



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Zemánek</u>	Jméno: <u>Pavel</u>	Osobní číslo: <u>380362</u>
Zadávací katedra: <u>K 134</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Integrovaná bezpečnost staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>POSUZOVÁNÍ POŽÁRNÍCH PODHLEDŮ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ A POROVNÁNÍ S EUROKÓDEM</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>ASSESSMENT OF FIREPLACES OF WOODEN STRUCTURES AND COMPARISON WITH THE EUROCODE</u>	
Pokyny pro vypracování: Cílem diplomové práce je vypracování podrobné studie chování požárních podhledů dřevěných konstrukcí. Práce obsahuje analytické posouzení předmětných konstrukčních prvků, numerické simulace přestupu tepla konstrukcí pomocí programu na bázi metody konečných prvků a porovnání dosažených výsledků s experimentem.	
Seznam doporučené literatury: Skripta katedry K134 a příslušné technické normy.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Lukáš Blesák Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
..... Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

..... Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)
--------------------------------	------------------------------

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

K134 Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

POSUZOVÁNÍ POŽÁRNÍCH PODHLEDŮ DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ A POROVNÁNÍ S EUROKÓDEM

ASSESSMENT OF FIREPLACES OF WOODEN STRUCTURES AND
COMPARISON WITH THE EUROCODE

Zpracoval: Bc. Pavel Zemánek

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Blesák Ph.D.

2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posuzování požárních podhledů dřevěných konstrukcí a porovnání s eurokódem“ vypracoval sám pod odborným dohledem pana Ing. Lukáše Blesáka Ph.D. a informace čerpal z uvedené literatury nebo provedeného experimentu.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7.1. 2018

Pavel Zemánek

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat Ing. Lukášovi Blesákovi za vedení mé diplomové práce, jeho cenné rady, vstřícnost a odborný dohled. Další patří všem kolegům, kteří se podíleli na výstavbě a projekční fázi experimentálního slaměného objektu. V neposlední řadě také moji rodině, která mi byla oporou po celé studium.

Obsah

Abstrakt	III
Abstract	III
Seznam použitých symbolů a zkratk	IV
1 Úvod	5
1.1 Motivace	5
1.2 Cíle práce	6
2 Současný stav poznání	7
2.1 Dřevo	7
2.1.1 Rostlé dřevo za požáru	7
2.1.2 Hloubka zuhelnatění	8
2.1.3 Plášť požární ochrany dřevěných prvků	10
2.1.4 Tepelná vodivost a kapacita dřeva	12
2.2 Minerální tepelné izolace	13
2.2.1 Technologie výroby minerálních vláken	14
2.2.2 Skelné vlákno	15
2.2.3 Kamenná (čedičová) vlákna	16
2.2.4 Minerální izolace za zvýšených teplot	16
3 Realizace experimentu - požár slaměného objektu s dřevěnou střešní konstrukcí ..	18
4 Analytické výpočty hloubky zuhelnatění dřevěného trámu ve střešní konstrukci ...	25
4.1 Analytický výpočet	26
4.1.1 Skelné vlákno, OSB 12 mm	26
4.1.2 Prázdňá dutina mezi trámy, OSB 12 mm	28
4.1.3 Kamenné vlákno, OSB 12 mm	30
5 Tepelná analýza střešní konstrukce pomocí programu Atena	34
5.1 Dřevěný trám s výplní kamenného vlákna	39
5.1.1 Výpočet trámového stropu s výplní dutin z kamenného vlákna po 30 minutách normového požáru	47
5.1.2 Výpočet trámového stropu s výplní dutin z kamenného vlákna po 45 minutách normového požáru	48
5.2 Dřevěný trámový strop s výplní dutin ze skelného vlákna	50
5.2.1 Tepelná analýza dřevěného trámového stropu s výplní dutin ze skelného vlákna po 30 minutách	53
5.2.2 Tepelná analýza dřevěného trámového stropu s výplní dutin ze skelného vlákna po 45 minutách	54
6 Výsledné grafy průběhů teplot experimentu a tepelné analýzy	56
6.1 Střed trámu	56
6.2 Spodní hrana trámu	57
6.3 Střední hrana trámu	58
7 Závěr	60
Seznam obrázků	61

Seznam tabulek	63
Literatura	64

Abstrakt

Tato diplomová práce má čtyři hlavní části. První se zabývá teoretickým úvodem do základních materiálových charakteristik dřeva, plášťů požární ochrany, minerálních izolací ze skelného a kamenného vlákna. Hlavní charakteristiky jsou tepelná vodivost a tepelná kapacita v závislosti na vzrůstající teplotě a degradace materiálu za vysoké teploty. Druhá část se zabývá analytickým výpočtem míry zuhelnatění a požární odolnosti dřevěných stropních nosníků s dutinami vyplněnými minerálními vlákny s pláštěm z OSB desek. Ve třetí části budou analytické výpočty porovnány s výsledky programu ATENA, do které bude model konstrukce zadán přes program GID. Poslední čtvrtou částí bude zhodnocení všech výsledků s velkorozměrovou požární zkouškou slaměného objektu s daným konstrukčním řešením střechy.

Klíčová slova

Dřevo; požár; požární bezpečnost; požární odolnost; minerální vlákna; skelná vlákna; hořlavost dřeva; dřevěné požární pláště

Abstract

This diploma thesis has four main parts. The first deals with a theoretical introduction to basic material characteristics of wood, fire protection sheaths, mineral insulations made of glass and stone fibers. The main characteristics are thermal conductivity and thermal capacity in dependence on increasing temperature and material degradation at high temperature. The second part deals with the analytical calculation of carbonaceous and fire resistance of wooden ceiling beams with cavities filled with mineral fibers with the cover of OSB and plasterboards. In the third part, the analytical calculations will be compared with the results of the ATENA program, in which the model of construction will be entered through the GID. The last fourth part will be the evaluation of all the results with the large-scale fire test of the straw object with the given roof design.

Keywords

timber; fire; fire safety; fire resistance; mineral fiber; glass fiber; wood flammability; ceiling; wooden fire envelope

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
d_{char}	Hloubka zuhelnatění	mm
t	Doba účinku požáru	min
T	teplota	°C

Řecké symboly

α	Součinitel přestupu tepla	W/(m ² ·K)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³
β_0	Jednorozměrná rychlost zuhelnatění	mm/min

Zkratky

OSB	Oriented Strand Board (dřevovláknitá deska)
SDK	Sádrokarton
ATENA	Advanced tool for engineering nonlinear analysis
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT
GID	Global innovation design

1 Úvod

Práce se dřevem má dávnou historii a i v dnešní moderní době je neustále zdokonalována. Využití tohoto materiálu ve stavebnictví je z hlediska historie velmi zajímavé, střídaly se období, kdy bylo dřevo nejpoužívanějším materiálem a následně období, kdy bylo téměř zakázáno (např. dvorní dekret z roku 1816 zakazující dřevostavby v českých zemích).

Využití dřeva na počátku třetího tisíciletí je limitováno hlavně z hlediska požární výšky. Největší omezení z evropských zemí je v České a Slovenské republice, jinde ve světě nejsou dřevostavby tolik omezené a naopak vyvíjí snahu stavět budovy na bázi dřevěných nosných konstrukcí s omezením materiálově pevnostních kritérií než požárních. Tento trend je rozhodně trendem, který bychom i ve střední Evropě mohli následovat.

Přístup okolních zemí oceňuji nejen vzhledem k přednostem dřeva v environmentálních vlastnostech, rychlosti výstavby, jednoduchému zpracování a dostupnosti, ale ve své podstatě i požární odolnosti, která bude hlavním předmětem této práce.

1.1 Motivace

V rámci tohoto výzkumu se snažím posunout znalosti o chování dřevěných konstrukcí za požáru, jejich požární bezpečnosti a odolnosti. Důležitým bodem, který mě vede je špatná osvěta a neinformovanost laické veřejnosti, ohledně obavy využití dřeva ve stavebnictví jako riziko spojené s hořlavostí materiálu.

Možnost podílet se na tomto výzkumu, kde si vlastníma rukama postavíme objekt na bázi přírodních materiálů s následným provedením požární zkoušky je pro mě neuvěřitelná zkušenost a hlavně možnost, jak dokázat i široké veřejnosti, že stavby na bázi hořlavých nosných materiálů jsou s dostatečně vysokými požárními odolnostmi, které často převyšují například i ty ocelové. Příležitost publikovat články této práce o dobrých protipožárních vlastnostech dřevěných konstrukcí a možnost představení požární zkoušky při jejím provádění radím mezi velké klady.

A tím se dostávám k základní věci této diplomové práce, kde budu posuzovat dřevěnou konstrukci střechy na slaměném objektu, výpočtu její požární odolnosti a míře zuhelnatění jak podle analytických výpočtů podle eurokódů, tepelnou analýzou ve výpočtových softwarech, tak potvrzením výsledků požární zkouškou.

Hlavní náplní práce je článek z normy ČSN EN 1995-1-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru (1), kde je uvedeno, že únosnost nosníků a sloupů v sestavách vyplněných izolací z minerálních vláken a bez izolace je počítáno s odhořením obvodového pláště a následnou redukcí průřezu nosného prvku, než dojde ke kolapsu konstrukce. Při použití skelného vlákna se však počítá pouze s odhořením obvodového pláště a následně je v normě uvedeno, že po této době se předpokládá porušení prvku.

1.2 Cíle práce

Princip výpočtu požární odolnosti nosníků a sloupů s využitím izolace ze skelného vlákna je diskutabilní, protože konstrukce bude i po odhoření obvodového pláště stále odolávat účinkům požáru a plnit nosnou funkci vzhledem ke stále téměř neredukovanému průřezu nosného prvku po odhoření ochranné vrstvy. Rozdíl by měl být pouze ten, že skelná izolace degraduje při teplotách cca 500 - 600 °C, čímž při dosažení této teploty může docházet k odlišnému odhořívání trámu z jeho boční části oproti použití izolace z kamenného vlákna. (2) (3)

Hlavní částí experimentu je tak velkorozměná požární zkouška střešní konstrukce krovu s použitím minerální a skelné izolace s hypotézou, že při porušení ochranné konstrukce u skelného vlákna ke kolapsu nedojde, ale bude možno prvek posuzovat obdobně jako bez použití izolace nebo se bude blížit době kolapsu použití kamenného vlákna. Data budou porovnány s analytickými výpočty, tepelnou analýzou a výstupem teplot z měřících bodů umístěných do konstrukce stropu v experimentu.

2 Současný stav poznání

Úvodem bude potřeba se seznámit se základními požárními charakteristikami použitých materiálů při experimentu. Jedná se hlavně o rychlost odhořívání rostlého dřeva a OSB desek, která závisí na jejich objemové hmotnosti, respektive na tepelné kapacitě a tepelné vodivosti v závislosti na změně teploty.

U minerálních izolací bude sledována izolační schopnost materiálů za zvýšené teploty, respektive změna tepelné vodivosti a jejich degradace za vysokých teplot, která nastane při použití skelného vlákna zhruba při 500°C a pro kamenné vlákno, které degraduje zhruba při 1400 °C. (3)

2.1 Dřevo

Dřevo obsahuje cca 50 % uhlíku, 43 % kyslíku, 6 % vodíku, 0,3 % dusíku a zbytek minerální látky - draslík, sodík, vápník aj. Buněčné stěny dřeva jsou ze sušiny, která se dělí na celulózu, hemicelulózu a lignin. Zbytek obsahuje látky pryskyřičné, dusíkaté, tuky, vosky a barviva. Pokud dřevo obsahuje více pryskyřice a tříslovin, je pak tmavší a odolnější proti hnilobě. (3)

2.1.1 Rostlé dřevo za požáru

Základní stavební prvky dřeva i jiných organických hmot tvoří makromolekuly obsahující uhlík, vodík a kyslík. Mezi nimi existují za normálního tlaku a teploty pevné vazby, které jsou odolné vůči vzdušnému kyslíku. Zvyšováním teploty však dojde k rozkmitání makromolekul a vazby se tím naruší, což zapříčiní rozpadání makromolekul na menší stavební částice, což jsou monomery, které se vyskytují převážně v plynném skupenství a snadno reagují se vzdušným kyslíkem. Dochází tak k endotermické reakci, při níž začíná sušení dřeva absorbováním tepla. A exotermické reakci, která teplo uvolňuje ve velké míře s probíhající oxidací rozkladných produktů.

Pokud probíhá oxidační proces pomalu, část tepla tak uniká do okolního prostředí. Při určité rychlosti uvolňování tepla, kdy se již teplo nestačí rozptýlit do okolního prostoru, dojde k samozahřívání dřeva, které může vyvrcholit samovznícením, ke kterému může dojít i při zahřívání bez přístupu kyslíku. Tento proces se nazývá suchou destilací. U vnitřní nebo chráněné dřevní hmoty probíhá proces tepelného rozkladu s omezeným přístupem vzduchu s doprovázeným světelným efektem bez plamenů – tzv. žhnutí nebo bezplamenné hoření.

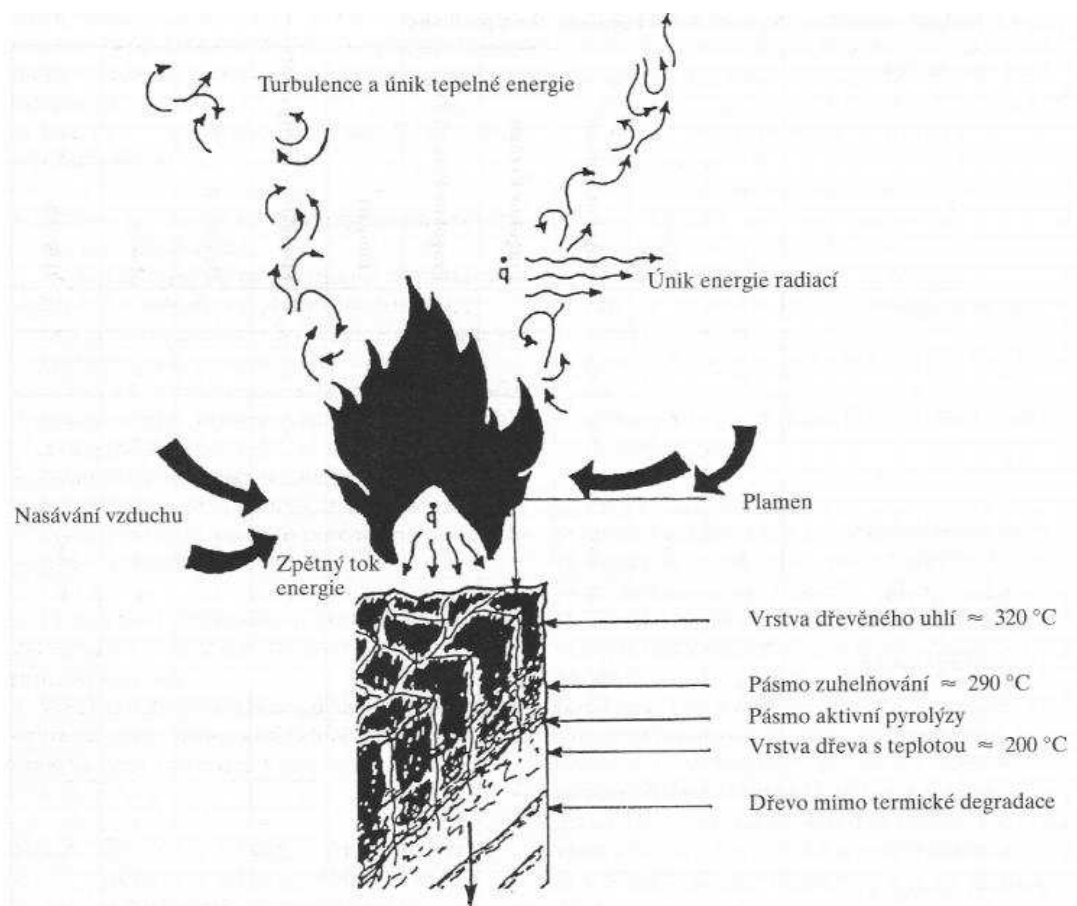
Nejnižší teplota, při které se dřevo při přiblížení plamene vznítí a opět zhasne, se pohybuje mezi 180 – 275 °C. Nejnižší teplota, při které se zahříváním látky vyvine takové množství plynů, že při přiblížení plamene plyny vzplanou a hoří déle, než 5 sekund bez přerušení, se nazývá bod hoření, pohybuje se v intervalu mezi 260 – 290 °C. Bod vznícení je nejnižší teplota, při které se dřevo na vzduchu samostatně bez pomoci otevřeného plamene vznítí

a pohybuje se v rozmezí 330 – 470 °C. Za kritickou mez deformace zatížené nosné dřevěné konstrukce se počítá s hodnotou průměrné teploty jádra 120 °C a teplotou vznícení na povrchu 300 °C.

2.1.2 Hloubka zuhelnatění

Pokud je dřevěný konstrukční prvek zasažen požárem, jeho povrch velmi intenzivně hoří do doby, než se vytvoří na povrchu zuhelnatělá vrstva dřevní hmoty, která brání přístupu vzdušného kyslíku do vnitřní části prvku, tlumí hoření a dobře tepelně chrání nezasaženou část. Díky tomu je při požáru trvajícím více než 20 minut zhruba v hloubce 30 mm pod zuhelnatělou vrstvou dřevo, jehož teplota je neovlivněná teplotou požáru, viz obr.1

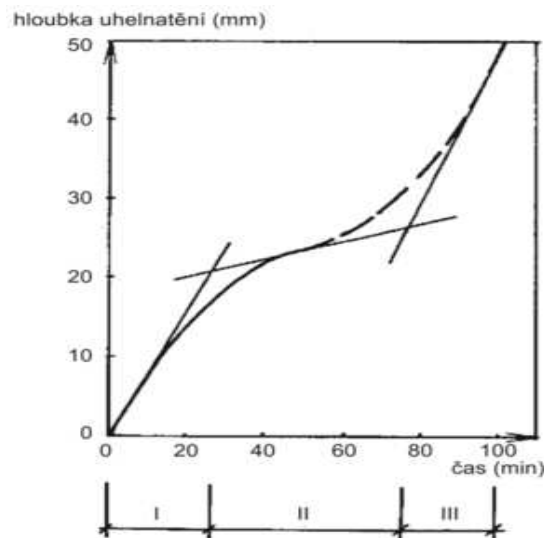
V oblasti prvku zredukovaného průřezu účinkem požáru nedochází ke změně fyzikálních ani mechanických vlastností dřeva a materiálů na bázi dřeva. Únosnost prvku je tak redukována pouze odhořelou vrstvou. (4)



Obr. 1: Proces hoření dřeva

zdroj: <http://drevari.humlak.cz>

Četnými zkouškami byla zjištěna lineární závislost mezi zuhelnatěním a dobou požáru u dřeva a materiálů na bázi dřeva, viz obr. 2. Pro výpočty požární odolnosti průřezů se může používat stálá rychlost zuhelnatění.



Obr. 2: Rychlost odhořívání nechráněného dřeva zahříváného konstantní teplotou 800°C

zdroj: KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*(3)

Rychlosti zuhelnatění dle ČSN EN 1995-1-2 (1) se rozdělují na dvě hodnoty:

1. Jednorozměrná návrhová rychlost zuhelnatění

Platí pro jednorozměrné zuhelnatění a má se uvažovat neměnná v čase, hodnoty β_0 a β_n jsou uvedeny v tab. 1.

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t \quad [1]$$

kde $d_{\text{char},0}$ je návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění
 β_0 je jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení normového požáru dle tab. 1
 t doba vystavení účinkům požáru

2. Nominální návrhová rychlost zuhelnatění

Její velikost ji zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin, uvažuje se konstantní v čase.

$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t \quad [2]$$

kde $d_{\text{char},n}$ je návrhová nominální hodnota hloubky zuhelnatění, která zahrnuje účinek zaoblení rohů
 β_n je nominální návrhová rychlost zuhelnatění, jejíž rozsah zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin dle tab. 1

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Dřevo jehličnatých stromů a buk		
Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Dřevo listnatých stromů		
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých stromů s charakteristickou hustotou 290 kg/m^3	0,65	0,7
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých stromů s charakteristickou hustotou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
s charakteristickou hustotou $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Desky		
Dřevěné obložení	0,9 ^a	–
Překližka	1,0 ^a	–
Desky na bázi dřeva jiné než překližka	0,9 ^a	–
^a Hodnoty platí pro charakteristickou hustotou 450 kg/m^3 a tloušťku desky 20 mm.		

Tab. 1: Návrhové rychlosti zuhelnatění β_0 a β_n pro dřevo, LVL, dřevěné obložení a desky na bázi dřeva

zdroj: ČSN EN 1995-1-2 (1)

2.1.3 Plášť požární ochrany dřevěných prvků

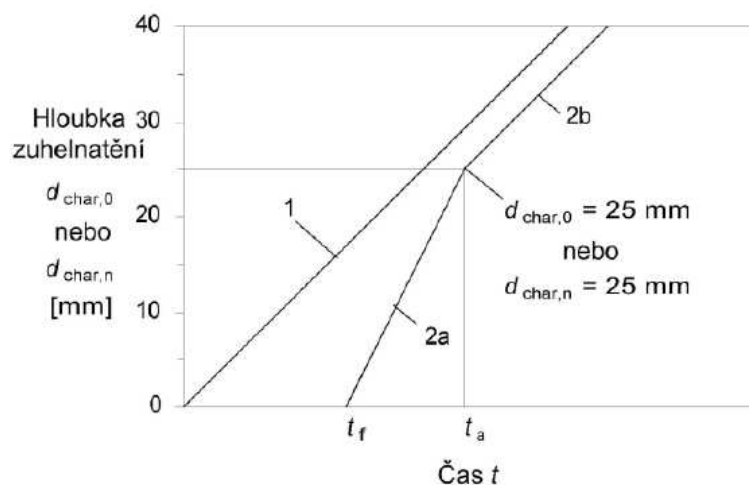
Použití deskových materiálů bylo do nedávné doby aplikovatelné převážně pro tyčové nosné prvky, vývojem materiálů se však dosáhlo větší tvarové flexibility a dnes jsou obklady používány víceúčelově a své protipožární účinky si zachovávají po celou dobu své životnosti.

Na rozdíl od nátěrů značně zatěžují nosnou konstrukci, výhodou však je že na rozdíl při použití např. obezdní, omítek nebo nástříků se obklad vyhne mokrému procesu a umožňuje tak rychlou montáž. U dřevěných nosných prvků na rozdíl od ocele není třeba zachovávat volnou teplotní dilataci a ochranný prvek tak může být montován přímo na konstrukci.

