

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA K POŽÁRNÍ
OCHRANĚ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ**
WOOD-BASED MATERIALS SUITABLE FOR FIRE
PROTECTION OF THE STEEL CONSTRUCTIONS

Bc. Michaela Táborská

vedoucí práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Táborská Jméno: Michaela Osobní číslo: 458609
 Zadávající katedra: K134
 Studijní program: Stavební inženýrství
 Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Materiály na bázi dřeva k požární ochraně ocelových konstrukcí
 Název diplomové práce anglicky: Wood-based materials suitable for fire protection of the steel constructions
 Pokyny pro vypracování:
 Shrnutí problematiky, vlastní studie pomocí analytických postupů, zhodnocení experimentu, numerická studie

Seznam doporučené literatury:

-

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Čábová, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Podpis]
Podpis vedoucího práce

[Podpis]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Berú 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 nutně 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“.

1.10.2020

Datum převzetí zadání

[Podpis]
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Bc. Michaela Táborská

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Kamile Cábové, Ph.D. za pomoc a odborné vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jakobovi Šejnovi, za možnost zúčastnit se provedeného experimentu na UCEEB ČVUT v Praze a za poskytnutí odborných rad. Poděkování patří i mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali a pomáhali mi během celého mého studia.

Obsah

Čestné prohlášení	III
Poděkování	IV
Abstrakt	VII
Abstract	VIII
Seznam použitých symbolů a zkratk	IX
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Cíle práce	1
2 Současný stav poznání	2
2.1 Dřevo a materiály na bázi dřeva	2
2.1.1 Chování dřeva během jeho zahřívání.....	3
2.1.2 Vlastnosti dřeva za zvýšených teplot.....	4
2.1.3 Zuhelnatění dřeva.....	6
2.1.4 Numerické modelování dřevěných konstrukcí při požáru	12
2.1.5 Rychlost zuhelnatění	17
2.1.6 Pyrolýza	20
2.2 Chování ocelových konstrukcí za vysokých teplot.....	22
2.2.1 Mechanické vlastnosti oceli při požáru.....	23
2.2.2 Tepelně technické vlastnosti oceli při požáru	25
3 Analytický model	26
3.1 Použité vzorce a postup výpočtu.....	26
3.2 Vstupní údaje	29
3.3 Výpočet	30
3.4 Vyhodnocení výpočtu	32
4 Experiment	35
4.1 Úvod.....	35
4.2 Cíl experimentu.....	35
4.3 Popis testovacích zařízení	35
4.3.1 Room Corner Test.....	35
4.3.2 Pec miniFUR.....	36
4.4 Experiment v Room Corner Test	37
4.4.1 Vlastnosti použitých materiálů	39
4.4.2 Průběh a vyhodnocení zkoušky pomocí RCT.....	40
4.5 Experiment v peci miniFUR	41
4.5.1 Vlastnosti použitých materiálů	41
4.5.2 Zkoušený vzorek	41
4.5.3 Průběh a závěr zkoušky	42
5 Numerický model v programu B-RISK	46
5.1 Cíl numerického modelu v programu B-RISK	46
5.2 Modelování v programu B-RISK.....	46

5.2.1	Ověření programu	46
5.2.2	Modelování skutečného výkonu z experimentu.....	49
5.2.3	Ruční výpočet přírůstku teploty od hoření dřeva.....	50
5.2.4	Vyhodnocení výsledků.....	52
6	Teplota ocelového prvku	56
6.1.1	Povrchová teplota prvku	57
6.1.2	Vstupní charakteristiky dřeva	58
6.1.3	Vyhodnocení výsledků.....	61
7	Závěr	64
	Seznam obrázků.....	66
	Seznam tabulek	68
	Seznam grafů.....	69
	Literatura	70

