fire\\_2\\_Lennon.pdf](http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/Fire_2_Lennon.pdf) (Pridobljeno 1.7.2016.)

- [14] Sokol, Z. 2006. Example of Parametric Fire Curve for a Fire Department. Access Steel. <http://dan.ct.upt.ro/fire/files/ParametricFireCalc.pdf> (Pridobljeno 1.7.2016.)
- [15] Gerard, R., Barber, D., Wolski, A. 2013, Fire safety challenges of tall wood buildings. The Fire Protection Research Foundation. San Francisco, ZDA.
- [16] Germovnik, N., 2015. Zagotavljanje požarne varnosti v večetažnih stanovanjsko - poslovnih lesenih objektih. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T.): 115 str.
- [17] Direktiva 89/106/EGS z dne 21. decembra 1988 o približevanju zakonov in drugih predpisov držav članic, ki se nanašajo na gradbene proizvode [1988] OJ L1988/40/12/305
- [18] PGD Dvor. 2006. Kaj je požar? <https://sl.wikipedia.org/wiki/Po%C5%BEar> (Pridobljeno 2.7.2016.)
- [19] Bailey, C. 2011. Behaviour of timber in fire. One Stop Shop in Structural Fire Engineering. Manchester, University of Manchester. <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/materialInFire/Timber/default.htm> (Pridobljeno 2.7.2016.)
- [20] Granfola, S., 2008. Požari in vzroki za nastanek požara. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za logistiko. (mentor Novak, Š.): 65 str.
- [21] Bukovec, P. 2008. Razvojno raziskovalni projekt v okviru ciljnega raziskovalnega programa – »Razvoj učnih sredstev za ugotavljanje varstva pred požarom«. Končno poročilo. Ljubljana, Ministrstvo za obrambo: 47 str.
- [22] Josh. 2010. The 4 Stages of Fire. Journey to Firefighter blog, objavljeno 27.9.2010 <http://journeytofirefighter.com/4-stages-of-a-fire> (Pridobljeno 3.7.2016)
- [23] American Wood Council. 2011. Fire performance of wood products awareness guide. Leesburg, ZDA. 10 f.
- [24] Wabl, A. 2012. Brandschutz im mehrgeschossigen Holz-Massivbau. Masterarbeiten. Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz. [http://www.holzbauforschung.at/fileadmin/products\\_online/bsp\\_online/DA/MA\\_Wabl.pdf](http://www.holzbauforschung.at/fileadmin/products_online/bsp_online/DA/MA_Wabl.pdf) (Pridobljeno 3.7.2016.)
- [25] Gandy, D. 2015. Razredi gorljivosti gradbenih materialov. Finance (24. avg. 2015) 163,2015 <http://gradbenistvo.finance.si/8834748> (Pridobljeno 1.9.2016.)
- [26] Bandara, L. 2013. Fire protection coatings. Wood Fire Protection blog, objavljeno 1.9.2013. [http://wood-fire-protection.blogspot.si/2013\\_09\\_01\\_archive.html](http://wood-fire-protection.blogspot.si/2013_09_01_archive.html) (Pridobljeno 4.7.2016.)
- [27] Tehnična smernica TSG-1-001:2010. Požarna varnost v stavbah. Ministrstvo za okolje in prostor: 60 str.
- [28] Pravilnik o zasnovi in študiji požarne varnosti. Uradni list RS, št. 12/2013.
- [29] Zakon o graditvi objektov (ZGO-1). Uradni list RS, št. 102/2004.
- [30] Zakon o varstvu pred požarom. Uradni list RS, št. 3/2007.