Druhy deskových materiálů:

- sádrokartony
- sádrovláknité desky
- třískocementové desky
- třískovermikulitové desky
- desky na bázi čistého vermikulitu
- vápenosilikátové desky

Desky musí splňovat několik základních konstrukčních zásad. Musí být připevněny k vlastnímu prvku a nikoliv k jiné desce. U vícevrstvých pláštů má být každá deska připevněna zvlášť (přes desku spodní) a boční spoje mají být uspořádány střídavě s roztečí minimálně 60 mm. Rozteče spojovacích prostředků nemají být větší než 300 mm. Pláště, chránící prvek před požárem v době jejich ochrany, prvek chrání, ale zároveň dochází k drobnému přestupu tepla do nosné konstrukce, která po odpadnutí ochranného pláště způsobí po určitou dobu vyšší rychlost odhořívání prvku viz obr. 3. (3)



Obr. 3: Rychlost zuhelnatění pro nechráněné prvky 1, pro chráněné 2a rychlost zuhelnatění ve zvýšené míře, 2b rychlost uhelnatění stejná jako pro nechráněný prvek

zdroj: ČSN EN 1995-1-2(1)

Doba do porušení pláštů požární ochrany pro materiály a desky se určuje na základě zkoušek. Konzervativně lze příspěvek k navýšení požární odolnosti dřevěných konstrukcí pomocí dřevěných obkladových desek vypočítat dle normy ČSN EN 1995-1-2 (1) v odstavci 3.4.3 jako:

$$t_1 = \frac{h_p}{\beta_0} - t_r \quad [3]$$

t_1 - čas porušení obvodového pláště [min]

h_p - tloušťka desky na bázi dřeva [mm]

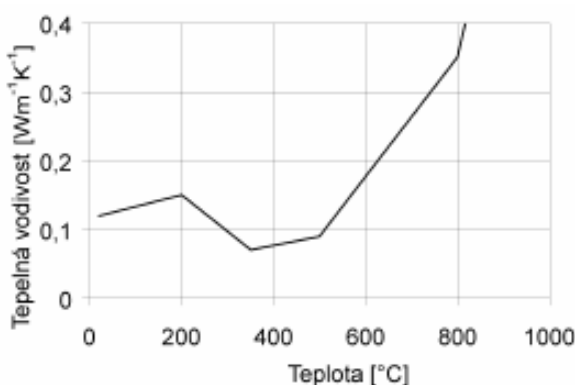
β_0 - návrhová rychlost zuhelnatění [mm/min]

t_r - 4 minuty

2.1.4 Tepelná vodivost a kapacita dřeva

Pro analytické výpočty se převážně využívá rychlosti odhořívání prvku a redukcí zbytkového průřezu. U výpočtu požární odolnosti respektive míře zuhelnatění prvku pomocí softwaru ATENA jsou jako zadávací charakteristiky vhodnější takové, které mění svoje vlastnosti vzhledem k teplotě. A to hlavně tepelná vodivost prvku, kdy po dosažení teploty degradace má vyšší izolační vlastnosti, avšak s následným prohořením dochází vzhledem k degradaci materiálu k jeho vzrůstající tepelné vodivosti zuhelnatělé vrstvy viz obr. 4. (1)

Tepelná kapacita dřeva má zásadní změnu v závislosti na teplotě při zhruba 100 °C, kdy dochází k odpařování veškeré vody a vzdušné vlhkosti z materiálu viz Obr. 5: Vztah teploty a tepelné kapacity pro dřevo a dřevěné uhlí.

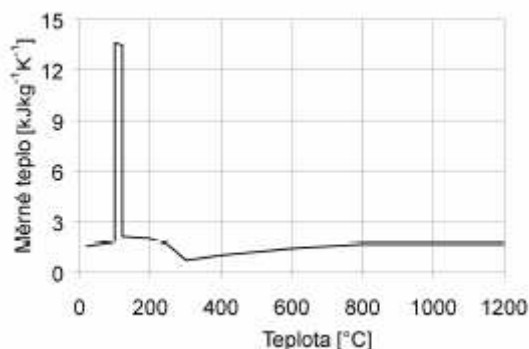


Teplota °C	Tepelná vodivost Wm ⁻¹ K ⁻¹
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1 200	1,50

Obr. 4: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu

Tab. 2: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu

zdroj: ČSN EN 1995-1-2



Teplota °C	Měrné teplo kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Poměr hustoty ^a
20	1,53	1 + ω
99	1,77	1 + ω
99	13,80	1 + ω
120	13,50	1,00
120	2,12	1,00
200	2,00	1,00
250	1,82	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1,00	0,38
600	1,40	0,28
800	1,65	0,26
1 200	1,65	0

^a ω je vlhkost

Obr. 5: Vztah teploty a tepelné kapacity pro dřevo a dřevěné uhlí

Tab. 3: Vztah teploty a tepelné kapacity pro dřevo a dřevěné uhlí

zdroj: ČSN EN 1995-1-2

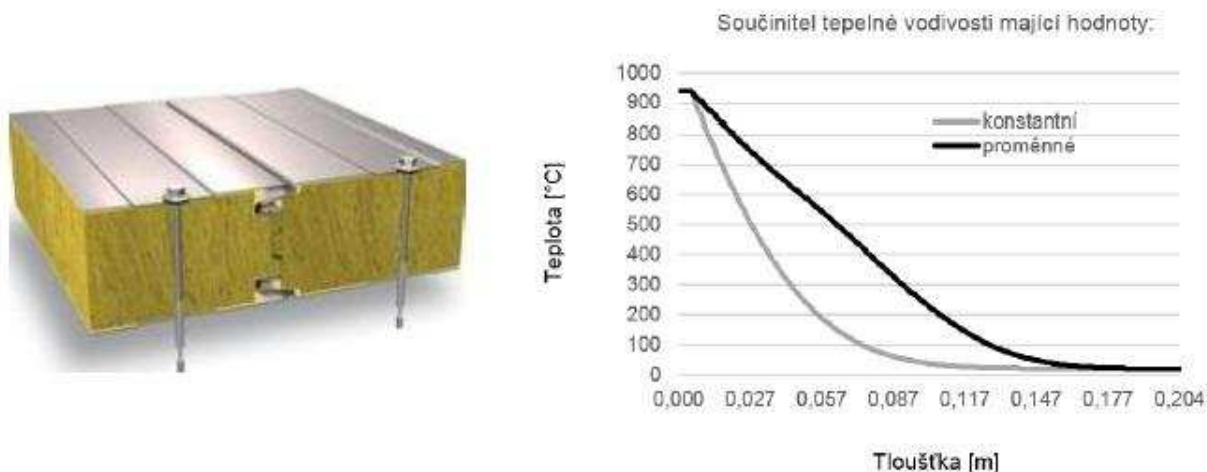
2.2 Minerální tepelné izolace

Tepelně izolační funkci mají v podstatě a v jisté míře veškeré stavební materiály. Jako tepelně izolační materiály považujeme ty, které výrazně zvyšují tepelný odpor konstrukce a součinitel tepelné vodivosti je v suchém stavu menší než $0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. (4)

Minerální izolace je třeba rozdělit do dvou základních skupin a to na čedičová (kamenná) a skelná vlákna. Prioritní rozdíl těchto izolací spočívá v použitém materiálu. Jsou vyráběny z nerostných nebo recyklovaných surovin a jako pojivo slouží organické látky. V případě skelných vláken se jedná o recyklát skla s příměsí hliníkového prášku apod.

Objemové hmotnosti se pohybují zhruba od 15 do cca 250 kg/m^3 . Mají nízký difúzní odpor, což znamená, že izolace je vysoce paropropustná a zajišťuje tak možnost odvodu nežádoucí kondenzace a vlhkosti. Tepelná roztažnost je velmi malá, což je výhodou pro široké použití materiálu v konstrukcích ovlivněných vysokými teplotami. Při použití specializovaných softwarů pro potřeby požární bezpečnosti je důležité dbát na zadávaná vstupních dat jako je měnící se tepelná vodivost v závislosti na teplotě. Z grafu na obrázku č. 6 můžeme vidět, že při modelaci dat s konstantní a proměnou tepelnou vodivostí vzniká v materiálu velký rozdíl teplot. (2) Jedná se o konstrukci panelu skladové haly s následujícími materiály: kovový plech 2 mm, minerální izolant z kamenného vlákna o tloušťce 200 mm a kovový plech 2 mm.

Z grafu je možné poznat, že rozdíl teplot při použití konstantní a proměnné tepelné vodivosti se může pohybovat v řádech stovek $^{\circ}\text{C}$. V tomto příkladu se jedná o maximální hodnotu až $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Jak je také patrné, při užití konstantní λ vycházejí výsledky podhodnocené, což nám negativně ovlivňuje výsledek při výpočtu prostupů tepla od požáru.



Obr. 6: a) Ilustrační obrázek sendvičového panelu s tepelně izolačním jádrem b) Rozdíl teplot při konstantní a proměnné hodnotě součinitele tepelné vodivosti λ

zdroj: Pešková, Zdeňka. Diplomová práce. Vliv účinku požáru na chování tepelných izolantů

2.2.1 Technologie výroby minerálních vláken

První úspěšné výrobky kamenné izolace způsobem tavení hornin vznikly v polovině 19. století v anglickém Walesu s následnou průmyslovou produkcí v Osnabrücku v Německu. Základní surovinou tehdy byla vysokopeční struska. Výsledné produkty byly ve formě volné vlny, které se museli aplikovat na izolované konstrukce až přímo na stavbě.

Až v období 30. let 20. století začala vznikat výroba skelných vláken rozvlákněním strusky při výrobě železa. Po druhé světové válce panovala ve světě surovinová krize a energeticky poměrně náročná výroba minerálních izolací byla nahrazena úspornějšími izolacemi na způsob celulózy. Později se však vrátilo k použití minerálních izolací, jen struska byla nahrazena sklářským pískem.

Při výrobě minerální vlny se používá většinou fenol-formaldehydové pojivo, které pojí vlákna a zároveň jim dodává pevnost, pružnost a životnost. Nejmodernější technologie umožňují ještě více ekologický a udržitelný proces výroby jako dříve. Základem této technologie je pojivo na bázi přírodního inertního polymeru. Pojivo vyrobené pomocí této technologie má stejné funkční vlastnosti jako v tradičních výrobcích z minerální vlny. Lze tedy říci, že tento postup umožňuje eliminovat formaldehyd a fenoly (chemikálie vyráběné z ropy) a nahradit je přírodním pojivem z rychle obnovitelných zdrojů. Tímto způsobem výroby se dá předcházet i vzniku nežádoucích, jinak velmi obtížně využitelných odpadů. (5) Tavení surovin pro přípravu minerální izolace a následné vrstvení materiálu je uvedené na následujícím obr. 7.



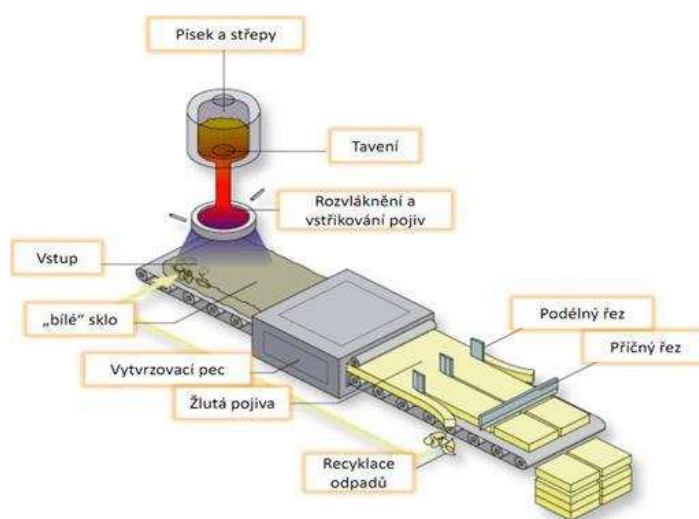
Obr. 7: a) Tavení surovin v kupolové peci; b) Vrstvení materiálu na pohyblivý pás

zdroj: KNAUF INSULATION

2.2.2 Skelné vlákno

Skelné vlákno se vyrábí z běžně se vyskytujících nebo recyklovatelných surovin jako je křemičitý písek, soda, vápenec a recyklované sklo nyní využívané v největším zastoupení. Pojivem těchto základních surovin jsou organické látky. Postup výroby je obdobný jako u minerálních vláken viz obr. 8. s drobnými odlišnostmi. Základní odlišností je hlavní surovina, další pak typ pece, ve které se v případě skelné vlny rozžhavené sklo pomocí rotačního bubnu vpraví do kanálek a přemění se na vlákna o průměru 3 – 7 μm , která padají do vytvrzovací pece. V tuto chvíli mají vlákna již požadovanou teplotu 1400 $^{\circ}\text{C}$, která je potřeba k optimálnímu rozvláknění.

Další odlišností při technologii výroby skelného vlákna je ten, že netvoří odpad ve formě granulí. U technologií, kde je hlavní surovinou minerální materiál na bázi sodného nebo boritého skla vzniká většinou odpad ve formě neuspořádaných sklovitých chomáčů vláken. Materiál se vyrábí od měkkých ohebných rohoží o objemové hmotnosti od 15 kg/m^3 po polotuhé až tvrdé desky s objemovou hmotností až 250 kg/m^3 . Hlavní výhodou skelného vlákna je vysoká prodyšnost, zdravotní a ekologická nezávadnost.



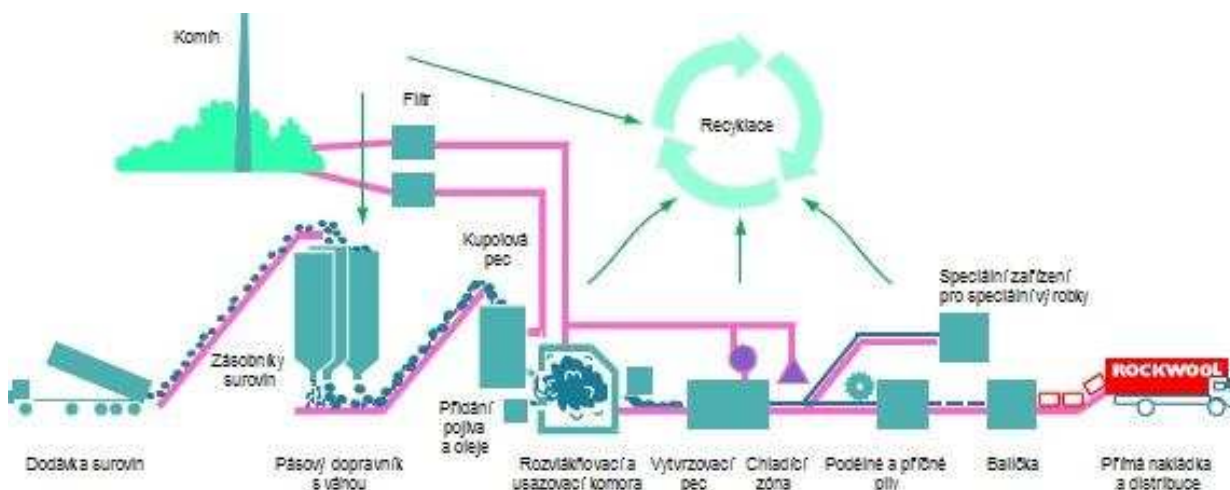
Obr. 8: Technologie výroby skelné minerální vlny

zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz>

2.2.3 Kamenná (čedičová) vlákna

Technologii výroby kamenných minerálních izolačních vláken lze vypořádat u výbuchů sopek, kdy se láva při teplotě 1500 °C ochlazuje v atmosféře a vytváří různé druhy chocholů, je ochlazována větrem a mění se tak na vlákna.

Základní surovinou výroby kamenných vláken je hornina čedič, gabro či diabaz. Poté se vytvoří směs tvořená přibližně ze 75–80 % čediče a 20–25 % strusky. Surovinová směs se taví v tzv. kupolové peci při teplotách 1 350 - 1 450 °C. Tato tavenina putuje na rotující válce, kde je odstředivou silou změněna na malé kapky, které následně dopadají do usazovací komory a vlivem velké rychlosti se roztáhnou do jemných vláken. Následně se přidá pojivo a další přísady. Z usazovací komory je tato zvlněná hmota směřována na technologickou linku, kde se vlákna stlačí a propletnou. Poté putují do vytvrzovací komory, kde jsou zahřívána na teplotu cca 180 – 200 °C z důvodu plné polymerizace syntetické pryskyřice a stabilizaci materiálu. Následně přes přítlačné zařízení vznikají finální výrobky dle požadované objemové hmotnosti a tloušťky. Při výrobě nevznikají žádné zbytky vzhledem k možnosti recyklace výrobního odpadu.



Obr. 9: Obecné technologické schéma výroby minerální vlny z čedičovo-struskové směsi

zdroj: <http://geologie.vsb.cz>

2.2.4 Minerální izolace za zvýšených teplot

Pokud teploty v kamenné minerální izolaci vystoupají nad hodnotu 650 °C, jedná se o tzv. havarijný stav, kterým může být i požár. Při vystoupení teplot až k 1200 °C, který je již při požáru limitní, se začnou tavit i samotná vlákna, materiál začne propouštět teplo a začíná ztrácet své vlastnosti. Při vystavení izolantu teplotám do 650 °C, se jeho životnost pohybuje mezi 50 – 70 roky, což většinou převažuje životnost výrobku, který izoluje. V případě požáru a dosažení teplot nad 650 °C je však nutné vyměnit zasažený izolant za nový.

Chování skelného izolantu za požáru je více problematické. Za vysokých teplot dochází k „ustupování“ před žárem, vytváří kuličky a žmolky, což má negativní důsledek na tepelně izolační schopnosti. (2)

Již zmiňovaným důležitým faktorem pro chování tepelné izolace za zvýšených teplot je jejich tepelná vodivost, která se se vzrůstající teplotou mění. V odborné literatuře lze vyhledat vztah λ závislý na teplotě materiálu. Pro kamenná vlákna se uvádí: (6)

$$\lambda = 0,022 + 0,1475 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}] \quad [4]$$

kde: T...je teplota [K]

Pro izolanty ze skelného vlákna platí vztah:

$$\lambda = 0,03 + 0,2438 \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad [\text{W/m}\cdot\text{K}] \quad [5]$$

Avšak po dosažení hodnot teplot do těchto vztahů a jejich porovnání s experimentálními hodnotami od výrobců, tak dojdeme k závěru, že jsou tyto vztahy velmi nepřesné viz. následující tabulka č. 4.

Teplota T [°C]	λ [W/(m·K)] – kamenná vlákna		λ [W/(m·K)] – skelná vlákna	
	Vypočtená hodnota dle rovnice (2)	Hodnota uváděná výrobcem	Vypočtená hodnota dle rovnice (3)	Hodnota uváděná výrobcem
10	0,025	0,035	0,036	0,035
250	0,043	0,088	0,065	-
500	0,090	0,142	0,143	-
600	0,120	0,182	0,192	-

Tab. 4: Hodnoty součinitele λ vypočtené ze vztahů [4] a [5] a hodnoty udávané výrobcem

zdroj: ROCKWOOL

Na tomto příkladu je vidět, že při použití specializovaného softwaru pro požární odolnost se neobejdeme bez přesných vstupních údajů. Změny tepelné vodivosti v závislosti na teplotě u kamenných vláken jsou k dispozici od výrobců. U skelného vlákna a jeho tepelných změn při požáru s možností užití jako požární ochrany budou vstupní data problematická.

3 Realizace experimentu - požár slaměného objektu s dřevěnou střešní konstrukcí

V rámci studentské grantové soutěže (SGS) byl zrealizován projekt velkorozměrové požární zkoušky slaměného objektu ve spolupráci tří kateder z FSv ČVUT v Praze (Katedra konstrukcí pozemních staveb, Katedra technologie staveb a Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí). Objekt byl postaven na pozemku Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB).

Konstrukční řešení objektu je zvoleno na bázi slámy a dřevěných nosníků tvořících střešní konstrukci. Půdorysné rozměry jsou omezené na 6 x 4 m, nosné stěny tvořené ze slaměných balíků o tloušťce 0,4 m. Střešní konstrukci tvoří dřevěné nosníky z rostlého dřeva pevnostní třídy C24 o výšce 160 mm a šířce 80 mm. Osová vzdálenost nosníků je 625 mm a jsou prostě uloženy na horním dřevěném věnci se světlým rozpětím 3,2 m. Objekt je rozdělen na dvě místnosti stěnou s průchozím otvorem. Střešní trémová konstrukce o dvou polích na sobě bude staticky nezávislá vzhledem k rozdělení na dvě části pro možnost použití v jedné části výplně dutin ze skelného vlákna a ve druhé části pro použití kamenné vlny. Minerální izolace bude kladená do „kapes“ ocelového pletiva upevněného k trámům viz. obr. 10.



Obr. 10: Ukládání minerální izolace do "kapes" pletiva mezi trámy

Rozdělení střechy do dvou polí umožní posuzovat chování konstrukce střechy jako dvou jednotlivých, na sebe vzájemně staticky nezávislých celků. Obkladový materiál trámů na straně požáru bude tvořen OSB deskami tl. 12 mm, nad trámy bude obklad tvořen stejnými typy OSB desek. Nad střešními nosníky, které jsou uloženy v horizontální poloze, bude pultová nadstavba střechy s asfaltovou krytinou. Pro představu je níže obr. č. 11 z realizace objektu před započítáním prací na vnějším omítnutí z hliněné a vápenné omítky.

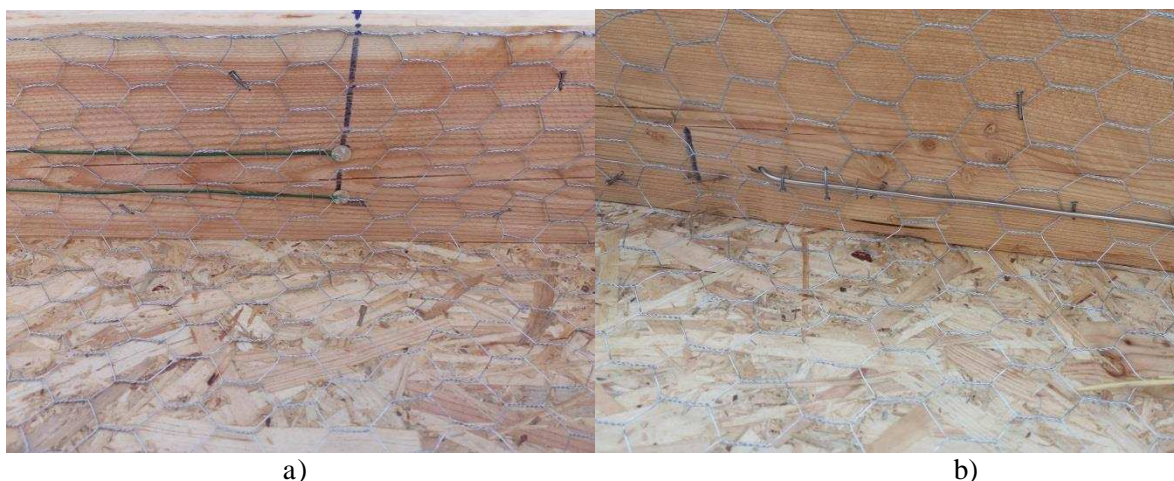


Obr. 11: Experimentální objekt „Slamák“ s neomítnutými slaměnými stěnami

zdroj: foto Bc. Pavel Zemánek

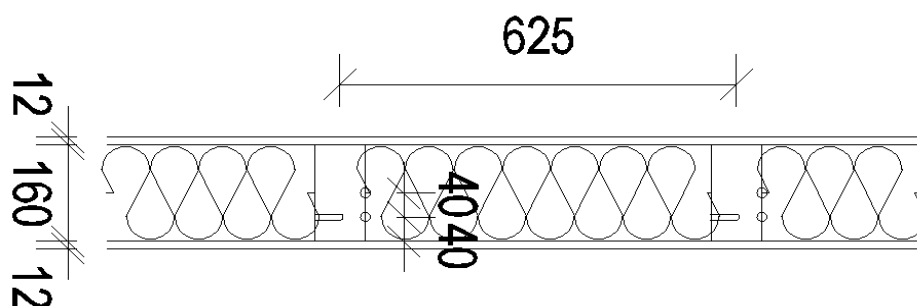
Cíl této práce je ověření, zda při využití izolací ze skelných vláken ve výplních mezi nosníky dojde opravdu ke kolapsu nosné konstrukce po době, kdy přestane ochranná deska plnit svoji funkci ochrany proti požáru. Zásadní výsledek přinese porovnání teplot v nosnících a na styku nosníku s minerální izolací s analytickými výpočty a tepelnými analýzami o účincích ochrany proti požáru od dvou rozdílných minerálních izolací.