Abstrakt

Práce se zabývá ověřením možnosti použití rostlého dřeva a materiálu na bázi dřeva k požární ochraně ocelové konstrukce. Popisuje jejich složení, charakteristické vlastnosti a jejich závislost na teplotě. Práce se také podrobněji zabývá zuhelnatělou vrstvou, která značně ovlivňuje chování prvků během požáru. Obsahuje shrnutí české i zahraniční literatury, jež se zabývají experimenty, numerickými či analytickými modely odhořívání dřeva. Další část práce se zabývá analytickým modelem pro ochranu ocelové desky právě dřevem či materiálem na bázi dřeva, kde je zkoumána závislost materiálu a tloušťka materiálu, která určuje, jak moc je daný ocelový prvek odolný vůči požáru. Z důvodu ověření správnosti modelu vytvořeného v zónovém programu B-RISK byla v peci miniFUR provedena požární zkouška. Cílem tohoto experimentu bylo zkoumání průběhu teploty v horní vrstvě pece, kde vlivem odhořívání ochranného prvku dochází k přírůstku teploty od jeho hoření. Tento přírůstek od odhořívání je dopočítán ručně. Následně je pomocí analytického modelu, který používá přírůstkovou metodu, dopočítána teplota ocelového prvku, který je chráněn dřevem či materiálem na bázi dřeva.

Klíčová slova

dřevo; zuhelnatění; rychlost zuhelnatění; požár; požární odolnost; modely zuhelnatění dřeva; požární ochrana; ocel; zónový model; B-RISK

Abstract

The thesis is focused on verification of a possibility of using wood and wood-based materials for fire-protective purposes. It describes what are they consist of, what are their characteristic features and how they change depending on different temperature. The thesis also deals with so called charring layer which affects behaviour of particular elements during a fire quite a lot. It includes a summary of the Czech and foreign literature which describes experiments, numerical and analytical wood charring models and wood burn out process. The next part of the thesis deals with a numerical model that is used for a protection of a steel plate carried out by wood or wood-based materials and which examines dependency of the material as well as its thickness which determinates how the steel element is protected against the fire. In order to verify the accuracy of the model created in the B-RISK zone software an experiment in the miniFUR furnace was carried out. The main objective of this experiment was to examine the course of the temperature in the furnace's upper layer where due to the protect element's burn out process there is a temperature increase from its burning. This increase caused by the burn out process is calculated manually. The temperature of the steel element protected by wood or wood-based materials is calculated subsequently thanks to the analytic model which uses an incremental method.

Keywords

wood; charring; charring rate; fire; fire resistance; wood charring models; fire protection; steel; zone model; B-RISK

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Celková plocha otvorů ve svislých ohraničeních požárního úseku (okna apod.)	m^2
A_i	Předexponenciální faktor pro složku i	$1/s$
$A_{i,a}$	Plocha svislých otvorů i	m^2
A_m	Povrchová plocha nechráněného prvku (obvod)	m^2/m
A_t	Celková plocha stropů, stěn a podhledů, které obklopují požární úsek	m^2
b	Pohltivost pro celé ohraničující konstrukce	$J/m^2 \cdot s^{0,5} \cdot K$
c	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
c_a	Měrné teplo oceli	$J/(kg \cdot K)$
c_i	Počáteční stav látky	
c_p	Měrné teplo požárně ochranného materiálu	$J/(kg \cdot K)$
d_a	Tloušťka oceli	mm
$d_{char,0}$	Návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění	mm
$d_{char,n}$	Nominální návrhová hloubka zuhelnatění, která zahrnuje účinek zaoblení rohů	mm
d_{ef}	Účinná hloubka zuhelnatění	mm
d_0	Tloušťka vrstvy s předpokládanou nulovou pevností a tuhostí	mm
d_p	Tloušťka požárně ochranného materiálu	mm
e	Emisivita	-
E_i	Aktivační energie pro složku i	J/mol
ΔH_{eff}	Efektivní výhřevnost dřeva	J/kg
h_{eq}	Vážený průměr výšek všech svislých otvorů (oken apod.)	m
h_i	Výška svislého otvoru i	m
$h_{net,d}$	Celkový tepelný tok	W/m^2
$h_{net,c}$	Tepelný tok prouděním	W/m^2
$h_{net,r}$	Tepelný tok sáláním	W/m^2
h_p	Tloušťky desky	mm
$k_{E,\theta}$	Redukční součinitel pro sklon lineárního elastického rozsahu	-
k_h	Součinitel tloušťky desky	-