- [31] Alter, L. 2015. World's tallest timber tower built in British Columbia. Tree Huger blog, objavljeno 29. okt. 2015. <http://www.treehugger.com/green-architecture/worlds-tallest-timber-tower-be-built-british-columbia.html> (Pridobljeno 4.7.2016.)
- [32] Klippel, M., Schmid, J., Frangi., A., 2016. Fire design of CLT, COST CLT Conference
- [33] Ratej, J. 2015. Strokovna ekskurzija v podjetje Hoja d.d. Študentski most: 40, oktober 2015, 26-27.
- [34] Gagnon, S., et al. (2013). CLT: Introduction to cross-laminated timber. CLT Handbook. FPInnovations. Pointe-Claire (QC), FPInnovations.
- [35] Hozjan, T. 2016. Določitev požarne odpornosti konstrukcijskih elementov. Študijsko gradivo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko.
- [36] Stora Enso. 2016. Fire Protection of CLT. Wien, Austria.  
<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/CLT-Documentation-on-fire-protection-EN.pdf> (Pridobljeno 15.7.2016.)
- [37] EN 1995-1-2:2011. Eurocode 5, Design of Timber Structures – General – Structural Fire Design. Brussels, European Committee for Standardisation.
- [38] EN 520:2004+A1:2009. Gypsum plasterboards. Definitions, requirements and test methods.
- [39] Green, M. (2012). The Case for Tall Wood Buildings. M. A. Design. Vancouver, Canada, MGB Architecture + Design.
- [40] Skidmore Owings & Merrill LLP. 2013. Timber Tower Research Project. O. Skidmore, & Merrill, LLP. Chicago, Illinois, USA.
- [41] Lopatič, J., 2016, Posebnosti pri dimenzioniranju nosilnih elementov iz lesnih proizvodov. Študijsko gradivo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za masivne in lesene konstrukcije. Str. 29-30
- [42] Blass, J., Fellmoser, P. (2004). Design of solid wood panels with cross layers. 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, Finland. **2**: 543-548.
- [43] Emberley, R., Torero, J. L., 2015. Cross-laminated timber failure modes for fire conditions. In: Dilum Fernando, Jin-Guang Teng and Jose L. Torero, Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015). International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering, Brisbane, QLD, Australia, (1023-1030). 9-11 December, 2015.
- [44] Humar, M., 2008. Proliza in protipožarna zaščita lesa. Študijsko gradivo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- [45] Schmid J., König J., Köhler J. 2010. Fire-exposed cross-laminated timber – modelling and tests”, In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trentino, Italy.

- 
- [46] Schmid, J., König, J., Just A. 2012. The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire –Background, Limitations and New Developments, *Structural Engineering International*, Volume 22, Number 4, November 2012, p. 514-522(9).
- [47] AF&PA. 2005. National Design Specification (NDS) for wood construction. Washington, DC: American Forest & Paper Association
- [48] Frangi A., König J. 2011. Effect of increased charring on the narrow side of rectangular timber cross-sections exposed to fire on three or four sides, *Fire and Materials* 2011; 35(8): 593–605.
- [49] Ollis, W. J. B., Partl, M., Strassler, H. 1977. Standard Tests and Calculation of Fire Resistance in timber, Munich, Germany.
- [50] König, J. 1955, Fire resistance of timber joists and load bearing wall frames, Swedish Institute for Wood Technology, Research. Report I 9412071, Stockholm, Sweden.
- [51] Fornater J., Bergmeister K., Hochreiner G. 2001. Versuchsbericht – Kleinbrandversuchsreihe 2. Teil 1 KBV 2/1 –Versuche mit Rissen“, Universität für Bodenkultur, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Vienna, Austria.
- [52] König J., Walleij L. 1999. One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially protected and non-protected fire situations. Institute for Wood Technology Research, Report No. I 9908029, Stockholm, Sweden.
- [53] Erchinger, C.D. 2009. Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall. Doktorska disertacija. Zürich, ETH Zurich, Switzerland.
- [54] EN 13381-7:2010. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 7: Applied protection to timber.
- [55] Schmid J. Menis A., Fragiaco M., Clemente I., Bochicchio G. 2015. Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions. *Fire technology*.
- [56] Frangi A., Fontana M., Knobloch M., Bochicchio G. 2008. Fire behavior of cross-laminated solid timber panels. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Ninth international Symposium*, S. 1279–1290, Karlsruhe.
- [57] Frangi A., Fontana M., Hugi E., Jöbstl R. 2015. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. *Fire Safety Journal*, 44, S. 1078–1087.
- [58] Teibinger M., Matzinger I. 2011. Basis for evaluation of the fire resistance of timber constructions. Technical report. *Holzforschung Austria Final Report*, Wien.
- [59] Wilinder P. 2010. Fire resistance in cross-laminated timber. Magistrska naloga, Jönköping , Jönköping University.
- [60] Craft S., Desjardins R., Mehaffey J. 2011. Investigation of the Behavior of CLT panels exposed to fire. 12th International Conference Fire and Materials, San Francisco.