Na obr. 12 je vyfocena poloha termočlánků z realizace. V dalším obr. 13 je schématicky nakreslen průřez trámu se zakreslením polohy termočlánků, které budou umístěny na každém nosníku v poli. Použit bude jeden tyčový termočlánek v ose nosníku a to 40 mm od spodního okraje pro zjišťování teploty uvnitř trámu. Dva plošné termočlánky budou umístěny na vnější straně trámu při styku s minerální izolací, kde bude hlavním důvodem zjištění teplot a možnost porovnání účinnosti ochrany minerální izolace od účinků požáru na nosný trám.



Obr. 12: a) Umístění termočládků na boku trámu ve výšce 40 a 80 mm b) umístění termočládku do středu trámu ve výšce 40 mm

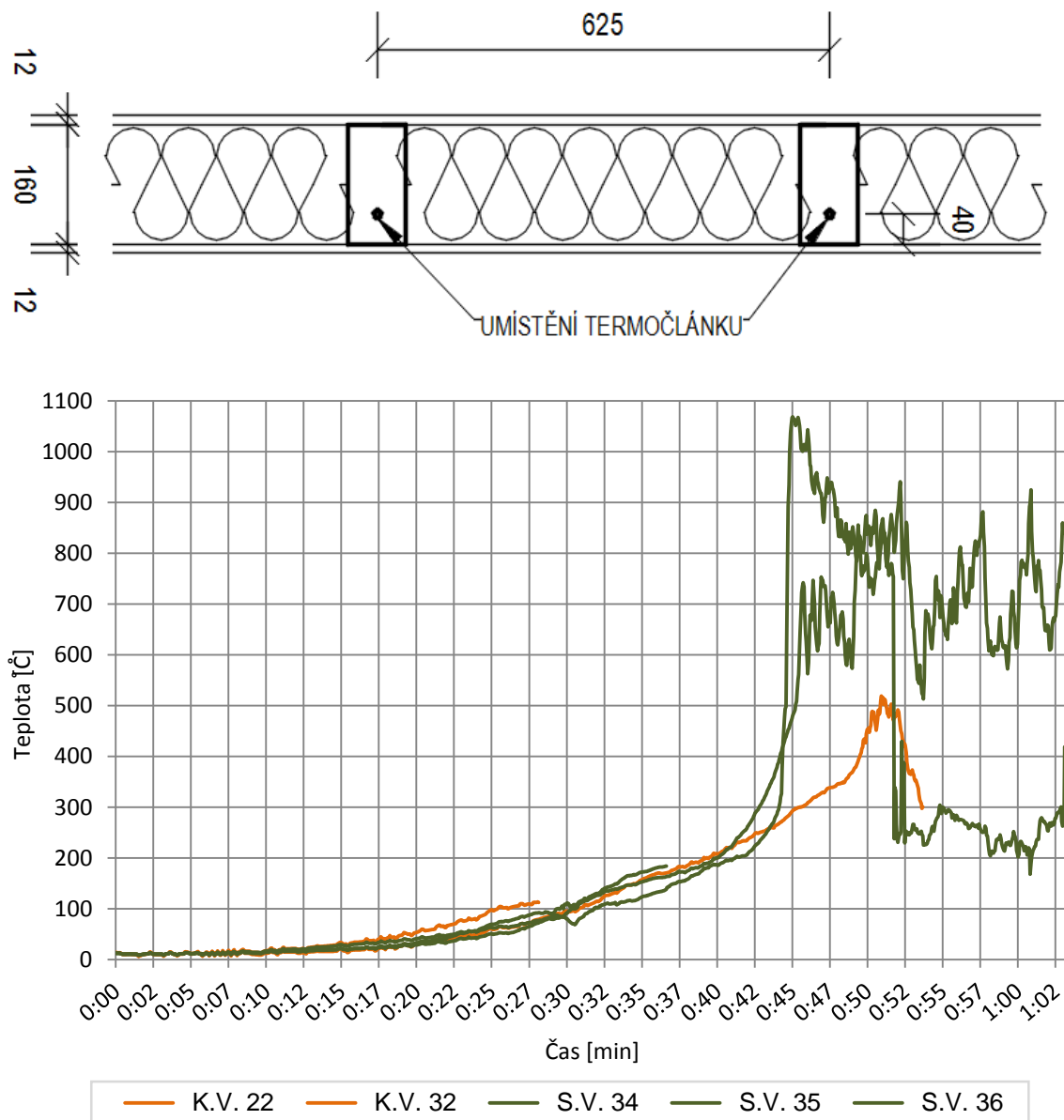
zdroj: foto Bc. Pavel Zemánek



Obr. 13: Průřez posuzovanou stropní konstrukcí

V průběhu experimentu bylo důležité sledovat chování skelného vlákna po zasažení požárem. Vliv použití tohoto materiálu by měl stejně jako kamenná vlákna přispět k ochraně nosníku před požárem a v případě velmi rychlého kolapsu materiálu by měl trám minimálně odolávat požáru s aplikací postupu redukovaného průřezu jako se tak děje v případě využití konstrukce, kde dutiny jsou prázdné. S přístupem uvedeným v normě ČSN EN 1995-1-2 tak má paradoxně konstrukce stropu či stěny s prázdnými dutinami větší požární odolnost než konstrukce vyplněná dutinami ze skelného vlákna.

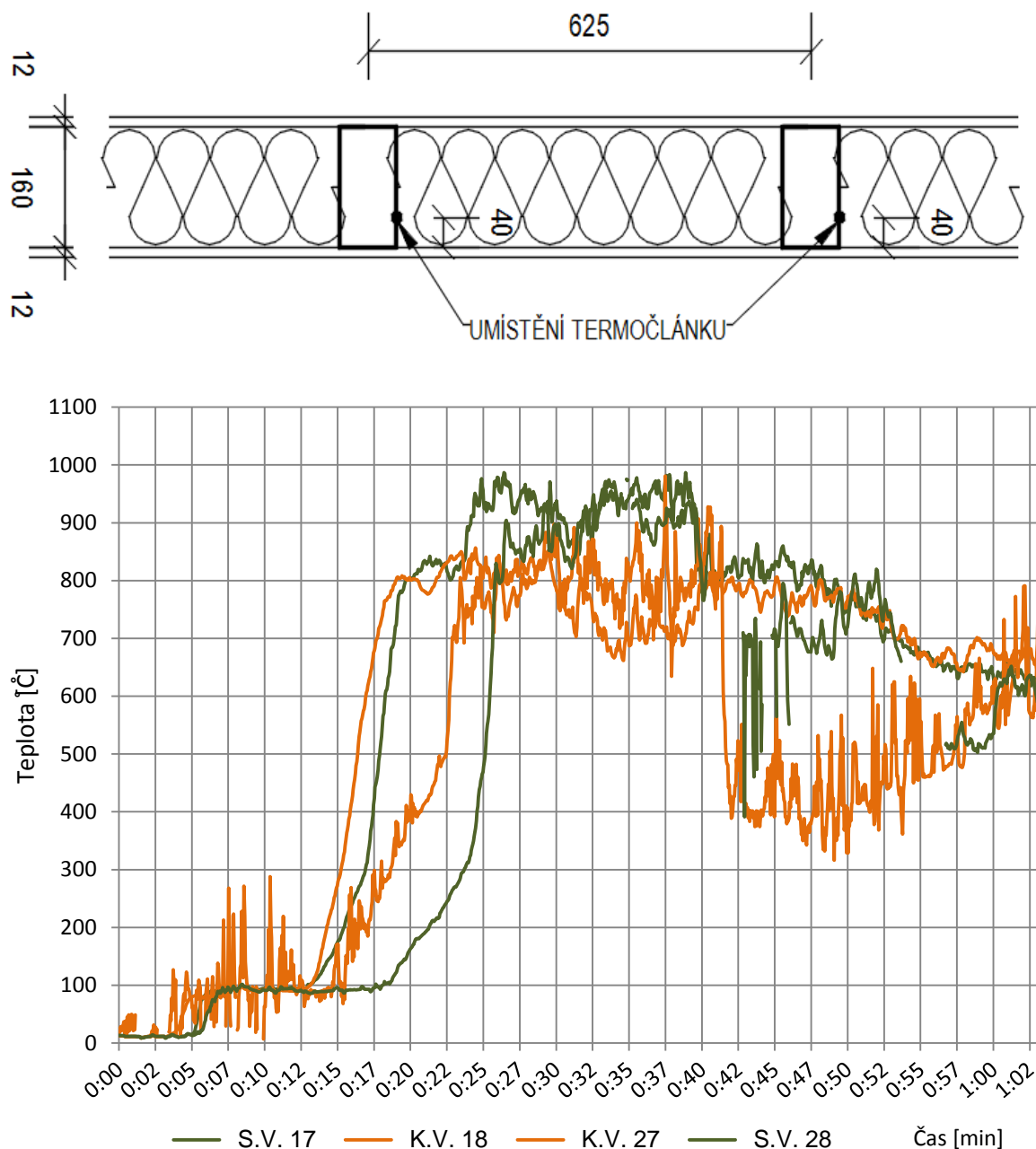
Při plném rozvoji požáru v experimentu po zhruba ve 4. minutě od iniciace nebylo již možné vizuálně pozorovat vnitřní prostor a sledovat tak chování skelného vlákna po odhoření ochranné OSB desky. Ve 30. minutě bylo možné pozorovat, že v obou místnostech odpadlo ocelové pletivo, které do té doby zajišťovalo funkci nosné konstrukce pro minerální izolaci. V grafech jsou některé průběhy teplot ukončené v dřívější fázi, což bylo způsobeno mechanickým zničením nebo chybou měření termočládku.



Obr. 14: Hodnoty teplot plášťového termočláčku v ose trámu 40 mm od spodního okraje

Z grafu na obr. 14 je patrné, že uvnitř trámu nastává po 42. minutě prudký nárůst teploty způsobený tepelným tokem jak ze spodní části trámu, tak přes roh trámu spojený s tepelným tokem bokem trámu skrze minerální izolaci. Jak je možné vidět, u skelné izolace, které se přisuzuje menší požární odolnost, je nárůst teploty strmější pravděpodobně vzhledem k většímu tepelnému toku z boku trámu.

Další věcí, kterou můžeme vyčíst z grafu je, že hlavní zlom ve vzrůstající teplotě uvnitř trámu nastane při dosažení teploty cca 300 °C, což je ovlivněno tím, že dřevo při požáru má dobré tepelně izolační schopnosti a strmý nárůst teploty nastane až těsně před izotermou 300 °C, kde dochází k zuhelnatění dřeva.

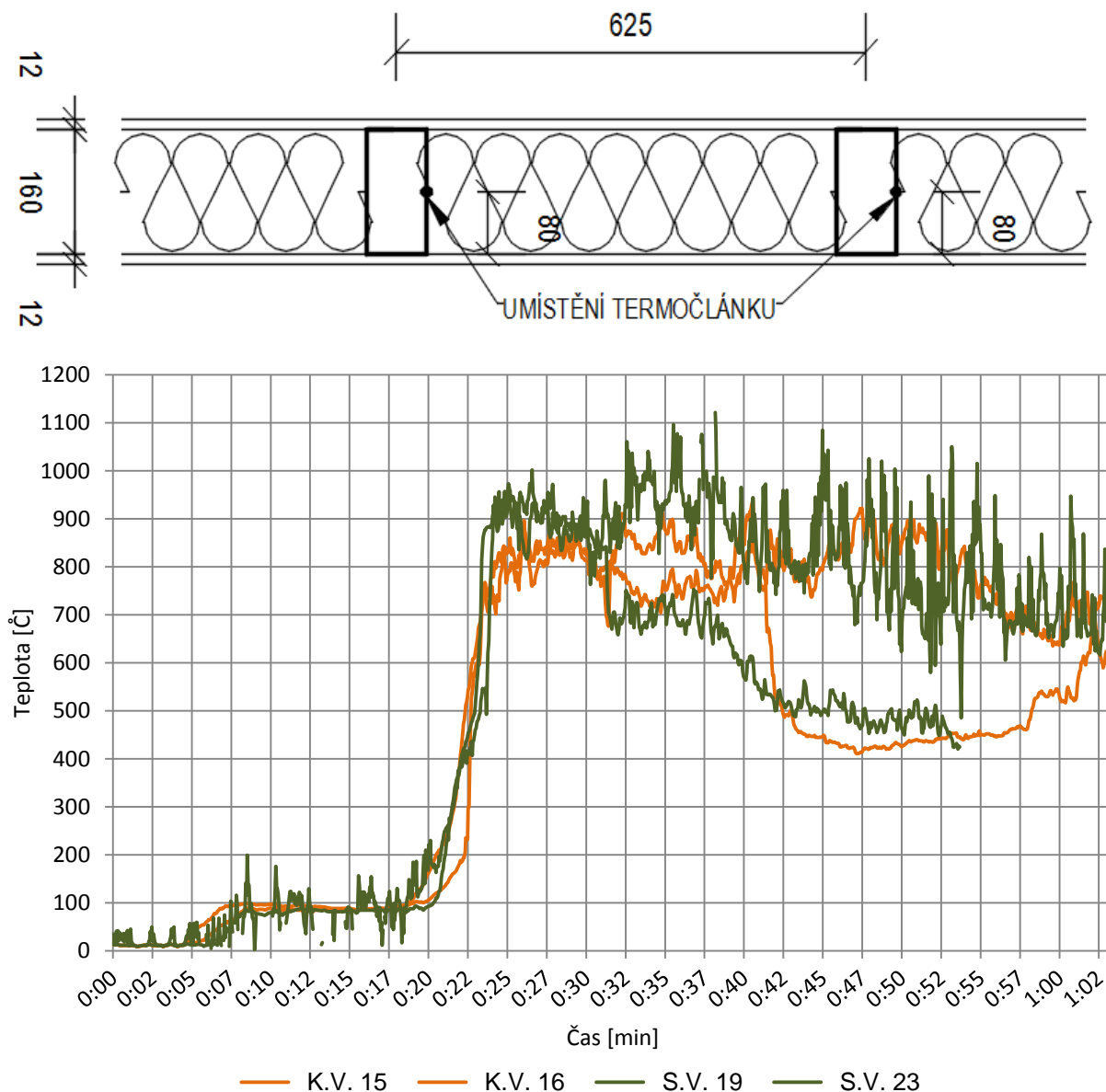


Obr. 15: Hodnoty teplot termočlánku na styku trámu a minerální izolace 40 mm od spodního okraje

Hodnoty z grafu na obr. 15 vykazují strmý nárůst teploty pro termočlánek umístěný na styku trámu s minerální izolací od 12. minuty ovlivněný pravděpodobně odpadnutím obkladu desek OSB, které dle analytického výpočtu vydrží 7,8 minuty. Když však přičteme zhruba 5 minut k analytickému výpočtu na rozvoj do plně rozvinutého požáru viz obr. 16, tak výpočet je srovnatelný s daty z experimentu vzhledem k nárůstu teplot způsobené průnikem tepla do mezery mezi trám a tepelnou izolací.



Obr. 16: *Plně rozvinutý požár při požární zkoušce experimentálního objektu – 18. minuta*



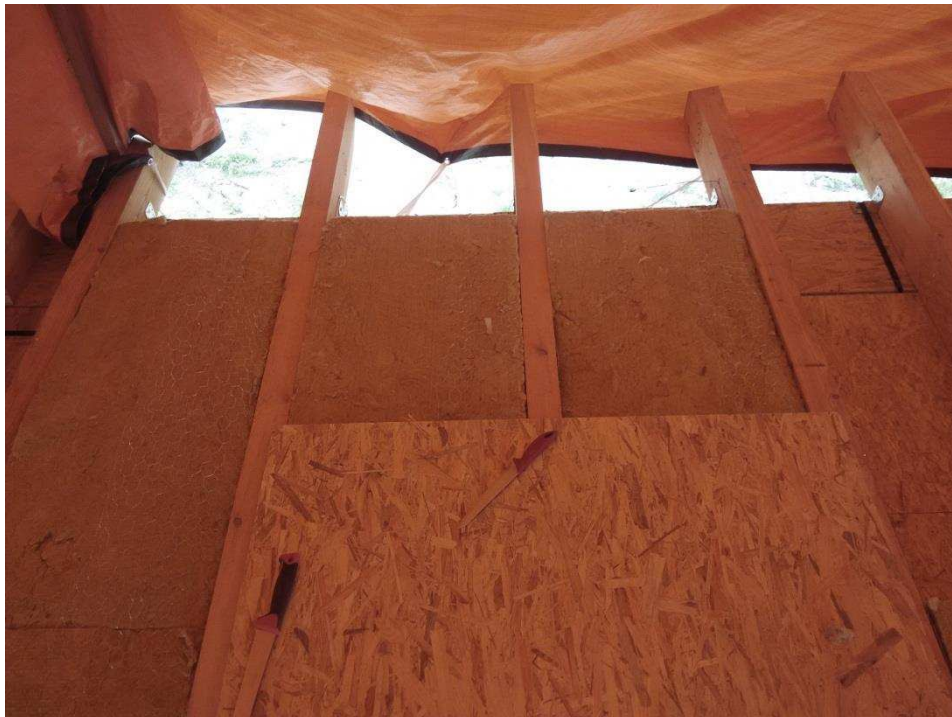
Obr. 17: Hodnoty teplot termočlánku na styku trámu a minerální izolace 80 mm od spodního okraje

Dle výpočtů v ČSN EN 1995-1-2, která udává, že v konstrukci dřevěného stropu s výplní dutin ze skelného vlákna dojde po odpadnutí ochranné vrstvy ke kolapsu konstrukce by měl v grafu na obr. 17 nastat rozdíl průběhu teplot pro kamenná a skelná vlákna v měřícím bodě na styku minerální izolace a dřevěného trámu, tento průběh je však do 30. minuty téměř stejný.

4 Analytické výpočty hloubky zuhelnatění dřevěného trámu ve střešní konstrukci

Tato část práce se bude věnovat převážně analytickému řešení přílohy C v normě ČSN EN 1995-1-2, která pojednává o nosné funkci dřevěných rámových a stropních soustav, které jsou tvořeny dřevěnými prvky (sloupky nebo nosníky), obloženými deskami na straně vystavené účinku normového požáru do doby trvání 60 minut. Splněny musí být následující podmínky:

- dutiny jsou zcela vyplněny izolací z minerálních nebo skelných vláken (obr 18.);
- sloupky jsou ztuženy proti vybočení v rovině stěny a stropnice proti příčné a torzní nestabilitě pomocí desek na straně nevystavené požáru nebo pomocí příčných výztuh (obr. 18);
- u stropů mohou být desky také připevněny ocelovým lištám o maximální výšce 25 mm, které jsou kolmo ve směru dřevěných stropnic
- ověření dělicí funkce dle přílohy E ČSN EN 1995-1-2



Obr. 18: Zcela vyplněné dutiny minerální izolací a stropnice zajištěné proti příčné a torzní nestabilitě pomocí desek na straně nevystavené požáru

zdroj: foto Pavel Zemánek, projekt „Slamák“

V odstavci 6 výše přílohy C v ČSN EN 1995-1-2 je uvedeno, že případné použití skelného vlákna v dutinách konstrukcí stěnových nebo stropních soustav i za splnění předepsaných podmínek v dané příloze, nastává kolaps celé konstrukce v čase porušení obkladové desky od strany působení požáru a nebere v úvahu nosnost samotného nosného prvku a možnost jeho redukce na zbytkový průřez.

(6) Kde je izolace dutiny provedena ze skelného vlákna, má se předpokládat, že porušení prvku nastane v čase t_f .

4.1 Analytický výpočet

Pomocí analytických výpočtů bude porovnána dřevěná trámová konstrukce z trámů z rostlého dřeva s dutinami prázdnými, s dutinami vyplněnými skelným a kamenným vláknem. Všechny konstrukce budou opláštěné OSB deskami. Tyto data budou v následující kapitole porovnána s výsledky průběhu teplot experimentu a pomocí softwaru Atena.

4.1.1 Skelné vlákno, OSB 12 mm

Stropní trámová konstrukce nosníku z rostlého dřeva charakteristické pevnosti C24 s dutinami vyplněnými skelným vláknem a opláštěné deskami OSB tl. 12 mm. Dle rovnice uvedené v normě ČSN EN 1995-1-2, kapitola C.2.3, viz. obr. 19 má nastat porušení prvku v čase t_f . Čas porušení je uveden v následující rovnici [5].

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_{0,p,t}} - 4 \quad [5]$$

t_f čas porušení obvodového pláště, viz C.2.3.

C.2.3 Časy porušení desek

(1) Čas porušení obvodových plášťů provedených z desek na bázi dřeva se má brát takto:

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_0} - 4 \quad (C.7)$$

kde t_f je čas porušení v minutách;

h_p tloušťka desky v milimetrech;

β_0 návrhová rychlost zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění při normovém vystavení účinkům požáru v mn/min .

Obr. 19: Čas porušení desky v minutách

zdroj: ČSN EN 1995-1-2

(8) Návrhové rychlosti zuhelnatění pro desky na bázi dřeva podle EN 309, EN 313-1, EN 300 a EN 316 a dřevěné obložení jsou uvedeny v tabulce 3.1. Hodnoty platí pro charakteristickou hustotu 450 kg/m^3 a tloušťku desky 20 mm .

(9) Pro ostatní charakteristické hustoty ρ_k a tloušťky desek h_p menší než 20 mm se má rychlost zuhelnatění vypočítat takto:

$$\beta_{0,p,t} = \beta_0 \cdot k_p \cdot k_h \quad (3.4)$$

s

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (3.5)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (3.6)$$

kde ρ_k je charakteristická hustota v kg/m^3 ;
 h_p tloušťka desky v milimetrech.

POZNÁMKA Charakteristické hustoty pro desky na bázi dřeva jsou uvedeny v EN 12389.