k_0	Součinitel	-
k_p	Součinitel hustoty	-
$k_{p,\theta}$	Redukční součinitel pro úměrnou mez	-
k_{sh}	Faktor stínění	-
$k_{y,\theta}$	Redukční součinitel pro efektivní mez kluzu	-
$k_{\lambda,mod}$	Lineární modifikační faktor vodivosti	-
$k_{\Gamma,mod}$	Faktor rychlosti ohřevu	-
$k_{qtd,mod}$	Faktor hustoty zatížení požárem	-
L_v	Odpařované teplo suchého dřeva	J/kg
$n_{s,ij}$	Řád reakce pro složku i	-
O	Součinitel otvorů	$m^{0,5}$
$q_{t,d}$	Návrhová hustota požárního zatížení vztažená na celkovou plochu stropů, stěn a podhledů, které obklopují požární úsek	MJ/m^2
q_n	Tepelný tok na straně zuhelnatění	W/m^2
R	Plynová konstanta = 8,314472	$J/(K \cdot mol)$
r_{jt}	Hmotnostní rychlost odhořívání	1/s
t	Čas	min
t_o	Časové období s konstantní rychlostí zuhelnatění	min
Δt	Časový interval	s
$T_{ing,ij}$	Iniciační teplota pro složku dřeva i	$^{\circ}C$
T_o	Počáteční teplota	$^{\circ}C$
T_p	Průměrná teplota vrstvy pyrolýzy	$^{\circ}C$
T_{js}	Teplota j-tého prvku	$^{\circ}C$
V	Objem prvku na jednotku délky	m^3
V_m	Objem nechráněného prvku (plocha)	m^3/m
x	Funkce hloubky	mm
y	Funkce hloubky	mm

Řecké symboly

α_c	Součinitel přestupu tepla prouděním	$W/(m^2 \cdot K)$
β_n	Nominální návrhová rychlost zuhelnatění, jejíž rozsah zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin	mm/min

β_0	Jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení účinkům normového požáru	mm/min
$\beta_{o,p,t}$	Rychlost zuhelnatění pro materiály na bázi dřeva	mm/min
β_{par}	Rychlost zuhelnatění pro parametrickou křivku požáru	mm/min
Γ	Rychlost ohřevu vzhledem ke standardní křivce ohně	-
$\Delta\Theta_{a,t,ch}$	Přírůstek povrchové teploty ochranného materiálu	°C
$\Delta\Theta_{a,t,n}$	Přírůstek povrchové teploty nechráněného materiálu	°C
$\Delta\Theta_{g,t}$	Přírůstek okolní teploty během časového intervalu	°C
ε	Poměrné protažení v čase t	-
ε_σ	Přetvoření od silového zatížení závisující na napětí σ a na teplotě θ	-
ε_θ	Příspěvek přetvoření teplotního protažení závislého na teplotě θ	-
ε_{cr}	Přetvoření od tečení oceli závisující na napětí σ , na teplotě θ a na čase t	-
Θ	Teplota	°C
$\Theta_{a,t}$	Teplota oceli	°C
$\Theta_{a,t,ch}$	Povrchová teplota ochranného materiálu	°C
$\Theta_{a,t,n}$	Povrchová teplota nechráněného materiálu	°C
Θ_g	Teplota plynu	°C
Θ_m	Povrchová teplota prvku	°C
Θ_r	Sálavá teplota okolí prvku	°C
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
λ_p	tepelná vodivost požárně ochranného materiálu	W/(m·K)
μ_0	Stupeň vyztužení	-
ρ	Objemová hmotnost, hustota	kg/m ³
ρ_a	Objemová hmotnost oceli	kg/m ³
ρ_k	Charakteristická hustota	kg/m ³
ρ_p	Objemová hmotnost požárně ochranného materiálu	kg/m ³
$\rho_{s,i}$	Hustota dřeva při i-té teplotě	kg/m ³
$\rho_{s,0}$	Hustota dřeva při teplotě 20 °C	kg/m ³
\emptyset	Polohový faktor, zpravidla	-

Zkratky

CETRIS	Cementotřísková deska Cetriz Basic
CFAST	Consolidated Model od Fire and Smoke Transport
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Křížem lepené dřevo
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
MDF	Středně hustá vláknitá deska
MKP	Metoda konečných prvků
OSB	Deska z orientovaných plochých třísek
PNP	Požárem nezasažený prvek
RCT	Room Corner Test
SFRC	Beton vyztužený ocelovými vlákny
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