- [61] Friquin K., Grimsbu M., Hovde P. 2010. Charring rates for cross-laminated timber panels exposed to standard and parametric fires. 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda.
- [62] Gustafsson A. 2010. Bärförmåga för treskikts korslimmad träskiva vid brand. Technical report, SP Träteknik, Stockholm.
- [63] Osborne L., Dagenais C., Bénichou N. 2011. Preliminary CLT Fire Resistance. Technical report, Advanced Building Systems – Serviceability and Fire Group, Point-Claire, Canada.
- [64] Menis A. 2012. Fire Resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-laminated timber elements. Doktorska disertacija. Cagliari, Università degli studi di Cagliari, Italy.
- [65] Aguanno M. 2013. Fire resistance tests on cross-laminated timber floor panels: An experimental and numerical analysis. Master Thesis. Ottawa, Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- [66] Schmid J., Menis A., Fragiaco M., Boström L., Just A., Gustafsson A., Boichichio G. 2013. The load-bearing performance of CLT wall elements in full-scale fire tests. 13th International Fire science & Engineering conference, University of London, 24-26th June, London.
- [67] Klippel, M., Leyder, C., Frangi, A., Fontana, M., Lam, F., Ceccotti, A. 2014. Fire tests on Loaded Cross-Laminated Timber Wall and Floor Elements. 11th International Symposium, Christchurch, New Zealand.
- [68] prDIN 2000-8:2015. Application of construction products in structures – Part 8: Cross laminated timber for structural use according to DIN EN 16351.
- [69] Östman et al. 2010. Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe. SP Report 2010:19.
- [70] König, J., Schmid, J. 2007. Bonded timber deck plates in fire. CIB-W18-40th Meeting, Bled, Slovenia, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany.
- [71] EN 16351:2015 Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. Brussels, European Committee for Standardisation.
- [72] Directive 89/106/EEC. Commission Decision of 8 February 2000 implementing Council as regards the classification of the reaction to fire performance of construction products. Official Journal of the European Communities No L 50. 23.2.2000. Pp. 14-18.
- [73] Frangi, A., Fontana, M. 2003. Charring rates and temperature profiles of wood sections, Fire and Materials 2003; 27(2): 91-102.
- [74] König, J., Rydholm, D. 2003. Small-scale fire tests of heavy timber components. Swedish Institute for Wood Technology Research. Report P 0310036, Stockholm.
- [75] König, J. 2002. Basic and notional charring rates. Conference CIB W18, Meeting 35, Paper 35-16-1.

- 
- [76] 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.
- [77] Schmid J., König J. 2010. Cross Laminated Timber in Fire, SP Report 2010:11, Stockholm.
- [78] Fragiaco, M., Menis, A., Clemente, I., Bochicchio, G., Ceccotti, A. 2013. Fire Resistance of Cross-Laminated Timber Panels Loaded Out of Plane. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 139, No. 12, 04013018.
- [79] Kreith, M. S. B. F. 2001. Principles of Heat Transfer 6th Edition, Brookes/Cole.
- [80] Sultan, M. A., Roy-Poirier, A., 2007. Gypsum Board Fall-Off Temperature in Floor Assemblies Exposed to Standard Fires. Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
- [81] Rahmanian, W., Wang, Y. 2009. Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures. Czech Technical University Publishing House.
- [82] Cramer, S. M., Friday, O. M., White R. H., Sriprutkiat, G. 2003. Mechanical Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures. University of Wisconsin-Madison, Madison.
- [83] Park, S. H., Manzello, S. L., Manzello, D. P., Mizukami, T. 2009. Determining Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures. John Wiley & Sons Ltd, Gaithersburg.
- [84] Manzello, S. L., Park, S. H., Mizukami, T., Bentz, D. P. 2008. Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperatures. 5th International Conference on Structures in Fire, Nanyang Technological University, Singapore.
- [85] Osborne, L., Dagenais, C. 2012. CLT Fire Resistance Testing. Final Report. FP Innovations, Ottawa.
- [86] Buchanan, A. H. 2002. Structural Design for Fire Safety, John Wiley & Sons Ltd.
- [87] Bartlett et. al. 2015. Analysis of cross-laminated timber upon exposure to non-standard heating conditions.
- [88] CAN/ULCS 101-07:2007. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials. 4th Edition, Ottawa.
- [89] SIST EN 1194:2000. Lesene konstrukcije – Lepljeni lameliran les – Trdnostni razredi in ugotavljanje značilnih vrednosti.
- [90] Strabag d.o.o. 2016. Arhitekturna zasnova in postopek gradnje objekta Brdo F3. Osebna komunikacija. (15.4.2016).
- [91] Hozjan, T. 2016. Postopki projektiranja požarno-varnih lesenih konstrukcij. Študijsko gradivo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko.
- [92] Saidu, S. V. 2011. Fire Performance of Materials – Wood, Gypsum Board, Limestone, Concrete and Steel. Master Thesis.. Ottawa, Carleton University, Department of Civil and Environmental Engineering. 173 f.

- [93] Fragiacomio, M., Menis, A., Clemente, I., Bochicchio, G., Tessadri, B. 2012. Experimental and numerical behaviour of cross-laminated timber floors in fire conditions. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand.
- [94] Geregorič, R., 2016. Parametrična študija požarne odpornosti enostavnih lesenih elementov. Diplomaska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Hozjan, T., somentorica Ogrin, A.): 65 str.