Obr. 20: Změna rychlosti odhořívání obkladové desky na základě hustoty a její tloušťky

zdroj: ČSN EN 1995-1-2

$$\beta_{0,p,t} = \beta_0 \cdot k_p \cdot k_h = 0,9 \cdot 0,87 \cdot 1,29 = 1,01 [\text{mm/min}] \quad [6]$$

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} = \sqrt{\frac{450}{600}} = 0,87$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} = \sqrt{\frac{20}{12}} = 1,29$$

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_{0,p,t}} - 4 = \frac{12}{1,01} - 4 = 7,8 \text{ min}$$

Z použitého vzorce [6] viz. obr. 20 můžeme vyvodit, že změna rychlosti odhořívání obvodového pláště je dána s ohledem na měnící se objemovou hmotnost použitého materiálu a s objemovou hmotností větší než $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ se rychlost zmenšuje - je třeba dodat více energie. Druhým faktorem ovlivňující rychlost odhořívání obvodového pláště je jeho tloušťka, kde se rychlost odhořívání zmenšuje při tloušťce desky větší než 20 mm . V menší tloušťce desky dochází k rychlejšímu prohřátí homogenního materiálu.

Použití obvodového pláště z OSB desky tl. 12 mm u trémové konstrukce s dutinami vyplněnými skelným vláknem poskytne dle ČSN EN 1995-1-2 ochranu před požárem **7,8 minut**. Až s OSB deskou tl. 18 mm je možné dosáhnout na požární odolnost pomocí obvodového pláště na 15 minut . S požární odolností trámů se při použití izolace ze skelných vláken nepočítá.

4.1.2 Prázdná dutina mezi trámy, OSB 12 mm

Stropní trámová konstrukce nosníku z rostlého dřeva C 24 s prázdnými dutinami, opláštěné deskami OSB tl. 12 mm. Čas porušení desky dle rovnice [7]:

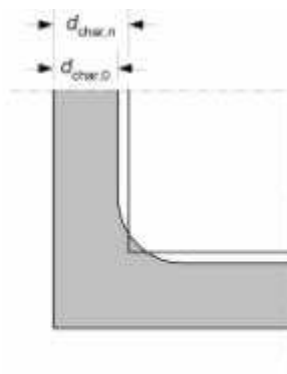
$$t_f = \frac{hp}{\beta_{0,p,t}} - 4 = \frac{12}{1,01} - 4 = 7,8 \text{ min} \quad [7]$$

(2) Nominální rychlost zuhelnatění, jejíž velikost zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin, viz obrázek 3.2, se má uvažovat konstantní v čase. Nominální návrhová hloubka zuhelnatění se má vypočítat takto:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (3.2)$$

kde $d_{char,n}$ je nominální návrhová hloubka zuhelnatění, která zahrnuje účinek zaoblení rohů;

β_n nominální návrhová rychlost zuhelnatění, jejíž rozsah zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin.



Obrázek 3.2 – Hloubky zuhelnatění $d_{char,0}$ pro jednorozměrné zuhelnatění a nominální hloubka zuhelnatění $d_{char,n}$

Obr. 21: Výpočet hloubky zuhelnatění zahrnující zaoblení rohů a trhlin

zdroj: ČSN EN 1995-1-2

Výpočet metodou redukovaného průřezu pomocí hloubky zuhelnatění viz. obr. 21:

Účinný průřez se vypočítá redukcí původního průřezu v rovnici [8] o účinnou hloubku zuhelnatění d_{ef} , která se odečítá z původního průřezu a to ze tří stran pro požár trvající 30 minut.

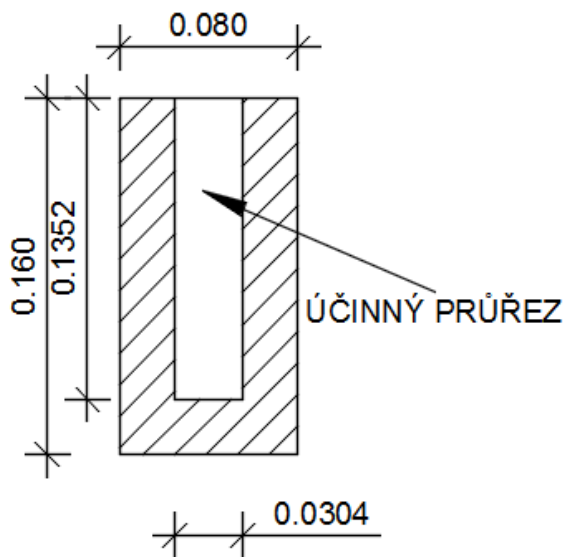
$$d_{ef} = d_{char} + k_o \cdot d_0$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$k_o = 1,0$$

$$d_{char} = \beta_n \cdot (t - t_f) = 0,8 \cdot (30 - 7,8) = 17,8$$

$$d_{ef} = d_{char} + k_o \cdot d_0 = 17,8 + 1,0 \cdot 7 = 24,8 \text{ mm} \quad [8]$$



[m]

Obr. 22: Účinný průřez trámu s obvodovým pláštěm z OSB 12 mm a prázdnými dutinami po 30 minutách normového požáru

S ohledem na to, že při požárním experimentu nebyla trámová konstrukce zatížena žádným zatížením kromě své vlastní tíhy, je zbytkový průřez trámu zuhelnatělého ze tří stran z obr. 22. špatně porovnatelný s trámem zuhelnatělým pouze z jedné strany. K lepšímu porovnání bude počítáno maximální možné stálé zatížení po celé délce trámu na rozpětí 3,2 metru pro každou výpočetní metodu a konstrukci stropu s kamenným nebo skelným vláknem.

Maximální možné zatížení na trám s prázdnými dutinami po dobu působení normového požáru 30 minut. K maximálnímu zatížení redukovaného průřezu na metr běžný trám dojdeme opět z podmínky [9]:

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$$k_{crit} = 1,0 \text{ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)}$$

$$k_{mod,fi} = 0,99 \text{ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)}$$

$$k_{fi} = 1,25 \text{ (součinitel pro rostlé dřevo)}$$

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

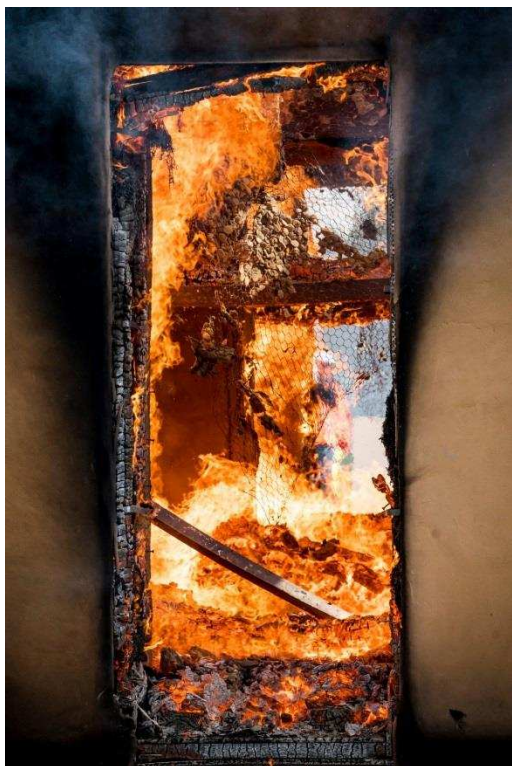
$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{\frac{1}{8} \cdot q \cdot 3,2^2}{\frac{1}{6} \cdot 30,4 \cdot 135,2^2} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 2,15 \text{ kN/m'}$$

Pro požár trvající 45 minut již konstrukce trámového stropu s prázdnými dutinami a obvodovým pláštěm z desek OSB tl. 12 mm nevyhoví.

4.1.3 Kamenné vlákno, OSB 12 mm

Analytickým výpočtem pro konstrukční řešení stropu s výplní dutin mezi trámy z kamenného vlákna bude počítáno pro dobu trvání normového požáru 30 a 45 minut. Tyto intervaly jsou zvoleny vzhledem k možnostem porovnání s experimentem, kde bylo pozorováno odpadnutí kamenného i skelného vlákna po kolapsu ocelového pletiva z prostoru mezi trámy ve 30. minutě doby trvání požáru viz. obr. 23.



Obr. 23: *Opadnutí minerální izolace z prostoru mezi trámy ve 30. minutě požáru*

Zdroj: foto Pavel Zemánek

Dosažení teploty 300 C° v měřeném bodě v ose trámu 40 mm od spodního líce bylo zhruba ve 45. minutě a bude tak možnost porovnání s analytickým výpočtem a tepelnou analýzou stejné konstrukce. Odhořívání prvku po odhoření dodatečné ochrany spodní OSB desky tl. 12 mm je díky kamennému vláknu chránící boční části počítáno pouze ze spodního líce trámu dle následujícího výpočtu v rovnici [10] uvedené v normě ČSN EN 1995-1-2 pro časy požáru v době trvání 30 a 45 minut.

Rozměry prvku:

$$\text{Výška trámu } h = 160 \text{ mm}$$

$$\text{Šířka trámu } b = 80 \text{ mm}$$

Rostlé dřevo pevnostní třídy C24

Nominální hloubka zuhelnatění v čase $t_{\text{fire}} = 30$ a 45 min

Čas porušení obložení z OSB desek $t_f = 7,8$ min dle rovnice [7]

Čas počátku zuhelnatění podle C.2.2 v (1) $t_{\text{ch}} = t_f = 7,8$ min

Platí $t_{\text{ch}} = t_f$ a proto $\beta_n = k_s \cdot k_3 \cdot k_n \cdot \beta_0$. Není nutno stanovit součinitel izolace k_2 .

Součinitel převádějící nepravidelný zbytkový průřez na nominální obdélníkový průřez: $k_n = 1,5$

Jednorozměrná rychlost zuhelnatění rostlého dřeva pevnostní třídy C24 při vystavení účinkům

normového požáru dle tab. 3.1 v (1) $\beta_0 = 0,65 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Součinitel průřezu $k_s = 1,1$ dle tab C.1 v (1)

Součinitel dodatečné ochrany $k_3 = 0,036 \cdot t_1 + 1 = 0,036 \cdot 7,8 + 1 = 1,28$

Nominální rychlost zuhelnatění v čase $t > t_f = t_{\text{ch}}$; $\beta_{n,b} = 1,1 \cdot 1,28 \cdot 1,5 \cdot 0,65 = 1,37 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$

Nominální hloubka zuhelnatění v čase $t_{\text{fire1}} = 30$ min

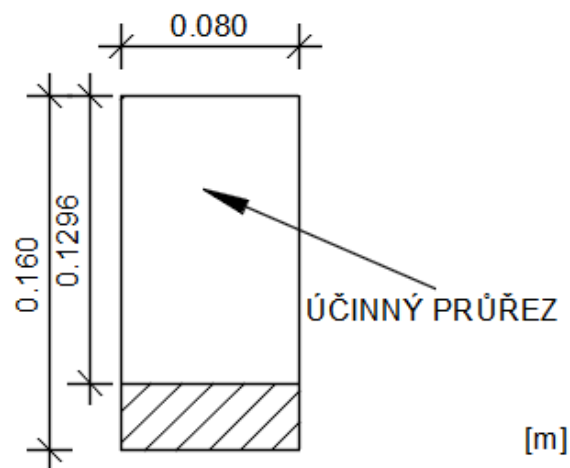
Nominální hloubka zuhelnatění v čase $t_{\text{fire2}} = 45$ min

$$d_{\text{char},n1} = \beta_{n,b} \cdot (t_{\text{fire1}} - t_f) = 1,37 \cdot (30 - 7,8) = 30,4 \text{ mm} \quad [10]$$

$$d_{\text{char},n2} = \beta_{n,b} \cdot (t_{\text{fire2}} - t_f) = 1,37 \cdot (45 - 7,8) = 51,0 \text{ mm} \quad [10]$$

Z tohoto výpočtu dojdeme k nominální vrstvě zuhelnatění prvku po 45 minutách zatížení normového požáru o tloušťce **51,0 mm** (obr.25) a po 30 minutách tloušťce **30,4 mm** (obr. 24).

Vyšší rychlost odhořívání trámu z rostlého dřeva ve výpočtu oproti jednorozměrné rychlosti zuhelnatění dané normou je dáno tím, že se trám před odpadnutím ochranné desky začal prohřívat a došlo tak k rychlejšímu nárůstu kritické teploty zuhelnatění.



Obr. 24: Účinný průřez trámu s obvodovým pláštěm z OSB 12 mm s dutinami vyplněnými kamenným vláknem po 30 minutách normového požáru analytickým výpočtem

Z podmínky [9] dojdeme k maximálnímu možnému zatížení na trám při rozpětí 3,2 m

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$$k_{crit} = 1,0 \text{ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)}$$

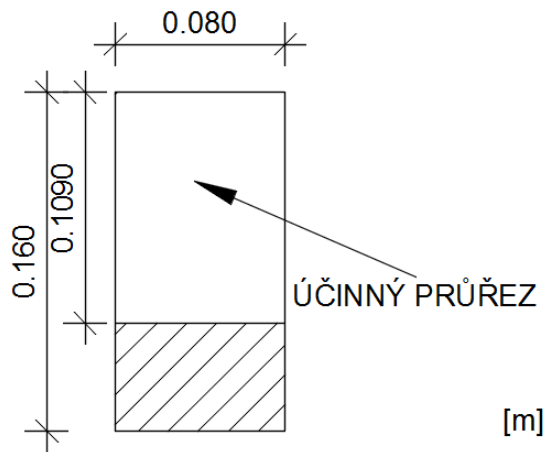
$$k_{mod,fi} = 0,99 \text{ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)}$$

$$k_{fi} = 1,25 \text{ (součinitel pro rostlé dřevo)}$$

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{\frac{1}{8} \cdot q \cdot 3,2^2}{\frac{1}{6} \cdot 80 \cdot 129,6^2} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 5,2 \text{ kN/m'}$$



Obr. 25: Účinný průřez trámu s obvodovým pláštěm z OSB 12 mm s dutinami vyplněnými kamenným vláknem po 45 minutách normového požáru analytickým výpočtem

Z podmínky [9] dojdeme k maximálnímu možnému zatížení na trám při rozpětí 3,2 m

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$k_{crit} = 1,0$ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)

$k_{mod,fi} = 0,99$ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)

$k_{fi} = 1,25$ (součinitel pro rostlé dřevo)

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

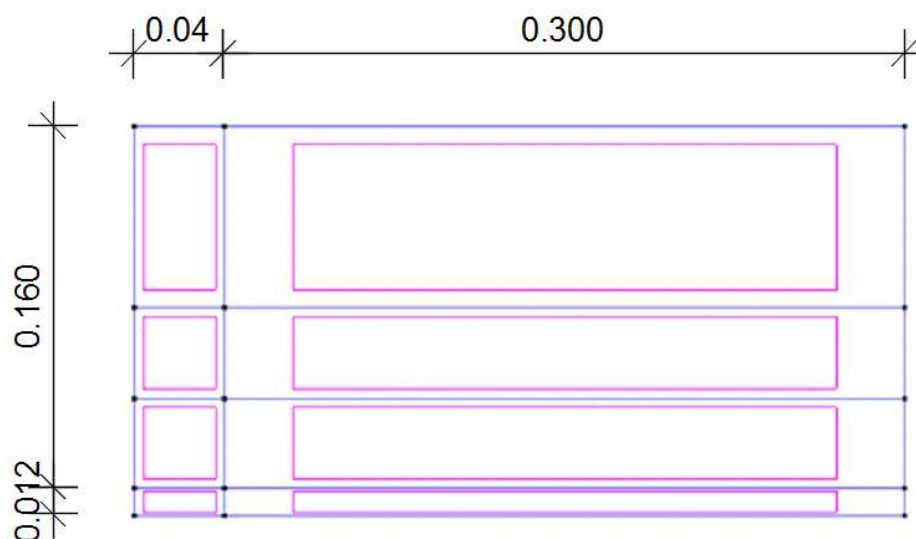
$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{\frac{1}{8} \cdot q \cdot 3,2^2}{\frac{1}{6} \cdot 80 \cdot 109^2} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 3,68 \text{ kN/m'}$$

5 Tepelná analýza střešní konstrukce pomocí programu Atena

Tato kapitola bude věnována tepelné analýze stropní trámové konstrukce. Pro teplotní model se použije program Atena, který může při výpočtu zohlednit měnící se parametry měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti v závislosti na teplotě. Tyto měnící se materiálové vlastnosti v závislosti na teplotě budou převzaty z Technical guideline for Europe (8).

Nejprve se namodeluje polovina geometrie prvku obr. 26., kde je namodelována osově polovina trámu a polovina pole mezi trámy vyplněná minerální izolací. Vzhledem k symetrii tak bude umožněno použít hustější výpočetní síť. Modelování se provede v programu GID (pre a post procesor pro numerické simulace). Následně bude zvolen typ výpočetního programu a to Atena typ transport, poté se můžou jednotlivým průřezům přiřadit dané materiálové charakteristiky.



Obr. 26: Geometrie poloviny prvku v programu GID rozdělená do ploch

Geometrie prvku bude k možnému výslednému porovnání vždy stejná a převzatá z provedeného experimentu. Jedná se o trám z rostlého dřeva pevnostní třídy C24, výšce 160 mm a šířce 80 mm. V následující tab. 5 jsou uvedeny rozměry a hmotnosti jednotlivých trámů použitých v experimentu, ze kterých jsou vypočteny jejich objemové hmotnosti. S výslednou hodnotou objemové hmotnosti trámu uvedené ve výpočtu je počítáno jako s aritmetickým průměrem 620 kg/m^3 .

číslo trámu:	šířka x výška [m]				délka [m]	hmotnost [kg]	objemová hmotnost [kg/m ³]
1	0,159	0,080	0,159	0,079	5,096	46,70	724,9
2	0,159	0,077	0,160	0,080	5,141	41,10	638,4
3	0,159	0,080	0,160	0,080	5,082	40,70	627,6
4	0,158	0,077	0,158	0,077	5,120	33,10	531,3
5	0,160	0,079	0,158	0,077	5,102	35,20	556,2
6	0,158	0,081	0,155	0,080	5,051	42,90	674,1

Tab. 5: Rozměry a výsledné objemové hmotnosti trámů použitých v experimentu

V programu budou vytvořeny dva modely. Geometrie bude pro oba modely stejná, ale použití výplně mezi dutinami trámové konstrukce bude v prvním případě z kamenných vláken a v případě druhém z vláken skelných.

Do programu budou zadávány tyto materiálové vlastnosti:

- **součinitel tepelné vodivosti** - λ - lambda udává jak materiál vede teplo, čím větší, tím rychleji probíhá přestup tepla materiálem [W/(m·K)]
- **měrná tepelná kapacita** - c - definuje množství tepla, které je potřeba dodat 1 kilogramu látky, aby se ohřál o 1 teplotní stupeň [J/(kg·K)]
- **emisivita** – ε – je bezrozměrná veličina vyjadřující vlastnost materiálu vyzařovat teplo, dle ČSN EN 1995-1-2 je hodnota určena na hodnotu 0,8 dle obr. 27 a 28.

2.2 Zatížení

(1)P Tepelná a mechanická zatížení se musí stanovit podle EN 1991-1-2:2002.

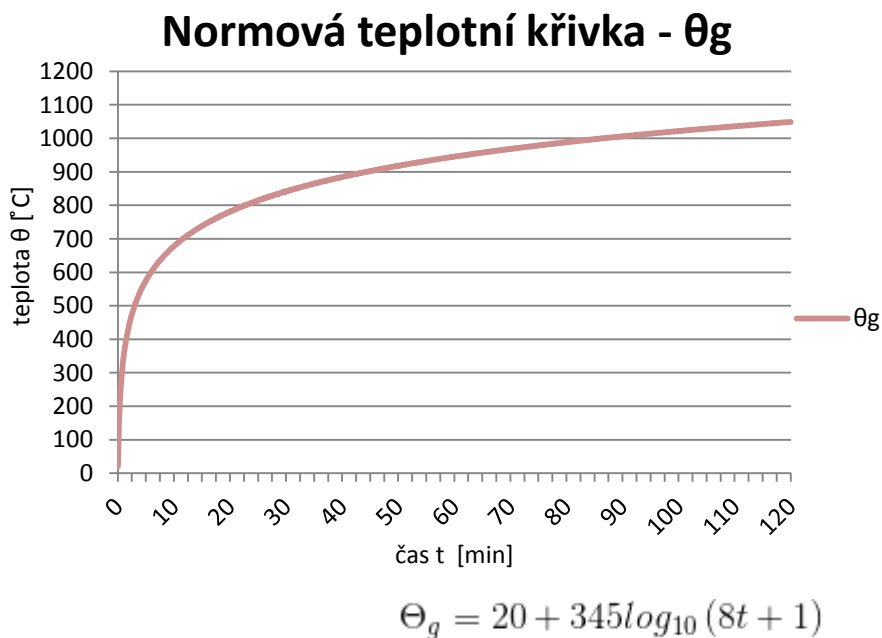
(2) Pro povrchy dřeva, materiálů na bázi dřeva a sádkokartonových desek se má součinitel emisivity uvažovat roven 0,8.

Obr. 27: Výstřižek z ČSN EN 1995-1-2 uvádějící hodnotu emisivity rostlého dřeva

Materiál / povrch		Emisivita e		
Technické povrchy	Absolutně černé těleso		1	
	Ušlechtilý kov, vysokého lesku		0,02 až 0,05	
	Neušlechtilý kov, vysokého lesku		0,025 až 0,07	
Kovy	Hliník	Leštěný	0,05	
	Nikl		0,05	
	Chrom		0,07	
	Ocel	Čistě leptaná		0,06
		Pocínovaná, leštěná		0,06
		Surová, válcovaná s okujemi		0,75 až 0,80
		Pocínovaná		0,25
	Měď	Tažená, lesklá		0,03
		Oxidovaná		0,76
Mosaz	Leštěná		0,05	
Povrchové úpravy	Hliníkový bronz		0,35 až 0,45	
	Emailový lak	Bílá	0,86 až 0,97	
	Olejová barva		0,9 až 0,98	
	Lak	Černý lesklý		0,89
		Obecně		0,86 až 0,97
	Lak na otopná tělesa	Jakékoli barvy		0,92 až 0,94
Ostatní povrchy	Obkladačky	Bílé	0,88	
	Šamot		0,6 až 0,72	
	Omítka		0,92 až 0,95	
	Papír		0,89	
	Tapety		0,89	
	Lidská kůže		0,83	
	Saze		0,83	
	Hliníkové nátěry		0,35	
	Nátěry topných těles (na barvě nezáleží)		0,925	
	Voda, led, sklo		0,94	
	Omítka		0,95	
	Dřevo, papír		0,90	
	Beton		0,91	

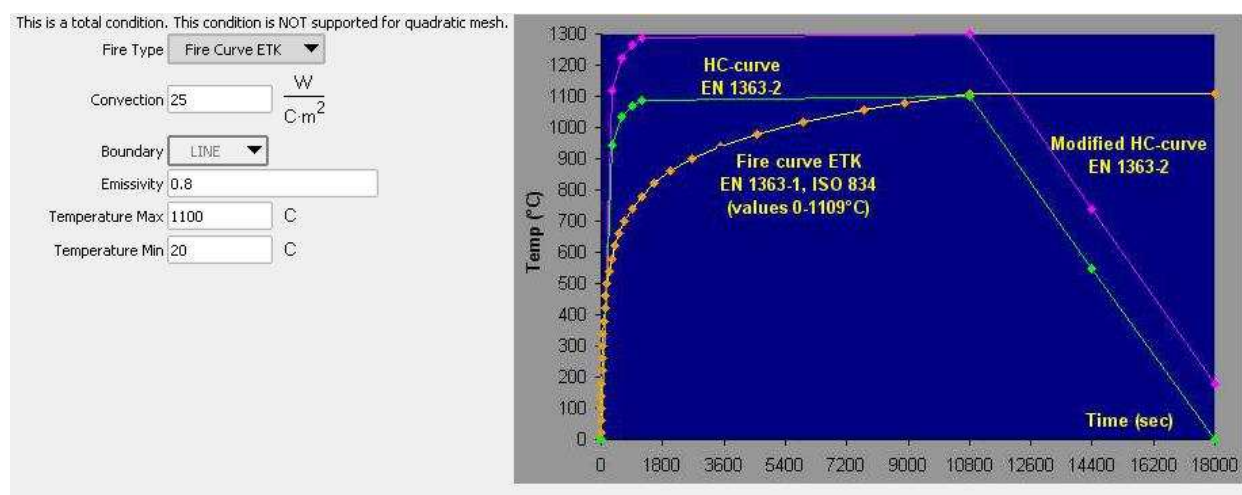
Obr. 28: Hodnoty emisivit stavebních materiálů

Po namodelování geometrie prvku a zadání materiálových charakteristik musí být každý prvek zatížen teplotní křivkou. Vzhledem k analytickému výpočtu, který je tvořen pro normovou teplotní křivku, bude i posuzovaný průřez ve výpočtovém softwaru zatížen normovou teplotní křivkou obr. 29 dle ISO 834.