1 Úvod

1.1 Motivace

V dnešní době jsou dřevo a materiály na bázi dřeva díky svým vlastnostem stále více používány nejen ve stavebnictví. Je to přírodní obnovitelný zdroj, který má nižší energetické nároky na výrobu a nižší znečištění. Dřevo má mnoho výhod, ale značným nedostatkem je jeho hořlavost, která s sebou nese jisté obavy při použití ve stavebních konstrukcích. A i když je dřevo hořlavé, lze jej díky výbornému chování při požáru použít jako ochranný materiál. Zatímco většina požárně ochranných materiálů je časově náročná jak na výrobu, tak údržbu, dřevo dokáže snížit energetickou náročnost na výrobu a je vhodným estetickým doplňkem. Během požáru vzniká na straně dřeva vystaveného ohni zuhelnatělá vrstva, která slouží jako izolační ochranná vrstva pro pevné materiály, jež se nacházejí pod ní. Požární ochranu pomocí dřevěných desek nebo rostlého dřeva je možné využít nejen pro ocelové prvky.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je ověření možnosti použití rostlého dřeva a materiálu na bázi dřeva k požární ochraně ocelové konstrukce. Tento výzkum zahrnuje nejen studium zuhelnatělé vrstvy dřeva, ale také souhrn všeobecných znalostí o dřevě a o materiálech na bázi dřeva. Studium zuhelnatělé vrstvy dřeva má mimo jiné poukázat na rozdílné výsledky existujících analytických modelů odhořívání dřeva a rychlosti zuhelnatění, které jsou podloženy experimenty a numerickými modely. Schopnost dřeva sloužit jako požární ochrana je rovněž ověřena pomocí vlastní požární zkoušky a numerického modelu. Příspěvek hoření požární ochrany je simulován v zónovém modelu.

Hlavními cíli práce jsou:

- 1) Shrnout existující modely odhořívání/rychlosti zuhelnatění dřeva z literatury.
- 2) Zhodnotit vliv zuhelnatění vrstvy dřeva na izolační schopnost dřeva.
- 3) Vytvořit model v zónovém programu, který bude znázorňovat průběh teploty v horní vrstvě i s přírůstkem od hoření hořlavého materiálu.
- 4) Pomocí analytického modelu dopočítat teplotu ocelového prvku, který je chráněn dřevem či materiálem na bázi dřeva.
- 5) Výsledky porovnat s experimentem.

2 Současný stav poznání

Pro ochranu konstrukcí se používá velká řada ochranných materiálů, které snižují rychlost nárůstu teploty v konstrukci vystavené požáru. Běžně používané ochranné prostředky jsou desky z křemičitanu vápenatého nebo sádkokartonu, spreje na bázi cementu se skleněnou nebo celulóзовou vláknitou výztuží nebo intumescentní nátěry. Tyto prostředky jsou ale náročné na výrobní čas, výrobní materiály a energii. Materiály na bázi dřeva mají výhodu, že jsou obnovitelným zdrojem, který snižuje energetickou náročnost a znečištění ve všech odvětvích, včetně odvětví stavebnictví. Další výhodou použití dřeva či materiálů na bázi dřeva je rychlá montáž, při které, na rozdíl od jiných ochranných prvků, nedochází k mokrému procesu.

2.1 Dřevo a materiály na bázi dřeva

Dřevo je jedním z nejstarších stavebních materiálů, který se v historii ve stavebnictví používal převážně na nosné konstrukce. V dnešní době má dřevo široké uplatnění ve všech různých odvětvích.

Dřevo je organický, nehomogenní, anizotropní a hydrofobní materiál. Dřevo je složeno z 50 % z uhlíku, 43 % z kyslíku, 6 % z vodíku, 0,3 % z dusíku a dalších minerálních látek (draslík, sodík, vápník...). Tyto prvky vytvářejí řadu složitých organických látek, z nichž nejdůležitější jsou celulóza, hemicelulóza a dále cukry, lignin a takzvané extraktivní látky. [1][2][3]

Materiály na bázi dřeva mají oproti rostlému dřevu výhodu ve větší homogenitě. Rostlé dřevo se považuje za nehomogenní, jelikož má v různých směrech jiné vlastnosti (kolmo na vlákna a rovnoběžně s vlákny). Dalším problémem přispívajícím k nehomogenitě jsou například suky, smolníky a některé ostatní jeho charakteristiky.

Za účelem lepšího využití kladných vlastností dřeva a ve snaze eliminovat některé jeho nevýhody se začaly vyrábět materiály na bázi dřeva. Ty se vyrábějí různými průmyslovými zpracováními, kde jde zejména o lisování dřevních elementů (např. dýhy, třísky, vlákna...). Tyto prvky s rozdílnými postupy při výrobě ovlivňují vlastnosti konečných výrobků. Za nejběžnější výrobky ve stavebnictví můžeme uvažovat vláknité, překližkové, třískové a OSB desky, lepené lamelové dřevo a dřevo vrstvené, modifikované a zhuštěné. Některé typy materiálů na bázi dřeva jsou vidět na Obrázku 1. [1][4]



Obrázek 1 Materiály na bázi dřeva

(zleva –spárovka, překližka, OSB deska, dřevotřísková deska, izolační vláknitá deska, vláknitá deska se střední hustotou, dřevo-plastová deska, sendvičový panel)[4]

2.1.1 Chování dřeva během jeho zahřívání

Makromolekuly, které obsahují uhlík, vodík a kyslík, jsou základními stavebními prvky dřeva a jiných organických hmot. Za normální teploty a tlaku jsou mezi nimi pevné vazby, které jsou značně odolné vůči vzdušnému kyslíku. Během zahřívání dřeva dojde k rozkmitání makromolekul a porušení vazeb. V důsledku toho se makromolekuly začnou rozpadat na menší částice (monomery). Vyskytují se převážně v plynném skupenství a snadno reagují se vzdušným kyslíkem. Během tohoto procesu vznikají endotermické a exotermické reakce. Endotermická reakce je reakcí, při které dřevo absorbuje teplo a dochází tak k jeho sušení, přičemž u exotermické reakce dochází k uvolnění značného množství tepla a zároveň zde probíhá oxidace rozkladných produktů.[3]

Jedná-li se o pomalu probíhající proces oxidace, stačí převládající část uvolněného tepla uniknout do okolního prostoru. Pokud ale dojde k určité rychlosti, tak uvolněné teplo nestačí uniknout, čímž tak dochází k samozahřívání dřeva, které může skončit i samovznícením. Může nastat i tzv. suchá destilace, při které se dřevo tepelně rozkládá bez přístupu vzduchu.[3]

Teplota vzplanutí neboli nejnižší teplota, při které se látka přiblížením plamene vznítí a opět zhasne, se pohybuje okolo 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, tzv. bod hoření, se udává v rozmezí 260–290 °C. Při teplotě 330–370 °C dochází k samovolnému vznícení bez použití otevřeného plamene. Teplota 120 °C se uvažuje za kritickou mez deformace zatížené nosné dřevěné konstrukce, respektive teplota vznícení na povrchu cca 300 °C. Všechny tyto hodnoty jsou závislé na druhu dřeva a jeho vlhkosti.[3]

2.1.2 Vlastnosti dřeva za zvýšených teplot

2.1.2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost dané konstrukce vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části do jiné, chladnější části. Tepelnou vodivost dřeva ovlivňuje jeho vlhkost. Při větším obsahu vlhkosti má horší tepelně izolační vlastnosti. Záleží také, v jakém směru tepelnou vodivost u dřeva měříme, protože jinou hodnotu naměříme rovnoběžně s vlákny a jinou kolmo na vlákna (viz Tabulka 1). Dřevo má poměrně malou tepelnou vodivost (hlavně ve směru napříč vlákny), tudíž se považuje za relativně dobrý tepelný izolant.[5]

Tabulka 1 Tepelná vodivost dřeva [5]

Materiál	Koeficient tepelné vodivosti λ (W/(m·K))
Dřevo \perp (w = 12 %)	0,12 – 0,18
Dřevo \parallel (w = 12 %)	0,25 – 0,45
Dřevní substance \perp	0,44
Dřevní substance \parallel	0,88

Tepelnou vodivost materiálů na bázi dřeva ovlivňuje velké množství faktorů, přičemž jedním z nich může být například použitý element dřeva. Základní materiály a jejich tepelná vodivost je vyznačena v Tabulce 2.[6]

Tabulka 2 Tepelná vodivost materiálů na bázi dřeva [6]