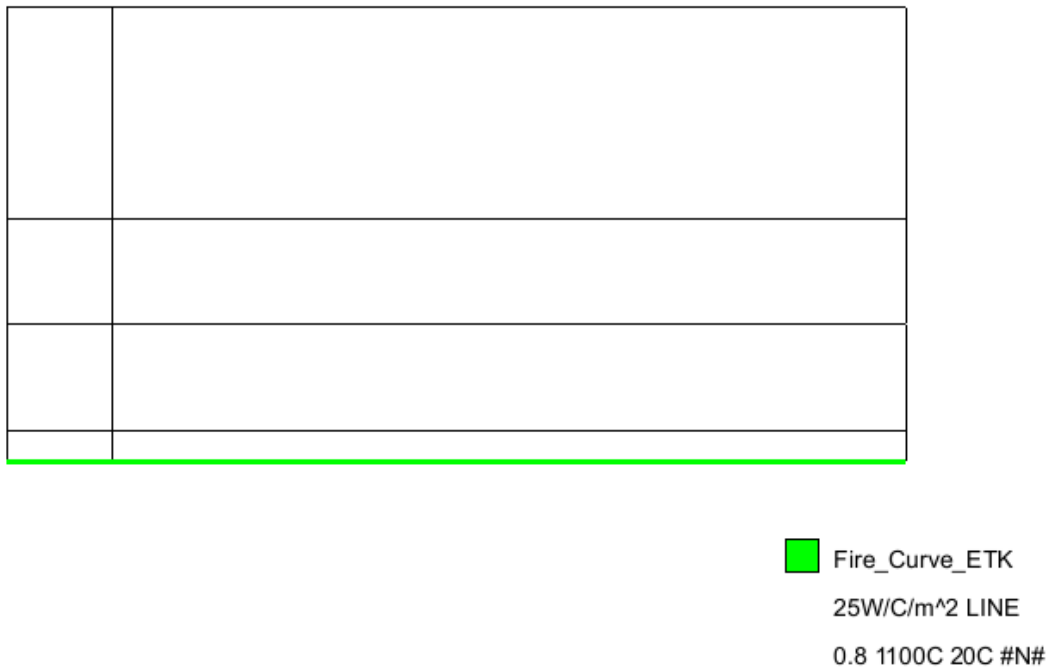


Obr. 29: Normová teplotní křivka ISO 834

Normová teplotní křivka je v programu Atena nadefinována viz. obr. 30. K přesnému zadání se upraví hodnota emisivity na 0,8 a součinitel přestupu tepla konvekcí $\alpha_c = 25 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ dle ČSN EN 1991-1-2 (9). Zatížení teplotní křivkou do modelu se provede ze spodní strany, která je vystavena účinkům požáru obr. 31.

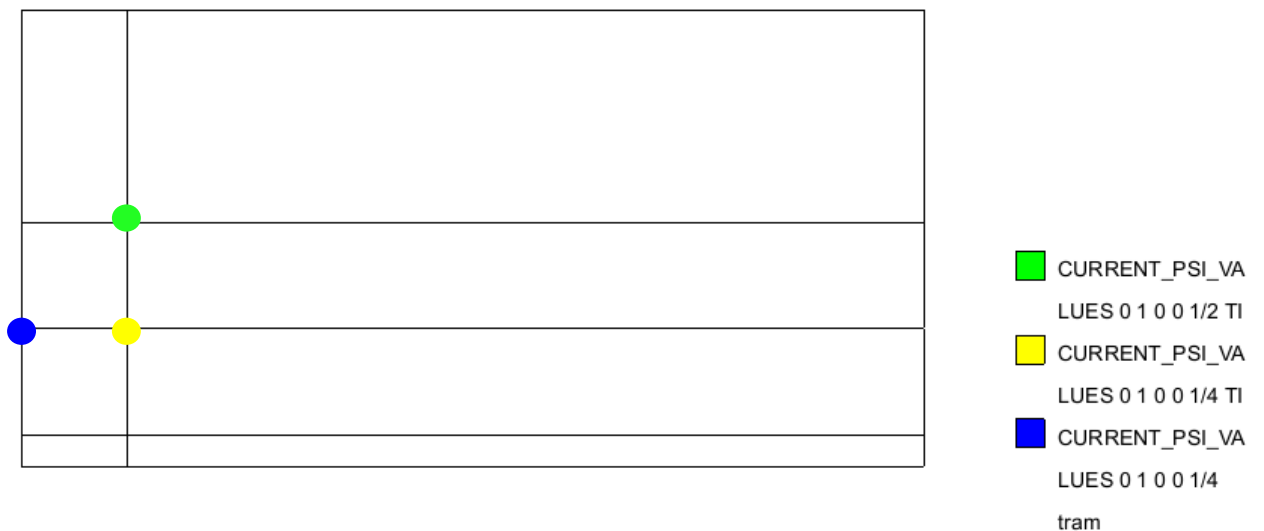


Obr. 30: Normová teplotní křivka definovaná v programu Atena



Obr. 31: Zatížení geometrie průřezu v programu Atena teplotní křivkou

Monitorovací body budou pro možnost porovnání umístěné v přesném místě, jako jsou umístěny termočlánky v experimentu viz. obr. 32. První bod je umístěn v ose trámu 40 mm nad spodním lícem. Druhý bod je na boční straně trámu se stykem s minerální izolací ve výšce 40 mm a bod třetí ve stejné úrovni na styku trámu s izolací ve výšce 80 mm.



Obr. 32: Umístění monitorovacích bodů v programu Atena

5.1 Dřevěný trám s výplní kamenného vlákna

Materiálové vlastnosti zadané do programu Atena pro geometrii trámového stropu s výplní z kamenného vlákna na obr. 33 mají tyto výchozí hodnoty při teplotě 20°C:

- dřevěný trám 80/160 mm – C24 (hodnoty jsou uvažovány za teploty 20°C):

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{20^{\circ}\text{C}} = 0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Měrná tepelná kapacita: $c_{20^{\circ}\text{C}} = 1530 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Objemová hmotnost: $\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 620 \text{ kg/m}^3$

- kamenná izolace tl. 160 mm

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{20^{\circ}\text{C}} = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Měrná tepelná kapacita: $c_{20^{\circ}\text{C}} = 960 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

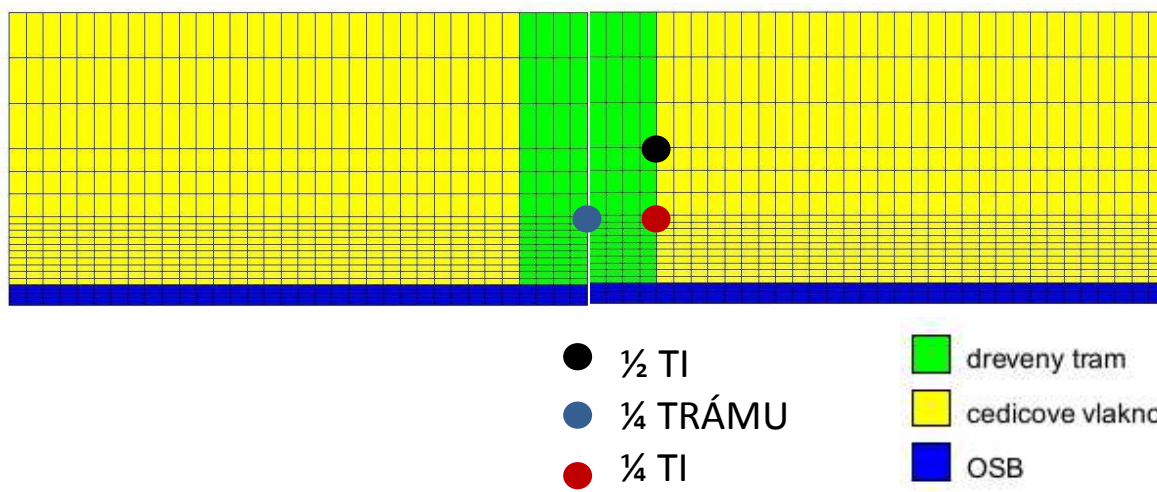
Objemová hmotnost: $\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 40 \text{ kg/m}^3$

- dřevostěpkové OSB desky o tloušťce 12 mm:

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda_{20^{\circ}\text{C}} = 0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Měrná tepelná kapacita: $c_{20^{\circ}\text{C}} = 1630 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Objemová hmotnost: $\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 600 \text{ kg/m}^3$



Obr. 33: Schématický řez zadané geometrie z programu Atena s použitím kamenného vlákna včetně umístění čidel termočlánků a sítě mesh

Následně jsou do programu zadány hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity pro rostlé dřevo C24, OSB a kamenné vlákno, které zohledňují jejich měnící se vlastnosti při změně teploty. Hodnoty pro dřevo jsou převzaty z ČSN EN 1995-1-2 viz. tab. 6. Pro výpočetní program se jednotky musí přepočítat koeficientem vycházející ze základní hodnoty veličiny dané při teplotě 20°C, viz tab. 7 a 8. Hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné

kapacity pro dřevo a OSB v závislosti na teplotě jsou stejné pro model s dutinami mezi trámy vyplněnými jak skelným, tak i kamenným vláknem.

Teplota °C	Tepelná vodivost Wm ⁻¹ K ⁻¹
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1 200	1,50

Teplota °C	Měrné teplo kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Poměr hustoty [*]
20	1,53	1 + ω
99	1,77	1 + ω
99	13,60	1 + ω
120	13,50	1,00
120	2,12	1,00
200	2,00	1,00
250	1,62	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1,00	0,38
600	1,40	0,28
800	1,65	0,26
1 200	1,65	0

^{*} ω je vlhkost

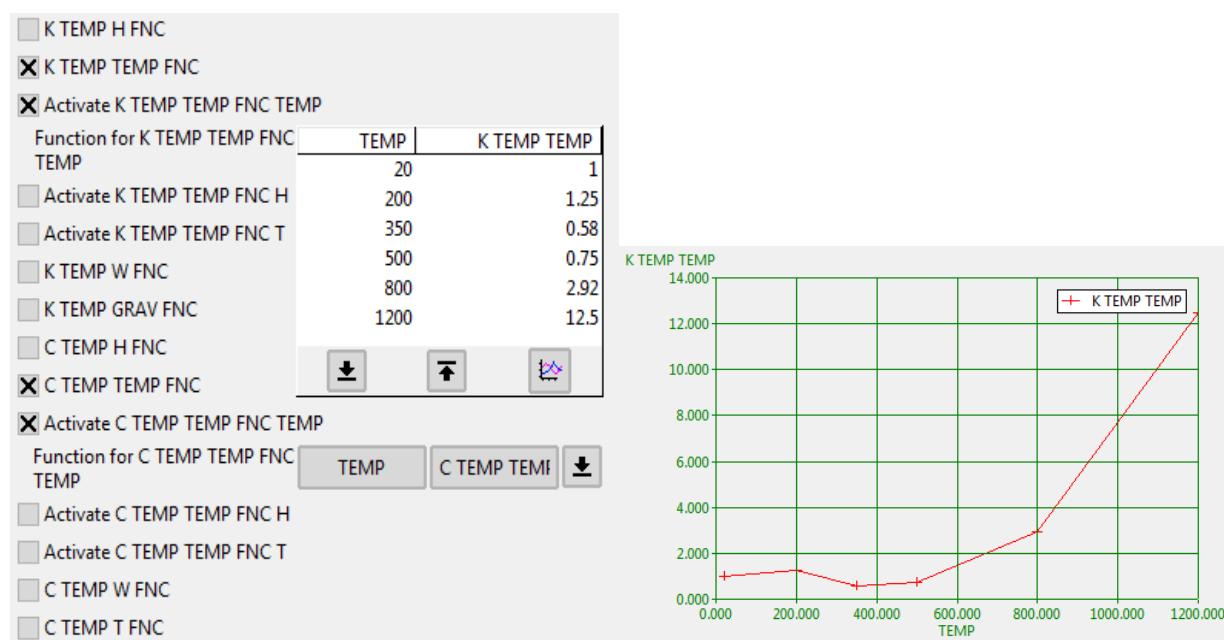
Tab. 6: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity dle ČSN EN 1995-1-2

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	λ [W/(m.K)]	λ [J/(s.C.m)] pozn. W = J/s	$\lambda_T/\lambda_{20^\circ\text{C}}$
20	0.12	0.12	1.00
200	0.15	0.15	1.25
350	0.07	0.07	0.58
500	0.09	0.09	0.75
800	0.35	0.35	2.92
1200	1.50	1.50	12.50

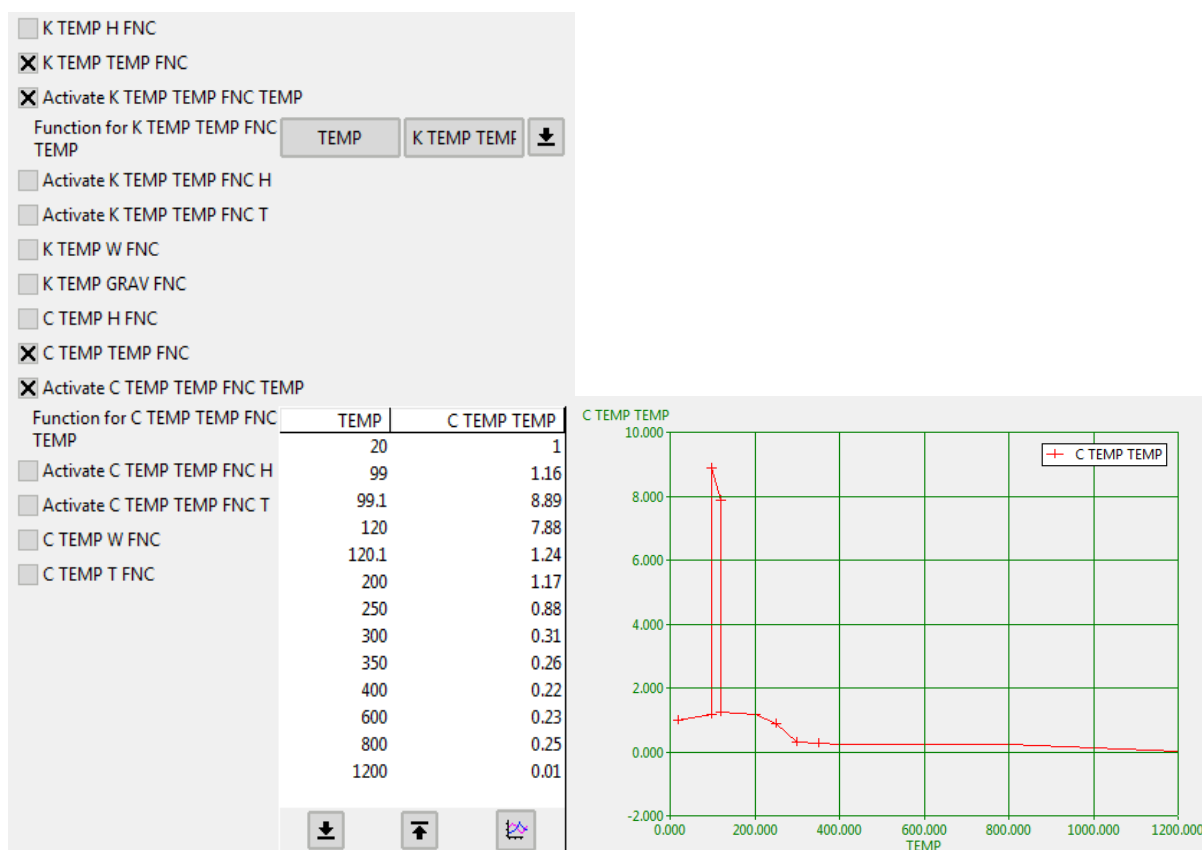
Tab. 7: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu s převodem jednotek pro program Atena

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	c [kJ/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]	w [%]	c [J/(m ³ .C)]	c [kJ/(m ³ .C)]	$c_T/c_{20^\circ C}$
20	1.53	620	12	948,600	949	1.00
99	1.77	620	12	1,097,400	1097	1.16
99	13.60	620	12	8,432,000	8432	8.89
120	13.50	554	0	7,473,214	7473	7.88
120	2.12	554	0	1,173,571	1174	1.24
200	2.00	554	0	1,107,143	1107	1.17
250	1.62	515	0	834,011	834	0.88
300	0.71	421	0	298,707	299	0.31
350	0.85	288	0	244,679	245	0.26
400	1.00	210	0	210,357	210	0.22
800	1.65	144	0	237,482	237	0.25
1200	1.65	0	0	-	0	0.00

Tab. 8: Vztah teploty a měrné tepelné kapacity pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu s převodem jednotek pro program Atena



Obr. 34: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu tepelné vodivosti dřeva C 24 v závislosti na teplotě



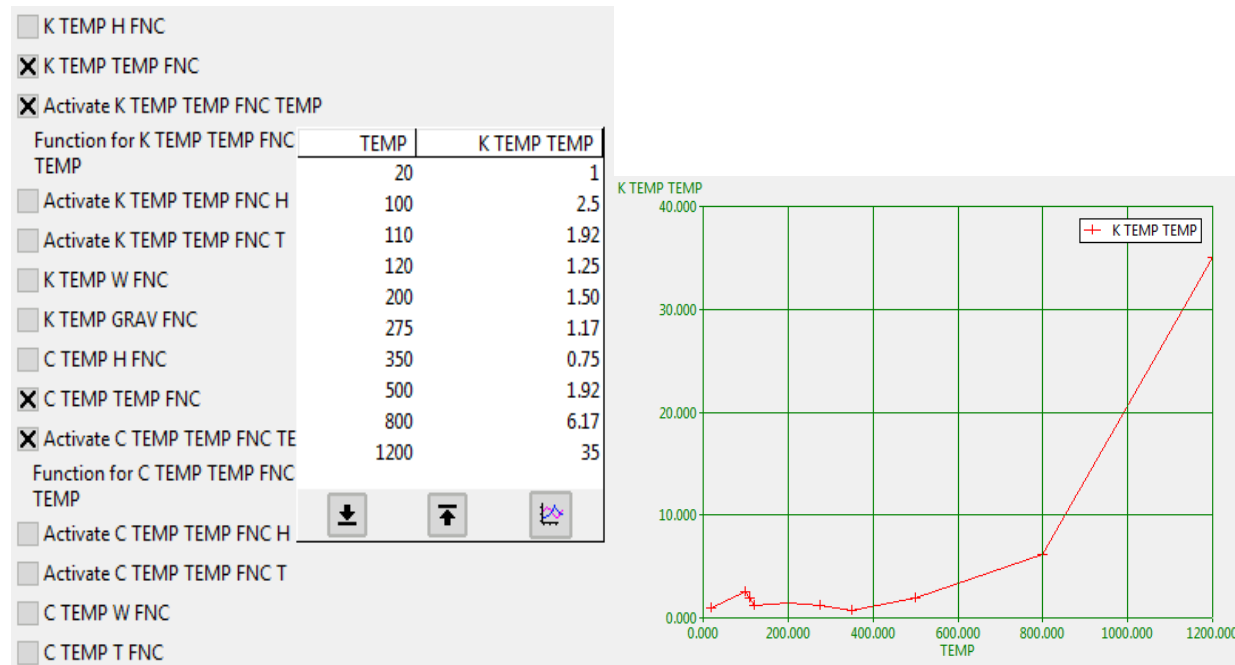
Obr. 35: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu tepelné kapacity dřeva C 24 v závislosti na teplotě

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	λ [W/(m.K)]	λ [J/(s.C.m)] pozn. W = J/s	$\lambda_T/\lambda_{20^\circ\text{C}}$
20	0.12	0.12	1.00
100	0.30	0.30	2.50
110	0.23	0.23	1.92
120	0.15	0.15	1.25
200	0.18	0.18	1.50
275	0.14	0.14	1.17
350	0.09	0.09	0.75
500	0.23	0.23	1.92
800	0.74	0.74	6.17
1200	4.20	4.20	35.00