Materiál na bázi dřeva	Tepelná vodivost W/(m·K)
OSB deska	0,13
Dřevotřískové desky MFP	0,13
Středně hustá vláknitá deska MDF	0,10
CETRIS deska tl. 22 mm	0,251

2.1.2.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň. U dřeva se tato hodnota zvyšuje s teplotou, obsahem vlhkosti a hustotou. Například pro absolutně suché dřevo při teplotě 0 °C se udává průměrná hodnota měrného tepla 1,45 kJ/(kg·K). Pro různé dřeviny je tato hodnota odlišná, jak je patrné z Tabulky 3.[5]

Tabulka 3 Vliv druhu dřeva a vlhkosti na měrné teplo [5]

Druh dřeva	Měrné teplo dřeva c (kJ/(kg·K))					
	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	100 %
Smrk	1,35	1,51	1,63	1,80	2,18	2,80
Borovice	1,41	1,54	1,66	1,87	2,33	2,80
Dub	1,45	1,59	1,67	1,91	2,37	2,79
Buk	1,46	1,60	1,71	1,92	2,41	2,83

2.1.2.3 Hustota dřeva

Hustota a objemová hmotnost jsou dva odlišné termíny, které se mohou pro různé látky lišit. Jak uvádí norma [7], v případě rostlého dřeva a materiálů na bázi dřeva je řeč o hustotě. Ačkoliv je pravou, že v různých publikacích je ta stejná hodnota nazvána objemovou hmotností.

Hustota je fyzikální veličina, která vyjadřuje, jakou hmotnost má jednotkový objem látky. Ve srovnání s jinými materiály se hustota dřeva určuje obtížněji vzhledem k jeho hygroskopicitě, ale i tak patří k jedné z nejdůležitějších charakteristik. Hmotnost i objem dřeva jsou velmi ovlivněny jeho vlhkostí. Pokud bude uvažována vlhkost dřeva 12 %, můžeme domácí dřeviny rozdělit do tří základních skupin, které jsou znázorněny v Tabulce 4.[5]

Tabulka 4 Rozdělení domácích dřevin podle hustoty při vlhkosti 12 % [5]

Dřevo s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg/m}^3$)	borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba, olše, osika
Dřevo se střední hustotou ($\rho_{12} = 540 - 750 \text{ kg/m}^3$)	modřín, tis, bříza, buk, hrušeň, dub ořešák, jilm, jabloň jasan, jeřáb, třešeň, kaštanovník
Dřevo s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$)	habr, zimozráz, dřín, moruše, akát

Hustota vybraných materiálů na bázi dřeva je vypsána v Tabulce 5.

Tabulka 5 Hustota materiálů na bázi dřeva [8]

Materiál na bázi dřeva	Hustota (kg/m ³)
Překližka	600-900
Dřevotřískové desky	730-880
OSB desky	600-640
Dřevovláknité desky	200-850
Dřevocementové desky	400-1350

2.1.2.4 Obsah vlhkosti

Vlhkost dřeva je obsah kapalin ve dřevě, kterým je vyjádřena hmotností vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Udává se v procentech a značně ovlivňuje vlastnosti dřeva. Rozlišujeme tři základní hraniční hodnoty, které se určují podle podílu vody ve dřevě. Jedná se o vlhkost suchého dřeva, kde se ve dřevě neobjevuje žádná vázaná ani volná voda. Druhá hraniční hodnota je vlhkost při nasycení buněčných stěn, kde mikrokapilární systém v buněčné stěně je zcela zaplněn vodou. Přičemž vlhkost při nasycení dřeva je v mikrokapilární i makrokapilárním systému plně nasycen vodou, dřevo tak obsahuje maximální množství vody.[5]

2.1.3 Zuhelnatění dřeva

Kritický parametr pro určení požární odolnosti dřeva je rychlost zuhelnatění, která je ovlivněna několika faktory, a to především hustotou, emisivitou, obsahem vlhkosti a tepelným tokem. Během požáru se na dřevě či na materiálech na bázi dřeva neobjevují trhliny a povrch se projevuje jako uzavřený, což je způsobeno tím, že během požáru nepraskají a ani příliš nevysychají.[1][9][10]

Jestliže se vystaví dřevo vysokým teplotám, dojde k jeho degradaci. Vystavená vrstva dřeva se promění na zuhelnatělou vrstvu, což vede ke snížení hustoty dřeva. Tato vrstva zuhelnatění brání přístupu vzdušného kyslíku do vnitřní části prvku, a tím tlumí hoření a dobře tepelně chrání nezasáženou část.[10][11]

Pro zkoumání zuhelnatění dřeva se používají různé postupy, a to analytické a numerické modely a experimenty. Experimenty jsou v dnešní době velmi nákladné, a tak je snaha najít jiný, levnější způsob, jak zkoumat nejen zuhelnatění dřeva. K tomu slouží numerické a analytické modely, které se snaží vyrovnat reálnému chování.