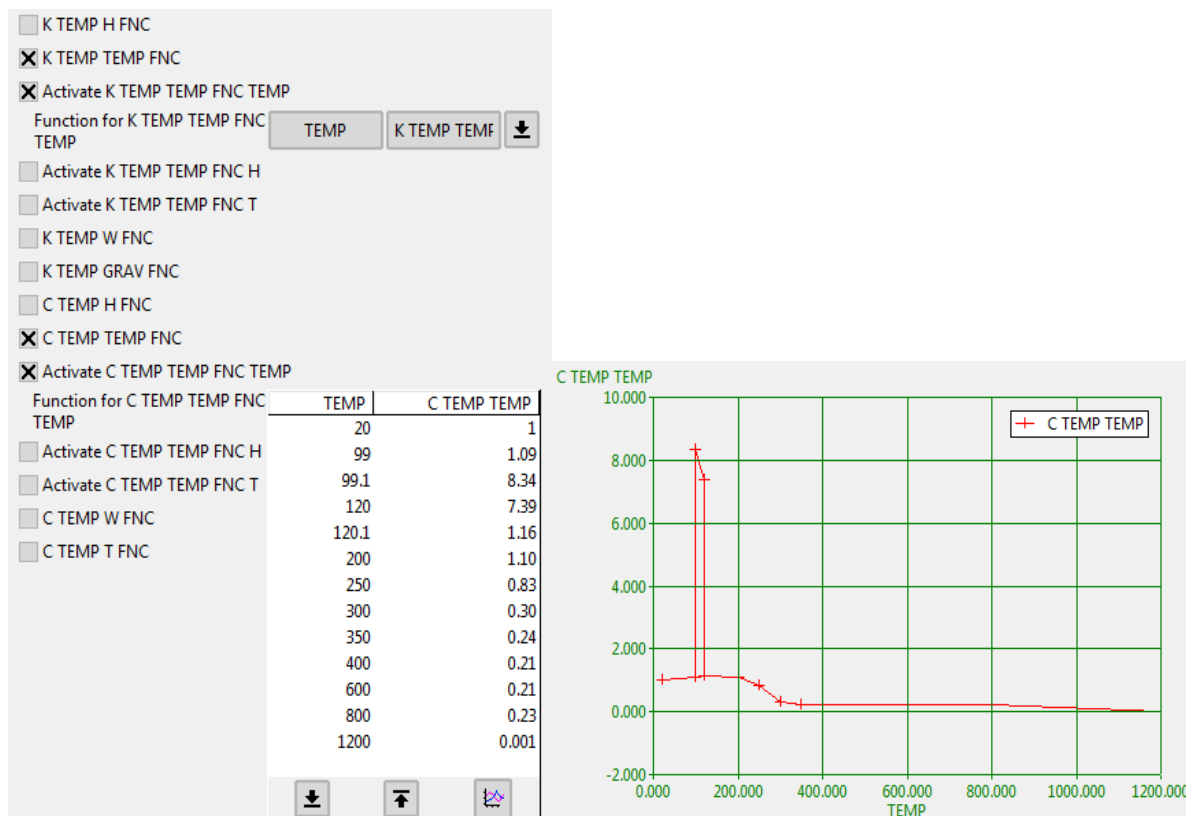
Tab. 9: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro OSB a zuhelnatělou vrstvu s převodem jednotek pro program Atena

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	c [kJ/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]	w [%]	c [J/(m ³ .C)]	c [kJ/(m ³ .C)]	$c_T/c_{20^\circ C}$
20	1.63	600	12	978,000	978.0	1.00
99	1.77	600	12	1,062,000	1062.0	1.09
99	13.60	600	12	8,160,000	8160.0	8.34
120	13.50	536	0	7,232,143	7232.1	7.39
120	2.12	536	0	1,135,714	1135.7	1.16
200	2.00	536	0	1,071,429	1071.4	1.10
250	1.62	498	0	807,107	807.1	0.83
300	0.71	407	0	289,071	289.1	0.30
350	0.85	279	0	236,786	236.8	0.24
400	1.00	204	0	203,571	203.6	0.21
600	1.40	150	0	210,000	210.0	0.21
800	1.65	139	0	229,821	229.8	0.23
1200	1.40	0	0	-	0.0	0.00

Tab. 10: Vztah teploty a měrné tepelné kapacity pro OSB a zuhelnatělou vrstvu s převodem jednotek pro program Atena



Obr. 36: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu tepelné vodivosti OSB v závislosti na teplotě



Obr. 37: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu měrné tepelné kapacity OSB v závislosti na teplotě

T °C	$\lambda(\rho_0)$ W/mK	T °C	c kJ/kgK	ρ/ρ_{20} -
20	0,036	20	0,880	1,00
100	0,047	100	1,040	1,00
400	0,090	200	1,160	0,980
600	0,150	400	1,280	0,977
800	0,230	600	1,355	0,973
925	0,300	800	1,430	0,970
1200	0,450	925	1,477	0,960
		1200	1,580	0,887

Tab. 11: Vztah měnící se tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity kamenného vlákna v závislosti na teplotě

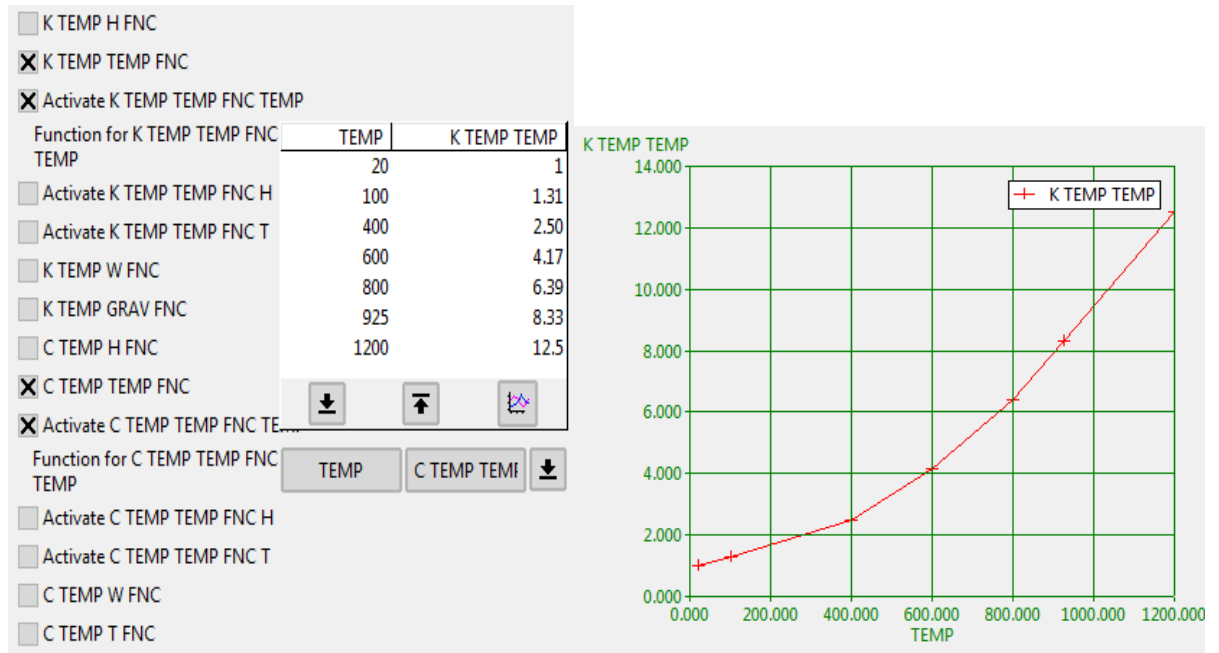
Zdroj: Technical guideline for Europe (8)

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	λ [W/(m.K)]	λ [J/(s.C.m)] pozn. W = J/s	$\lambda_T/\lambda_{20^\circ\text{C}}$
20	0.036	0.0360	1.00
100	0.047	0.0470	1.31
400	0.090	0.0900	2.50
600	0.150	0.1500	4.17
800	0.230	0.2300	6.39
925	0.300	0.3000	8.33
1200	0.450	0.4500	12.50

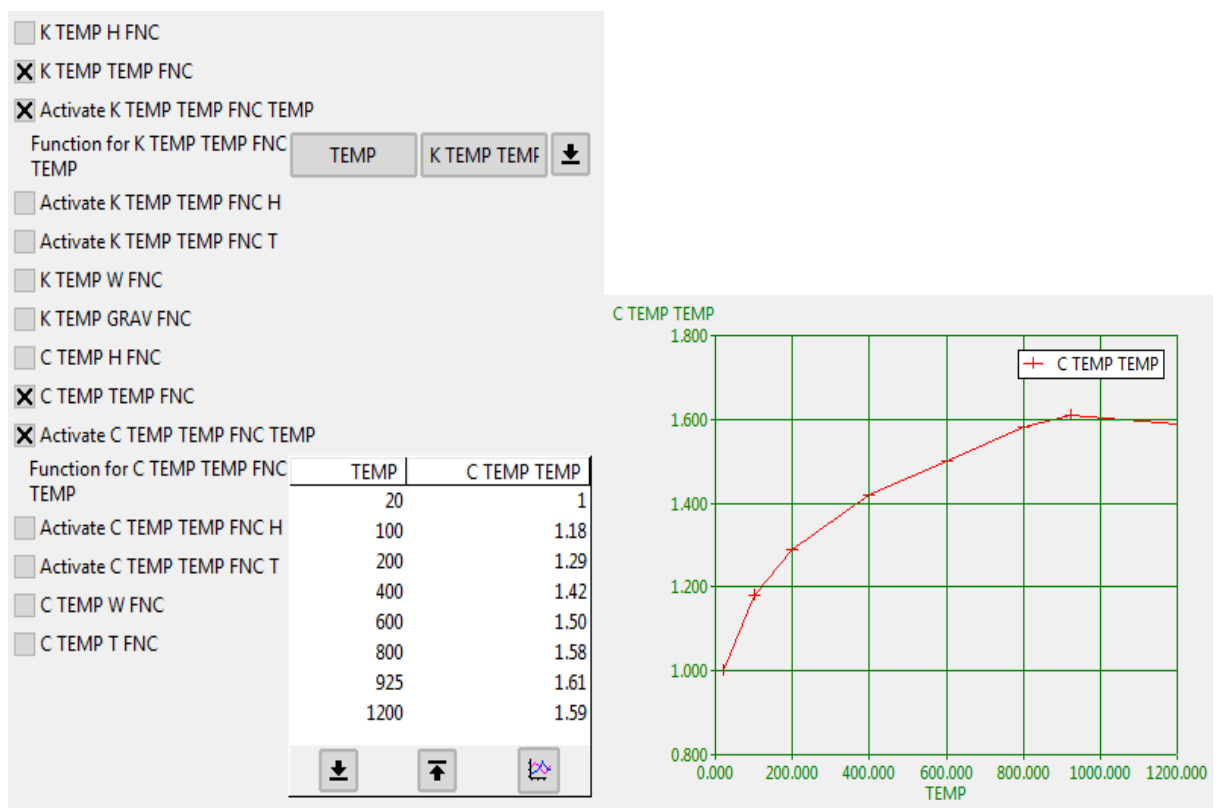
Tab. 12: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro kamenné vlákno s převodem jednotek pro program Atena

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	c [kJ/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]	w [%]	c [J/(m ³ .C)]	c [kJ/(m ³ .C)]	$c_T/c_{20^\circ\text{C}}$
20	0.88	30.00	-	26400	26.4	1.00
100	1.04	30.00	-	31200	31.2	1.18
200	1.16	29.40	-	34104	34.1	1.29
400	1.28	29.31	-	37516.8	37.5	1.42
600	1.36	29.31	-	39715.05	39.7	1.50
800	1.43	29.10	-	41613	41.6	1.58
925	1.48	28.80	-	42537.6	42.5	1.61
1200	1.58	26.61	-	42043.8	42.0	1.59

Tab. 13: Vztah teploty a měrné tepelné kapacity pro kamenné vlákno s převodem jednotek pro program Atena



Obr. 38: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu tepelné vodivosti kamenného vlákna v závislosti na teplotě



Obr. 39: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu měrné tepelné kapacity kamenného vlákna v závislosti na teplotě

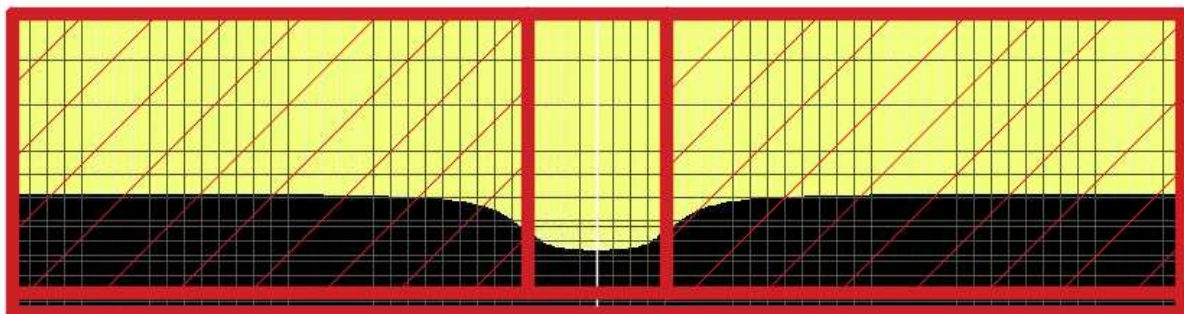
5.1.1 Výpočet trámového stropu s výplní dutin z kamenného vlákna po 30 minutách normového požáru

Po zadání všech materiálových vlastností z obr. 34 až 39 se do programu zadají v záložce „Interval data“ údaje, podle kterých má program měřit průběh teplot v monitorovacích bodech po dobu 30 minut v 600 krocích, viz. obr. 40, což znamená, že zaznamená teplotu v každém měřeném bodu každou 3. sekundu.

Number of Load Steps	600	
Store Data for this Interval Steps	SAVE ALL	▼
Interval Starting Time	0	sec
Interval End Time	1800	sec
Increment Transient Time	1	day

Obr. 40: Zadání časového intervalu 30 minut do programu Atena pro průběh teplot v měřených bodech

Následně je proveden výpočet tepelné analýzy programem Atena, kde jsou výstupem grafy průběhu teplot a vykreslení teploty průřezu v daném čase 30 minut, viz. obr. 41. Vykreslení průřezu je upraveno pro izotermu 300 °C, kde černá barva představuje zuhelnatělou oblast a tím teplotu převyšující 300 °C, barva žlutá v průřezu trámu definuje plochu účinného průřezu. Tato plocha bude převedena pomocí softwaru autocad do polygonu a následně spočítán průřezový modul „ W_{fi} “, ze kterého je vypočítáno maximální možné zatížení trámu na rozpon 3,2 m a následné porovnání s analytickými výpočty.



Obr. 41: Profil trámové konstrukce s dutinami vyplněnými kamenným vláknem ve vyšrafované oblasti po 30 minutách normového požáru s hranicí teploty 300 °C

Výpočet únosnosti trámu s dutinami vyplněnými kamenným vláknem po 30 minutách požáru pro finální posouzení:

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$k_{crit} = 1,0$ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)

$k_{mod,fi} = 0,99$ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)

$k_{fi} = 1,25$ (součinitel pro rostlé dřevo)

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 5,40 \text{ kN/m'}$$

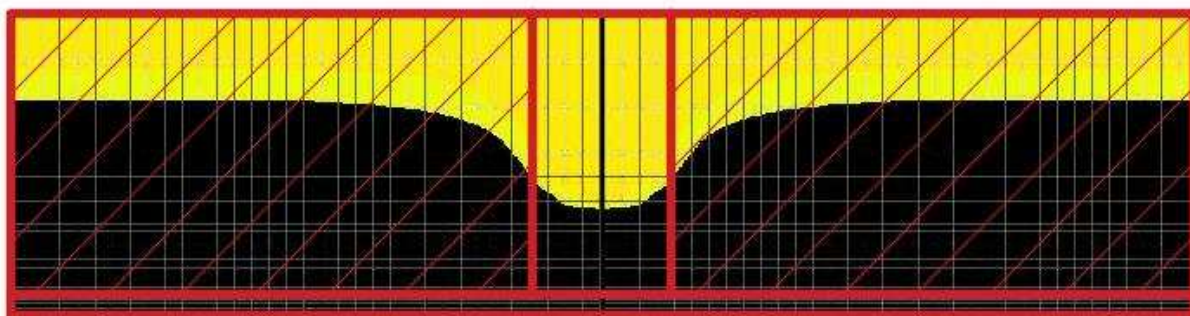
5.1.2 Výpočet trámového stropu s výplní dutin z kamenného vlákna po 45 minutách normového požáru

Pro výpočet hodnot v monitorovacích bodech stejné geometrie a stejných materiálů se změnou působení požáru 45 minut se změní v záložce „Interval data“ počet kroků na 900 a celý interval měření nastaví na 2700 sekund viz. obr. 42.

Number of Load Steps	900
Store Data for this Interval Steps	SAVE ALL
Interval Starting Time	0 sec
Interval End Time	2700 sec
Increment Transient Time	1 day

Obr. 42 Zadání časového intervalu 45 minut do programu Atena pro průběh teplot v měřených bodech

Po spuštění výpočtu se opět vykreslí teplota průřezu upravená pro izotermu 300° C na hranici černé a žluté viz obr. 43. Následně je proveden výpočet na únosnost zbytkového průřezu pro finální porovnání a v obr. 44 je vykreslen graf průběhu teplot v měřených bodech, který bude porovnán s hodnotami dat z experimentu.



Obr. 43: Profil trámové konstrukce s dutinami vyplněnými kamenným vláknem ve vyšrafované oblasti po 45 minutách normového požáru s hranicí teploty 300 °C

Výpočet únosnosti trámu s dutinami vyplněnými kamenným vláknem po 45 minutách požáru:

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$$k_{crit} = 1,0 \text{ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)}$$

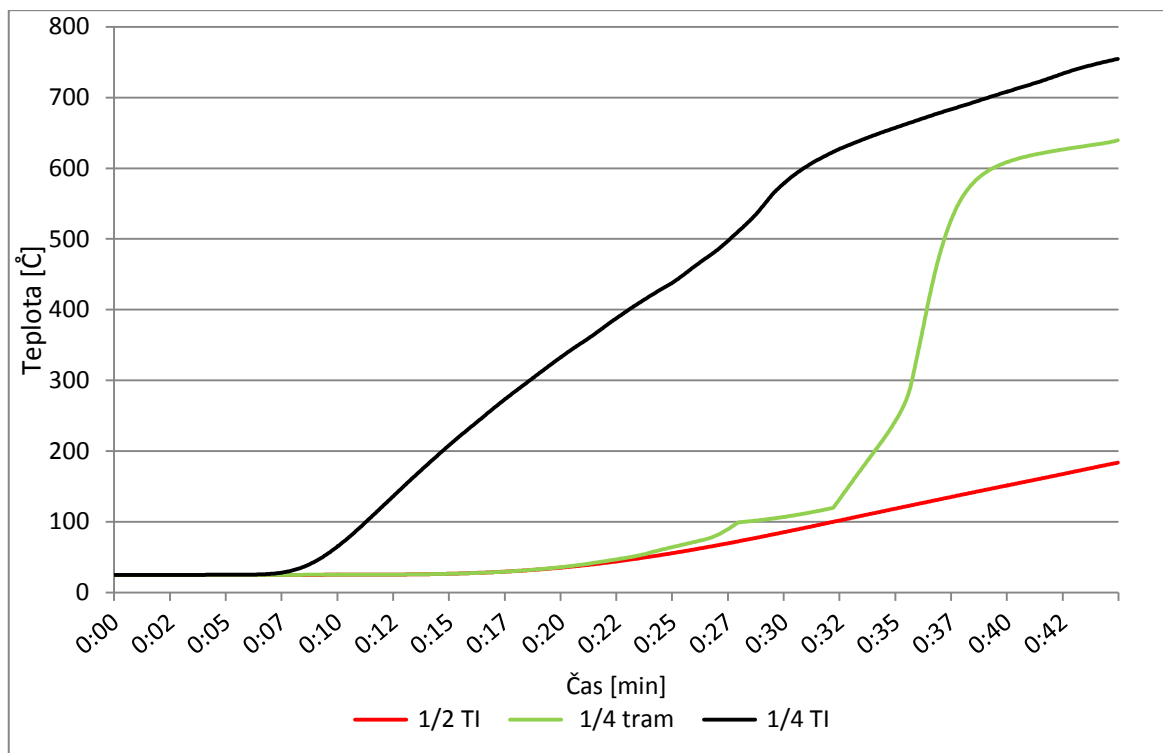
$$k_{mod,fi} = 0,99 \text{ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)}$$

$$k_{fi} = 1,25 \text{ (součinitel pro rostlé dřevo)}$$

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = f_{m,fi,d}$$

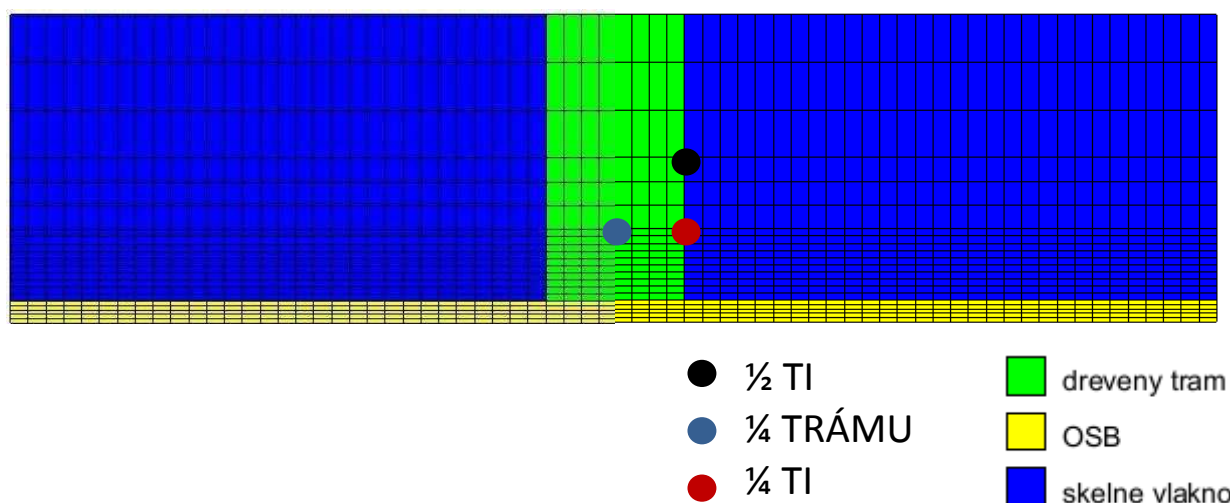
$$\Rightarrow q_d = 3,41 \text{ kN/m'}$$



Obr. 44: Graf průběhu teplot v měřených bodech pro konstrukci stropu s výplní dutin z kamenného vlákna vypočtený programem Atena

5.2 Dřevěný trémový strop s výplní dutin ze skelného vlákna

Výpočet tepelné analýzy dřevěného trémového stropu s výplní dutiny ze skelného vlákna je problematický. Při dosažení teplot nad cca 600 °C dochází k tavení izolantu, který se následně problematicky modeluje. Z literatury viz. obr. 46 jsou k dispozici data, při kterých má skelné vlákno při teplotě 660 °C tepelnou vodivost 0,30 W/m·K⁻¹, avšak při dosažení teploty 1200 °C je uvedena hodnota 100 W/m·K⁻¹. Tato hodnota je nahrazena vrůstající hodnotou mezi teplotami 510 – 660 °C, viz tab. 14 s aproximací dat z experimentu na hodnotu 0,56 W/m·K⁻¹. Geometrie prvku se sítí mesh z programu Atena jsou včetně měřených bodů a zadaných materiálů zobrazeny na obr. 45.



Obr. 45: Schématický řez zadané geometrie z programu Atena s použitím skelného vlákna včetně umístění čidel termočlánků

T °C	$\lambda(\rho_0)$ W/mK	c kJ/kgK	ρ/ρ_{20} –
20	0,035	1,200	1,00
100	0,068	1,340	0,983
200	0,110	1,380	0,961
300	0,151	1,382	0,940
400	0,192	1,384	0,940
510	0,238	1,386	0,940
660	0,300	1,389	0,940
1200	100	1,400	0,940

Obr. 46: Změny tepelné vodivosti a tepelné kapacity skelného vlákna v závislosti na teplotě

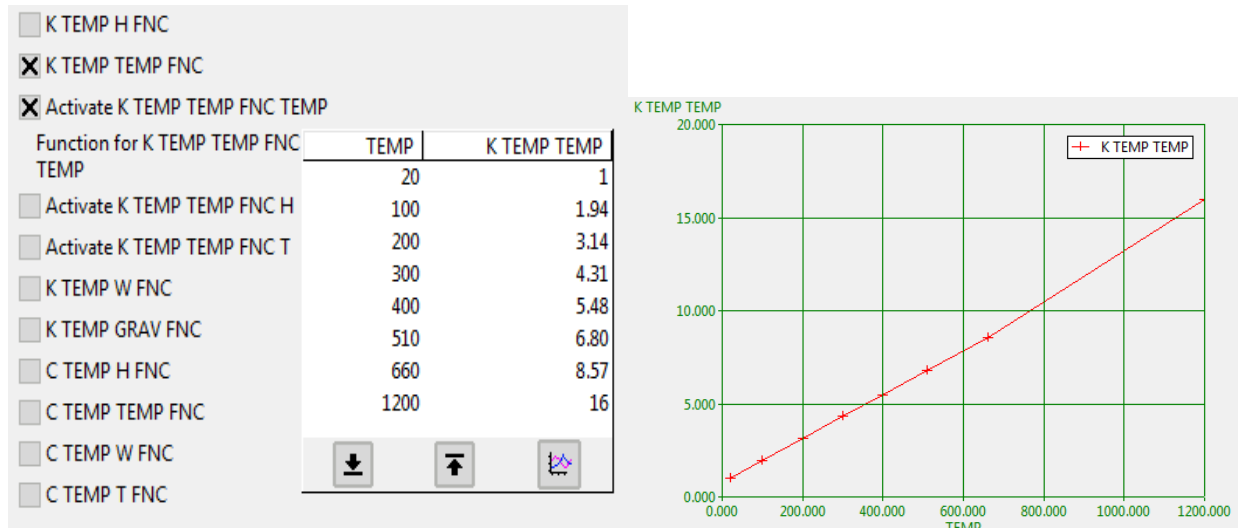
Zdroj: Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe (8)

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	λ [W/(m.K)]	λ [J/(s.C.m)] pozn. W = J/s	$\lambda_T/\lambda_{20^\circ\text{C}}$
20	0.035	0.0350	1.00
100	0.068	0.0680	1.94
200	0.110	0.1100	3.14
300	0.151	0.1510	4.31
400	0.192	0.1920	5.49
510	0.238	0.2380	6.80
660	0.300	0.3000	8.57
1200	0.560	0.5600	16.00

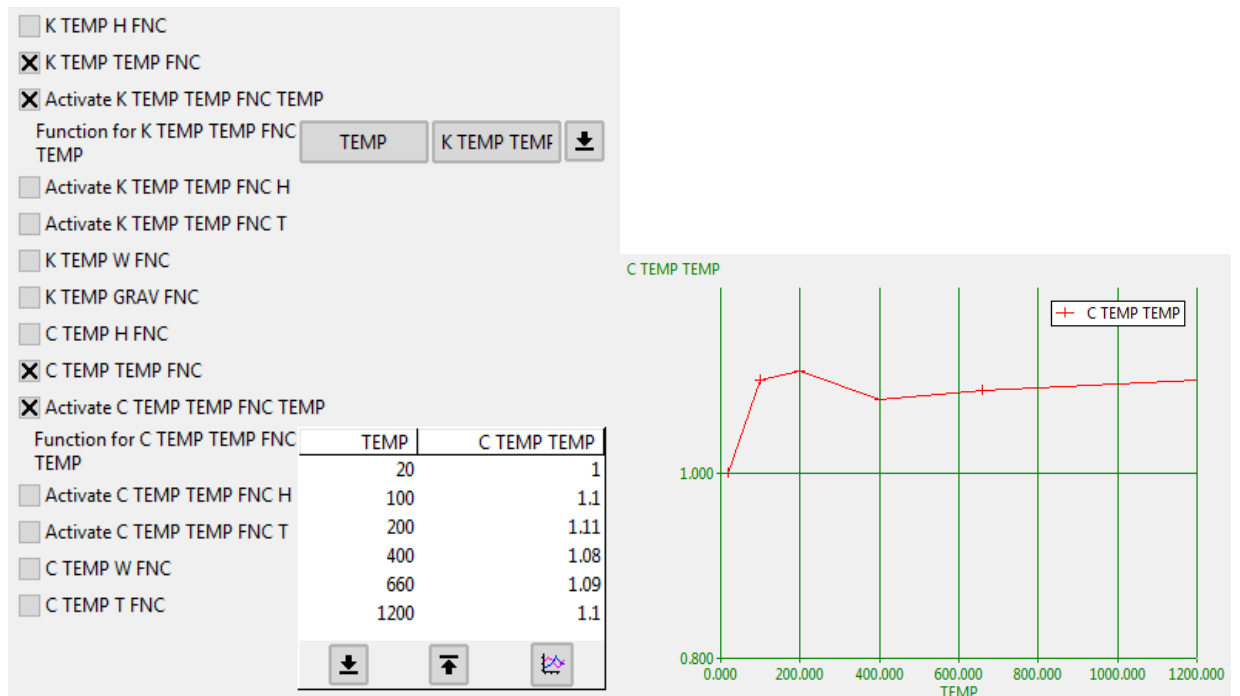
Tab. 14: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro skelné vlákno s převodem jednotek pro program Atena

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace	Hodnota zadaná do Ateny
T [°C]	c [kJ/(kg.K)]	ρ [kg/m ³]	w [%]	c [J/(m ³ .C)]	c [kJ/(m ³ .C)]	$c_T/c_{20^\circ\text{C}}$
20	1.20	30.00	-	36000	36.0	1.00
100	1.34	29.49	-	39517	39.5	1.10
200	1.38	28.83	-	39785	39.8	1.11
400	1.38	28.20	-	39029	39.0	1.08
660	1.39	28.20	-	39170	39.2	1.09
1200	1.40	28.20	-	39480	39.5	1.10

Tab. 15: Vztah teploty a měrné tepelné kapacity pro skelné vlákno s převodem jednotek pro program Atena



Obr. 47: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu tepelné vodivosti skelného vlákna v závislosti na teplotě

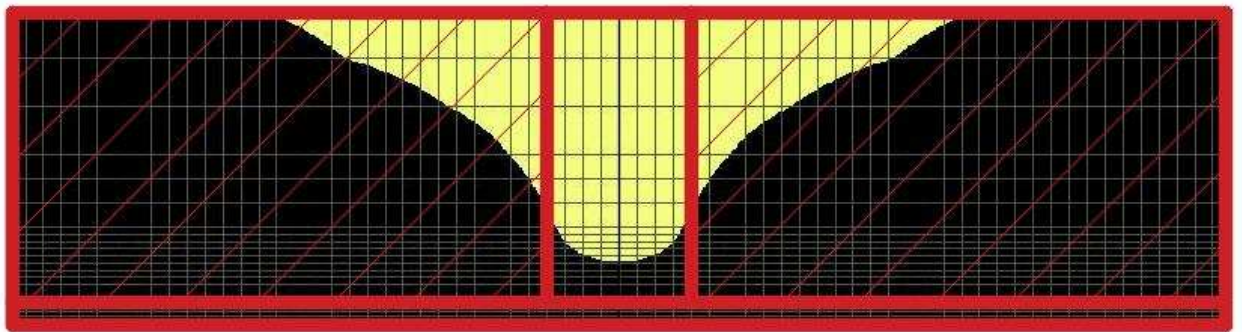


Obr. 48: Hodnoty zadané do výpočetního programu Atena definující změnu měrné tepelné kapacity skelného vlákna v závislosti na teplotě

V tab. 14,15 a obr. 47, 48 jsou uvedeny hodnoty pro skelné vlákno, zadané do výpočetního programu Atena. Hodnoty OSB a dřevěného trámu jsou převzaty z předcházející kapitoly pro kamenné vlákno.

5.2.1 Tepelná analýza dřevěného trémového stropu s výplní dutin ze skelného vlákna po 30 minutách

Po výpočtu tepelné analýzy v programu Atena pro dobu trvání požáru 30 minut v konstrukci s užitím skelného vlákna je výstupem vykreslení rozložení teplot v průřezu namodelovaného prvku s hranicí zuhelnatění. Tato hranice je dána teplotou 300 °C, kde dochází k zuhelnatění dřeva a ztrátě jeho mechanické odolnosti viz obr. 49, kde černá barva označuje materiál s teplotou přesahující 300 °C a žlutá vyznačuje účinný průřez v geometrii trému. Pro srovnání s dalšími výsledky je spočítán průřezový modul pro účinný průřez trému.



Obr. 49: Profil trémové konstrukce s dutinami vyplněnými skelným vlákem ve vyšrafované části po 30 minutách normového požáru s hranicí teploty 300 °C

Výpočet únosnosti trému s dutinami vyplněnými skelným vlákem po 30 minutách požáru:

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$k_{crit} = 1,0$ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)

$k_{mod,fi} = 0,99$ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)

$k_{fi} = 1,25$ (součinitel pro rostlé dřevo)

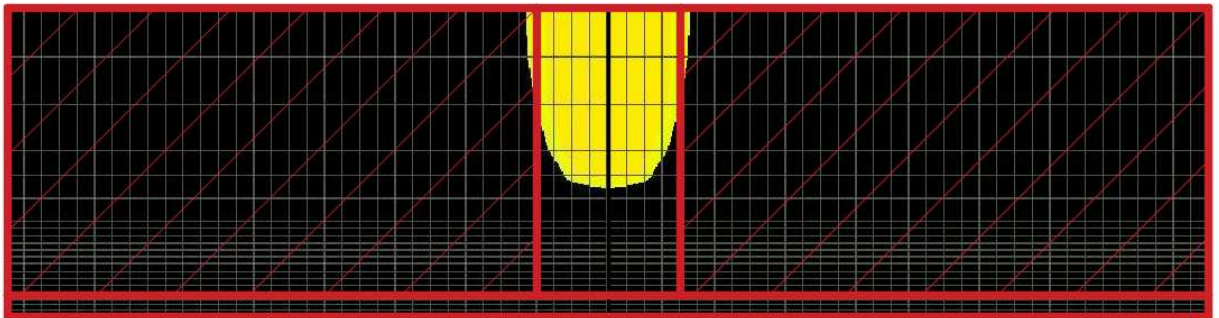
$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 4,99 \text{ kN/m'}$$

5.2.2 Tepelná analýza dřevěného trámového stropu s výplní dutin ze skelného vlákna po 45 minutách

Dobou trvání požáru 45 minut pro konstrukci trámového stropu s použitím výplně dutin ze skelných vláken dojde k výraznému oslabení průřezu viz. obr. 50. V následující rovnici je opět vypočítán průřezový modul účinného průřezu, který bude v závěru práce porovnán s ostatními výsledky. Graf průběhu teplot měřených bodů pro konstrukci s výplní ze skelného vlákna je uveden na obr. 51.



Obr. 50: Profil trámové konstrukce s dutinami vyplněnými skelným vláknem ve vyšrafované části po 45 minutách normového požáru s hranicí teploty 300 °C

Výpočet únosnosti trámu s dutinami vyplněnými skelným vláknem po 45 minutách požáru:

$$\sigma_{m,fi,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,fi,d} \quad [9]$$

$k_{crit} = 1,0$ (příčná i torzní stabilita nosníku je zajištěna)

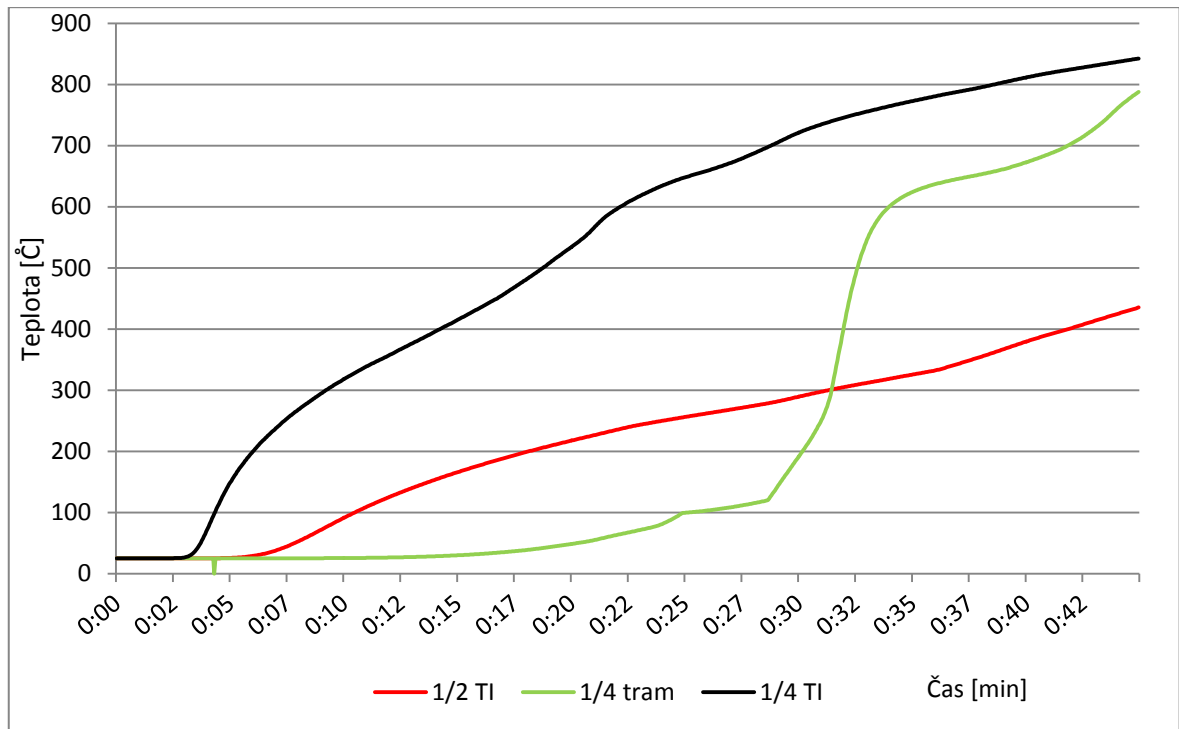
$k_{mod,fi} = 0,99$ (modifikační součinitel požáru měnící parametry požáru)

$k_{fi} = 1,25$ (součinitel pro rostlé dřevo)

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 0,99 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 29,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m,fi,d} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = f_{m,fi,d}$$

$$\Rightarrow q_d = 2,5 \text{ kN/m'}$$

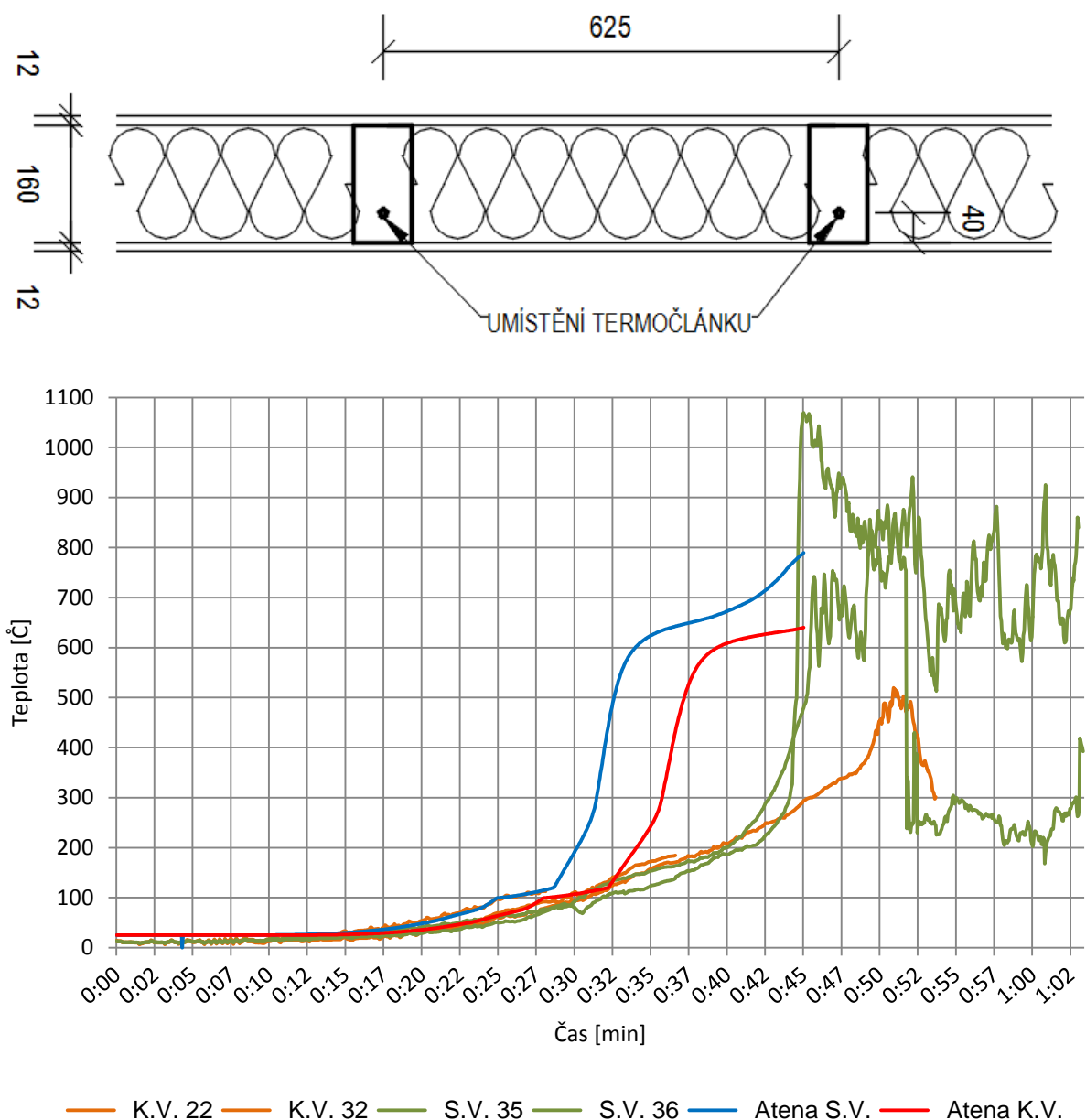


Obr. 51: Graf průběhu teplot v měřených bodech pro konstrukci stropu s výplní dutin ze skelného vlákna vypočtený programem Atena

6 Výsledné grafy průběhů teplot experimentu a tepelné analýzy

V této kapitole budou porovnány hodnoty průběhu teplot měřených bodů z tepelné analýzy a experimentu pro konstrukce s výplní dutin z kamenného a skelného vlákna. V závěru kapitoly – tab. 16 se nachází srovnání účinných průřezů, jejich únosnosti a odhořelé vrstvy pro všechny použité druhy výpočtu s experimentem.

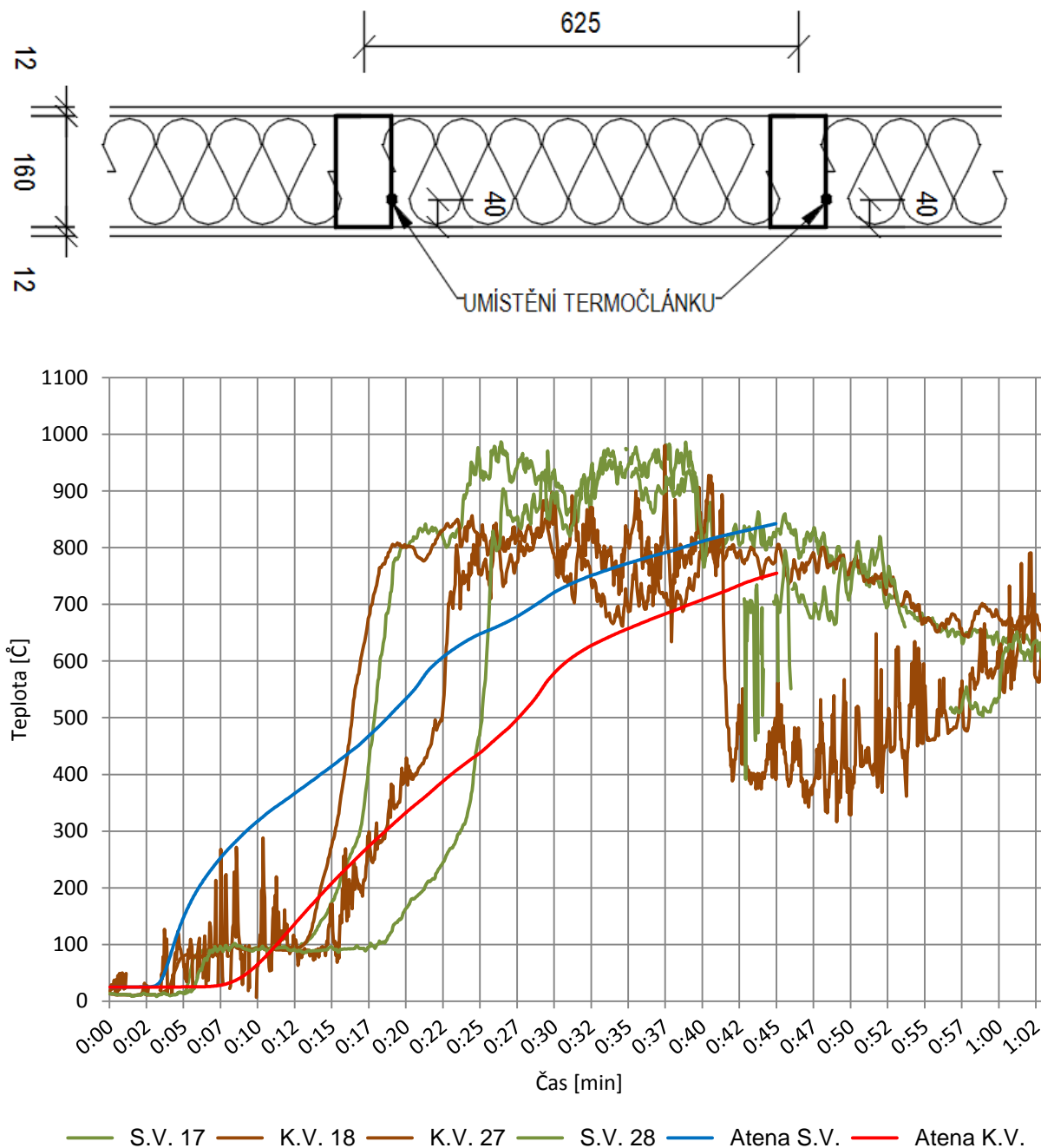
6.1 Střed trámu



Obr. 52: Hodnoty teplot z experimentu a pomocí tepelné analýzy v ose trámu 40 mm od spodního okraje

Z hodnot v grafu na obr. 52 můžeme vidět, že průběh teplot ve srovnání s tepelnou analýzou a experimentem je podobný s tím rozdílem, že v průběhu experimentu došlo pravděpodobně vlivem pomalejšího rozvoje požáru k pozdějšímu zuhelnatění v měřeném bodě. Časový rozdíl při použití odlišné minerální izolace je pro měřený bod a nárůst teploty 300 °C delší pro tepelnou analýzu a to o 5 minut, u experimentu je rozdíl nárůstu 1 – 3 minuty.