2.1.3.1 ČSN EN 1995-1-2

V Eurokódu 5 (ČSN EN 1995-1-2) [7] nalezneme dva modely pro stanovení míry zuhelnatění, a to jednorozměrný a dvourozměrný. Jednorozměrný model je zjednodušenou verzí, kde je hloubka zuhelnatění dřeva lineární v čase (viz Obrázek 2). Dvourozměrný neboli nominální model je pokročilejší metodou, která zahrnuje účinek zaoblení rohů. Tyto dva modely

používají normovou teplotní křivku. Dále se v Příloze A této normy nachází výpočet zuhelnatění pro parametrickou křivku.

Výpočet zuhelnatění dřeva podle ČSN EN 1995-1-2 [7]

1. Jednorozměrné zuhelnatění – využití normové teplotní křivky

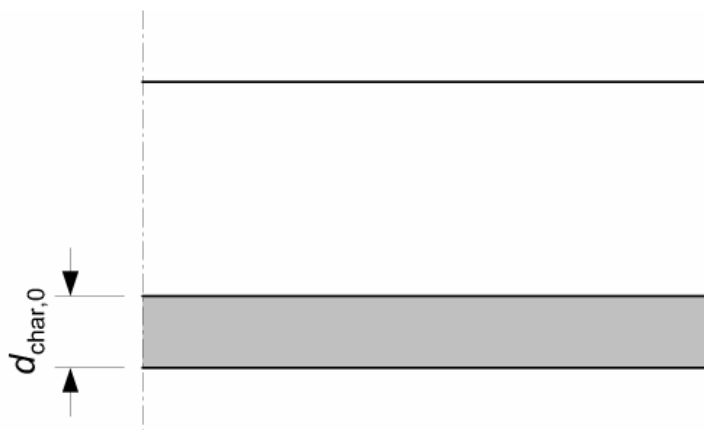
a) Výpočet návrhové hloubky zuhelnatění

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 * t \quad (1)$$

kde $d_{\text{char},0}$ je návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění; mm

β_0 jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení účinkům normového požáru (Tabulka 6); mm/min

t doba vystavená účinku požáru; min



Obrázek 2 Jednorozměrné zuhelnatění širokého průřezu [7]

b) Účinná hloubka zuhelnatění

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},0} + k_0 * d_0 \quad (2)$$

kde d_{ef} účinná hloubka zuhelnatění; mm

$d_{\text{char},0}$ návrhová hloubka zuhelnatění; mm

k_0 součinitel; -

d_0 tloušťka vrstvy s předpokládanou nulovou pevností a tuhostí; 7 mm

2. Nominální rychlost zuhelnatění – využití normové teplotní křivky

a) Výpočet návrhové hloubky zuhelnatění

$$d_{\text{char},n} = \beta_n * t \quad (3)$$

kde $d_{\text{char},n}$ je nominální návrhová hloubka zuhelnatění, které zahrnuje účinek zaoblení rohů; mm

- β_n nominální návrhová rychlost zuhelnatění, jejíž rozsah zahrnuje účinek zaoblení rohů a trhlin (Tabulka 6); mm/min
 t doba vystavená účinku požáru; min

Tabulka 6 Návrhová rychlost zuhelnatění [7]

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a) Dřevo jehličnatých dřevin a buk Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Dřevo listnatých dřevin Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL s charakteristickou hustotou $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Desky Dřevěné obložení Překližka Desky na bázi dřeva jiné než překližky	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –
^a Hodnoty platí pro charakteristickou hustotou 450 kg/m^3 a tloušťku desky 20 mm; pro ostatní tloušťky a hustoty viz 3.4.2(9).		