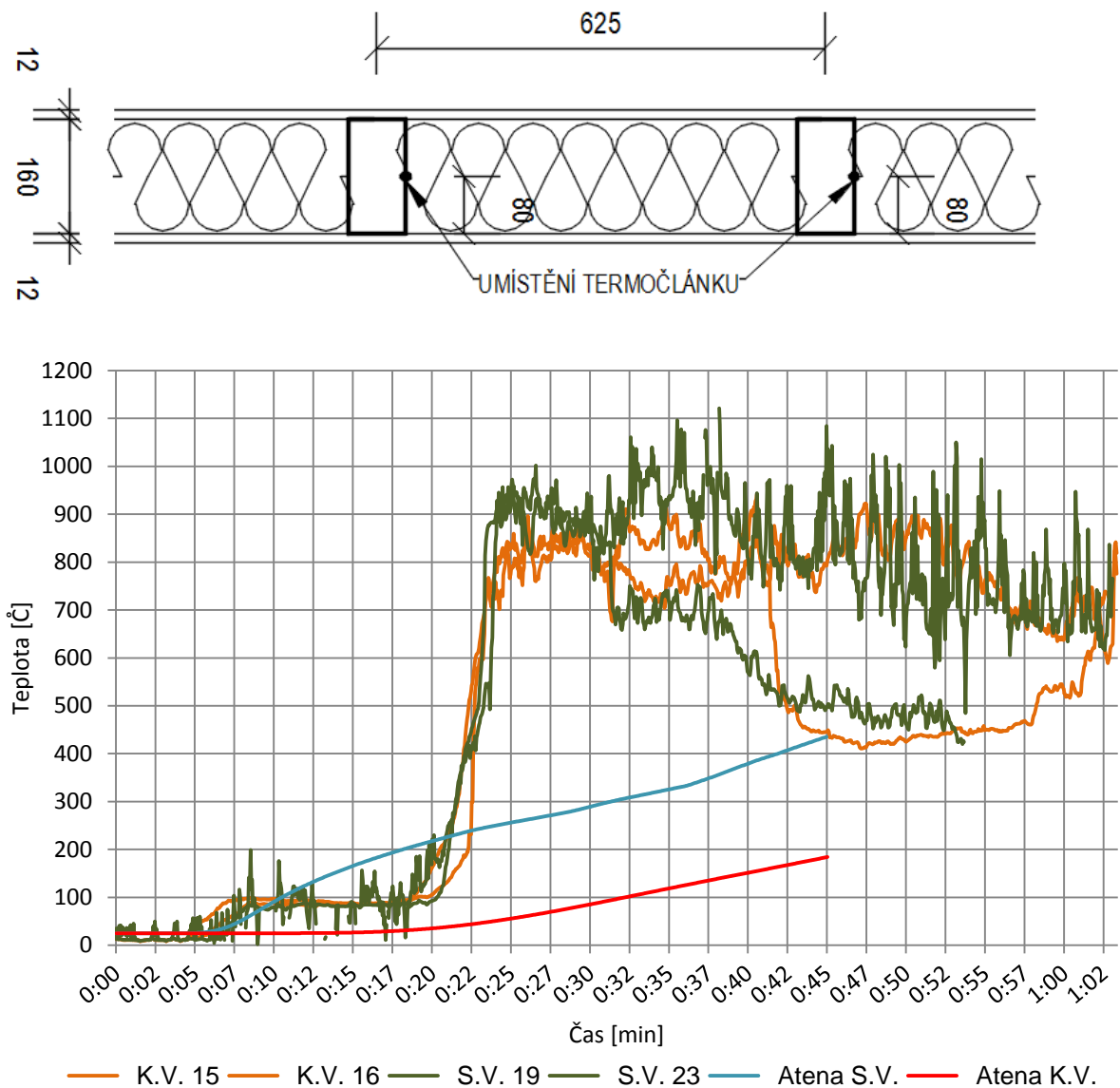
6.2 Spodní hrana trámu



Obr. 53: Hodnoty teplot z experimentu a pomocí tepelné analýzy na styku trámu a minerální izolace 40 mm od spodního okraje

Porovnání hodnot na styku izolace s trámem ve výšce 40 mm od spodního okraje trámu v obr. 53 vycházejí pro skelné vlákno v rámci experimentu příznivěji. Co se týče nárustu teploty v porovnání experimentu a tepelné analýzy, tak lze konstatovat, že se jedná o nárůst velmi obdobný.

6.3 Střední hrana trámu



Obr. 54: Hodnoty teplot z experimentu a pomocí tepelné analýzy na styku trámu a minerální izolace 80 mm od spodního okraje

Rozdíl v průběhu teplot pro měřený bod ve výšce 80 mm nad spodní hranou trámu na jeho styku s izolací v obr. 54. bude způsoben konstrukční nedokonalostí při provedení experimentu, kde je možné pozorovat prudký nárůst teploty, kdy se teplota dostala do mezery mezi trámem a izolací. Je zde tak možné pozorovat odhořívání trámu z boku jak v případě se skelným, tak kamenným

vlákem. Tepelná analýza však materiál považuje za celistvý a dochází zde tak k velmi postupnému a pomalému průniku teploty.

Metoda výpočtu:	t_{fire}	Kamenné vlákno		Skelné vlákno		prázdná dutina	
		d_{char} [mm]	q_d [kN/m']	d_{char} [mm]	q_d [kN/m']	d_{char} [mm]	q_d [kN/m']
Analytický výpočet	30	30,4	5,20	7,8 minut		3 x 24,8	2,15
	45	51,0	3,68			Ø	Ø
Tepelná analýza	30	28,0	5,40	32,0	4,99	-	
	45	55,0	3,41	70,0	2,50		
Experiment	300 °C	40,0 mm -> 45 minut (4,46 kN/m')		40,0 mm -> 42 minut (4,46 kN/m')		-	

Tab. 16: *Výsledné zhodnocení zuhelnatělých částí a únosnosti účinných průřezů pro trám s rozměry 80 x 160 mm v konstrukci s výplní dutin ze skelných a kamenných vláken a opláštěním z desek OSB*

Z celkových výsledků se můžeme opřít o fakt, že při výpočtech analytickou metodou a tepelnou analýzou odhořívání konstrukce dřevěného trámového stropu při využití výplně dutin z kamenného vlákna dojdeme k poměrně stejným výsledkům. A v porovnání s experimentem se vypočtené výsledky pohybují na straně bezpečnosti.

Oproti tomu skelné vlákno, kde nám v případě jeho použití norma nakazuje, že při odpadnutí ochranného pláště dochází ke kolapsu, nám experiment dokázal, že tomu tak není. Použitím skelného vlákna je účinný průřez v případě požáru trvajících 42 minut v experimentu schopný přenést zatížení 4,46 kN/m'. Ale v případě aplikace výpočtu z normy nám použití skelného vlákna odolává požáru pouze 7,8 minut. Konstrukce s prázdnou dutinou, která by měla být vzhledem k okamžitému odhořívání po odpadnutí ochranného pláště s menší požární odolností, ale má schopnost přenést zatížení na daný prvek po 30 minutách normového požáru analytickým výpočtem 2,15 kN/m'. Výpočtem tepelnou analýzou přenesla konstrukce s užitím skelného vlákna po 45 minutách 2,50 kN/m'.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá posouzením požární odolnosti, respektive míře zuhelnatění dřevěných stropních nosníků s opláštěním z OSB desek a výplní dutin z minerálních vláken. Posuzovaná konstrukce střešních nosníků je součástí experimentálního domku na bázi slámy v rámci velkorozměrové požární zkoušky.

Jedná se o trámy s průřezem 80/160 mm na rozpětí 3,2 m, které jsou rozděleny do dvou staticky nezávislých polí. V jednom poli je výplň ze skelného vlákna, ve druhém z vlákna kamenného. Míra zuhelnatění byla počítána pro pole s kamenným a skelným vláknem analytickou metodou, tepelnou analýzou a experimentem, pro dobu trvání požáru podle normové teplotní křivky (ISO 834) 30 a 45 minut.

Výsledky výpočtů a zkoušek přinesly poznatek, že požární odolnost konstrukce uvedená v ČSN EN 1995-1-2 s výplní dutin ze skelného vlákna je velmi podceňována a vychází jen lehce pod hodnotou požární odolnosti konstrukce s výplní z kamenného vlákna. Experimentální část nám toto tvrzení potvrdila v rámci časového úseku po odhoření vrstvy 40 mm s rozdílem 3 minut (42 min. skelné a 45 min. kamenné vlákno) pro odolnější konstrukci s použitím kamenného vlákna. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést další experimenty na použití skelného vlákna v trémové konstrukci s ochranným opláštěním z desek OSB, na jeho chování za požáru, možnosti zvýšení požární odolnosti konstrukce, ale také nebezpečí pro zasahující osoby před roztavenými vlákny odpadající ze stropní konstrukce.

Seznam obrázků

OBR. 1: PROCES HOŘENÍ DŘEVA	8
OBR. 2: RYCHLOST ODHOŘÍVÁNÍ NECHRÁNĚNÉHO DŘEVA ZAHŘÍVANÉHO KONSTANTNÍ TEPLOTOU 800°C	9
OBR. 3: RYCHLOST ZUHELNATĚNÍ PRO NECHRÁNĚNÉ PRVKY ¹ , PRO CHRÁNĚNÉ 2A RYCHLOST ZUHELNATĚNÍ VE ZVÝŠENÉ MÍŘE, 2B RYCHLOST ZUHELNATĚNÍ STEJNÁ JAKO PRO NECHRÁNĚNÝ PRVEK	11
OBR. 4: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO DŘEVO A ZUHELNATELOU VRSTVU.....	12
OBR. 5: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ KAPACITY PRO DŘEVO A DŘEVĚNÉ UHLÍ	12
OBR. 6: A) ILUSTRACNÍ OBRÁZEK SENDVIČOVÉHO PANELU S TEPELNĚ IZOLAČNÍM JÁDREM B) ROZDÍL TEPLot PŘI KONSTANTNÍ A PROMĚNNÉ HODNOTĚ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI λ	13
OBR. 7: A) TAVENÍ SUROVIN V KUPOLOVÉ PECI; B) VRSTVENÍ MATERIÁLU NA POHYBLIVÝ PÁS	14
OBR. 8: TECHNOLOGIE VÝROBY SKELNÉ MINERÁLNÍ VLNY	15
OBR. 9: OBECNÉ TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA VÝROBY MINERÁLNÍ VLNY Z ČEDIČOVO-STRUSKOVÉ SMĚSI.....	16
OBR. 10: UKLÁDÁNÍ MINERÁLNÍ IZOLACE DO "KAPES" PLETIVA MEZI TRÁMY	18
OBR. 11: EXPERIMENTÁLNÍ OBJEKT „SLAMÁK“ S NEOMÍTNUTÝMI SLAMĚNÝMI STĚNAMI	19
OBR. 12: A) UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ NA BOKU TRÁMU VE VÝŠCE 40 A 80 MM B) UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKU DO STŘEDU TRÁMU VE VÝŠCE 40 MM	20
OBR. 13: PRŮŘEZ POSUZOVANOU STROPNÍ KONSTRUKCÍ	20
OBR. 14: HODNOTY TEPLot PLÁŠŤOVÉHO TERMOČLÁNKU V OSE TRÁMU 40 MM OD SPODNÍHO OKRAJE	21
OBR. 15: HODNOTY TEPLot TERMOČLÁNKU NA STYKU TRÁMU A MINERÁLNÍ IZOLACE 40 MM OD SPODNÍHO OKRAJE.....	22
OBR. 16: PLNĚ ROZVINUTÝ POŽÁR PŘI POŽÁRNÍ ZKOUSCE EXPERIMENTÁLNÍHO OBJEKTU – 18. MINUTA	23
OBR. 17: HODNOTY TEPLot TERMOČLÁNKU NA STYKU TRÁMU A MINERÁLNÍ IZOLACE 80 MM OD SPODNÍHO OKRAJE.....	24
OBR. 18: ZCELA VYPLNĚNÉ DUTINY MINERÁLNÍ IZOLACÍ A STROPNICE ZAJIŠTĚNÉ PROTI PŘÍČNÉ A TORZNÍ NESTABILITĚ POMOCÍ DESEK NA STRANĚ NEVYSTAVĚNÉ POŽÁRU	25
OBR. 19: ČAS PORUŠENÍ DESKY V MINUTÁCH	26
OBR. 20: ZMĚNA RYCHLOSTI ODHOŘÍVÁNÍ OBKLADOVÉ DESKY NA ZÁKLADĚ HUSTOTY A JEJÍ TLOUŠŤKY.....	27
OBR. 21: VÝPOČET HLOUBKY ZUHELNATĚNÍ ZAHRNUTÍ ZAOBLENÍ ROHŮ A TRHLIN	28
OBR. 22: ÚČINNÝ PRŮŘEZ TRÁMU S OBVODOVÝM PLÁŠŤEM Z OSB 12 MM A PRÁZDNÝMI DUTINAMI PO 30 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU	29
OBR. 23: ODPADNUTÍ MINERÁLNÍ IZOLACE Z PROSTORU MEZI TRÁMY VE 30. MINUTĚ POŽÁRU	30
OBR. 24: ÚČINNÝ PRŮŘEZ TRÁMU S OBVODOVÝM PLÁŠŤEM Z OSB 12 MM S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI KAMENNÝM VLÁKNEM PO 30 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU ANALYTICKÝM VÝPOČTEM	32
OBR. 25: ÚČINNÝ PRŮŘEZ TRÁMU S OBVODOVÝM PLÁŠŤEM Z OSB 12 MM S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI KAMENNÝM VLÁKNEM PO 45 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU ANALYTICKÝM VÝPOČTEM	33
OBR. 26: GEOMETRIE POLOVINY PRVKU V PROGRAMU GID ROZDĚLENÁ DO PLOCH.....	34
OBR. 27: VÝSTŘIŽEK Z ČSN EN 1995-1-2 UVÁDĚJÍCÍ HODNOTU EMISIVITY ROSTLÉHO DŘEVA	35
OBR. 28: HODNOTY EMISIVIT STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ	36
OBR. 29: NORMOVÁ TEPLOTNÍ KŘIVKA ISO 834	37
OBR. 30: NORMOVÁ TEPLotNÍ KŘIVKA DEFINOVANÁ V PROGRAMU ATENA	37
OBR. 31: ZATÍŽENÍ GEOMETRIE PRŮŘEZU V PROGRAMU ATENA TEPLotNÍ KŘIVKOU.....	38
OBR. 32: UMÍSTĚNÍ MONITOROVACÍCH BODŮ V PROGRAMU ATENA	38
OBR. 33: SCHÉMATICKÝ ŘEZ ZADANÉ GEOMETRIE Z PROGRAMU ATENA S POUŽITÍM KAMENNÉHO VLÁKNA VČETNĚ UMÍSTĚNÍ ČIDEL TERMOČLÁNKŮ A SÍŤE MESH	39
OBR. 34: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU TEPELNÉ VODIVOSTI DŘEVA C 24 V ZÁVISLOSTI NA TEPLotĚ	41
OBR. 35: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU TEPELNÉ KAPACITY DŘEVA C 24 V ZÁVISLOSTI NA TEPLotĚ	42
OBR. 36: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU TEPELNÉ VODIVOSTI OSB V ZÁVISLOSTI NA TEPLotĚ	43

OBR. 37: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU MĚRNÉ TEPelné KAPACITY OSB V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ	44
OBR. 38: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU TEPelné VODIVOSTI KAMENNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ	46
OBR. 39: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU MĚRNÉ TEPelné KAPACITY KAMENNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ	46
OBR. 40: ZADÁNÍ ČASOVÉHO INTERVALU 30 MINUT DO PROGRAMU ATENA PRO PRŮBĚH TEPLIT V MĚŘENÝCH BODECH	47
OBR. 41: PROFIL TRÁMOVÉ KONSTRUKCE S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI KAMENNÝM VLÁKNEM VE VYŠRAFOVANÉ OBLASTI PO 30 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU S HRANICÍ TEPLITY 300° C	47
OBR. 42 ZADÁNÍ ČASOVÉHO INTERVALU 45 MINUT DO PROGRAMU ATENA PRO PRŮBĚH TEPLIT V MĚŘENÝCH BODECH	48
OBR. 43: PROFIL TRÁMOVÉ KONSTRUKCE S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI KAMENNÝM VLÁKNEM VE VYŠRAFOVANÉ OBLASTI PO 45 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU S HRANICÍ TEPLITY 300° C	48
OBR. 44: GRAF PRŮBĚHU TEPLIT V MĚŘENÝCH BODECH PRO KONSTRUKCI STROPU S VÝPLNÍ DUTIN Z KAMENNÉHO VLÁKNA VYPOČTENÝ PROGRAMEM ATENA.....	49
OBR. 45: SCHÉMATICKÝ ŘEZ ZADANÉ GEOMETRIE Z PROGRAMU ATENA S POUŽITÍM SKELNÉHO VLÁKNA VČETNĚ UMÍSTĚNÍ ČIDEL TERMOČLÁNKŮ	50
OBR. 46: ZMĚNY TEPelné VODIVOST A TEPelné KAPACITY SKELNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ.....	50
OBR. 47: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU TEPelné VODIVOSTI SKELNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ.....	52
OBR. 48: HODNOTY ZADANÉ DO VÝPOČETNÍHO PROGRAMU ATENA DEFINUJÍCÍ ZMĚNU MĚRNÉ TEPelné KAPACITY SKELNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ	52
OBR. 49: PROFIL TRÁMOVÉ KONSTRUKCE S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI SKELNÝM VLÁKNEM VE VYŠRAFOVANÉ ČÁSTI PO 30 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU S HRANICÍ TEPLITY 300° C	53
OBR. 50: PROFIL TRÁMOVÉ KONSTRUKCE S DUTINAMI VYPLNĚNÝMI SKELNÝM VLÁKNEM VE VYŠRAFOVANÉ ČÁSTI PO 45 MINUTÁCH NORMOVÉHO POŽÁRU S HRANICÍ TEPLITY 300° C	54
OBR. 51: GRAF PRŮBĚHU TEPLIT V MĚŘENÝCH BODECH PRO KONSTRUKCI STROPU S VÝPLNÍ DUTIN ZE SKELNÉHO VLÁKNA VYPOČTENÝ PROGRAMEM ATENA.....	55
OBR. 52: HODNOTY TEPLIT Z EXPERIMENTU A POMOCÍ TEPelné ANALÝZY V OSE TRÁMU 40 MM OD SPODNÍHO OKRAJE.....	56
OBR. 53: HODNOTY TEPLIT Z EXPERIMENTU A POMOCÍ TEPelné ANALÝZY NA STYKU TRÁMU A MINERÁLNÍ IZOLACE 40 MM OD SPODNÍHO OKRAJE.....	57
OBR. 54: HODNOTY TEPLIT Z EXPERIMENTU A POMOCÍ TEPelné ANALÝZY NA STYKU TRÁMU A MINERÁLNÍ IZOLACE 80 MM OD SPODNÍHO OKRAJE.....	58

Seznam tabulek

TAB. 1: NÁVRHOVÉ RYCHLOSTI ZUHELNATĚNÍ B_0 A B_N PRO DŘEVO, LVL, DŘEVĚNÉ OBLOŽENÍ A DESKY NA BÁZI DŘEVA	10
TAB. 2: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO DŘEVO A ZUHELNATĚLOU VRSTVU	12
TAB. 3: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ KAPACITY PRO DŘEVO A DŘEVĚNÉ UHLÍ	12
TAB. 4: HODNOTY SOUČINITELE λ VYPOČTENÉ ZE VZTAHŮ [4] A [5] A HODNOTY UDÁVANÉ VÝROBCEM	17
TAB. 5: ROZMĚRY A VÝSLEDNÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI TRÁMŮ POUŽITÝCH V EXPERIMENTU	35
TAB. 6: HODNOTY SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY DLE ČSN EN 1995-1-2	40
TAB. 7: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO DŘEVO A ZUHELNATĚLOU VRSTVU S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	40
TAB. 8: VZTAH TEPLoty A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY PRO DŘEVO A ZUHELNATĚLOU VRSTVU S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	41
TAB. 9: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO OSB A ZUHELNATĚLOU VRSTVU S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	42
TAB. 10: VZTAH TEPLoty A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY PRO OSB A ZUHELNATĚLOU VRSTVU S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	43
TAB. 11: VZTAH MĚNÍCÍ SE TEPELNÉ VODIVOSTI A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY KAMENNÉHO VLÁKNA V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	44
TAB. 12: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO KAMENNÉ VLÁKNO S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	45
TAB. 13: VZTAH TEPLoty A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY PRO KAMENNÉ VLÁKNO S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	45
TAB. 14: VZTAH TEPLoty A TEPELNÉ VODIVOSTI PRO SKELNÉ VLÁKNO S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA.....	51
TAB. 15: VZTAH TEPLoty A MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY PRO SKELNÉ VLÁKNO S PŘEVODEM JEDNOTEK PRO PROGRAM ATENA	51
TAB. 16: VÝSLEDNÉ ZHODNOCENÍ ZUHELNATĚLÝCH ČÁSTÍ A ÚNOSNOSTI ÚČINNÝCH PRŮŘEZŮ PRO TRÁM S ROZMĚRY 80 x 160 MM V KONSTRUKCI S VÝPLNÍ DUTIN ZE SKELNÝCH A KAMENNÝCH VLÁKEN A OPLÁŠTĚNÍM Z DESEK OSB	59

Literatura

1. ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha : ÚNMZ, 2006.
2. **Pešková, Zdeňka**. Diplomová práce. *Vliv účinku požáru na chování tepelných*. Praha : FSv ČVUT v Praze, 2016.
3. **Kupilík, Václav**. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha : Grada Publishing a.s., 2006. ISBN 80-247-1329-2.
4. **Wald, František**. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha : ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
5. **Pavlík, Zbyšek**. Materiály pro tepelné izolace I. místo neznámé : Katedra materiálového inženýrství a chemie FSv ČVUT v Praze, 2015.
6. stavba.tzb-info.cz. [Online] 10 2014. <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11827-vyuziti-odpadnich-materialu-z-vyroby-mineralni-vlny-do-stavebnich-hmot>.
7. **Wang Yong, Burgess Ian, Wald František, Gillie Martin**. *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. Hoboken : CRC Press, 2012. ISBN 9780203868713.
8. **AL., BIRGIT OSTMAN (EDITOR) .. [ET**. *Technical guideline for Europe*. Boras, Sweden : SP Technical Research Institute of Sweden, 2010. 978918631960.
9. ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha : ÚNMZ, 2004.