b) Účinná hloubka zuhelnatění

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \quad (4)$$

- kde d_{ef} účinná hloubka zuhelnatění; mm
 $d_{char,n}$ návrhová hloubka zuhelnatění; mm
 k_0 součinitel (Tabulka 7); -
 d_0 tloušťka vrstvy s předpokládanou nulovou pevností a tuhostí; 7 mm

Tabulka 7 Určení k_0 pro nechráněné povrchy s (t v minutách) [7]

	k_0
$t < 20$ minut	$t/20$
$t \geq 20$ minut	1,0

3. Výpočet rychlosti zuhelnatění a hloubky zuhelnatění vrstvy dřeva vystaveným účinkům parametrického požáru [7]

Rychlost zuhelnatění β_{par} se vypočítá podle rovnice (5)

$$\beta_{par} = 1,5 * \beta_n * \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} \quad (5)$$

s

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad (6)$$

$$O = \frac{A_v}{A_t} * \sqrt{h_{eq}} \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (8)$$

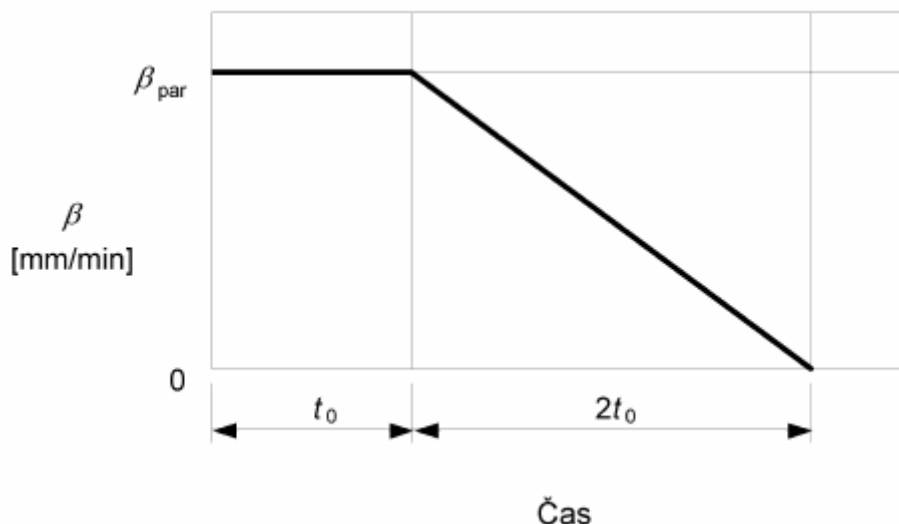
$$h_{eq} = \Sigma \frac{A_{i,a} h_i}{A} \quad (9)$$

kde	β_n	nominální návrhová rychlost zuhelnatění; mm/min
	A_v	celková plocha otvorů ve svislých ohraničeních požárního úseku (okna apod.); m ²
	A_t	celková plocha stropů, stěn a podhledů, které obklopují požární úsek; m ²
	$A_{i,a}$	plocha svislých otvorů „i“; m ²
	h_{eq}	vážený průměr výšek všech svislých otvorů (oken apod.); m
	h_i	výška svislého otvoru „i“; m
	Γ	rychlost ohřevu vzhledem ke standardní křivce ohně; -
	b	pohltivost pro celé ohraničující konstrukce, viz EN 1991-1-2, příloha A; J/m ² ·s ^{0,5} ·K
	λ	tepelná vodivost ohraničení požárního úseku; W/(m·K)
	ρ	objemová hmotnost ohraničení požárního úseku; kg/m ³
	c	měrné teplo ohraničení požárního úseku; J/(kg·K)
	O	faktor otvorů; m ^{0,5}

$$t_o = 0,009 * \frac{q_{t,d}}{O} \quad (10)$$

kde	t_o	je časové období s konstantní rychlostí zuhelnatění; min
	$q_{t,d}$	návrhová hustota požárního zatížení vztažená na celkovou plochu stropů, stěn a podhledů, které obklopují požární úsek; MJ/m ²

Pro nechráněné dřevo jehličnatých dřevin se používá vztah mezi rychlostí zuhelnatění β a časem t , viz Graf 1. Jak je z tohoto grafu patrné, t_o je konstantní rychlostí zuhelnatění a oblast $2t_o$ je fáze chladnutí ohně. Výpočet t_o je patrný v rovnici (10).

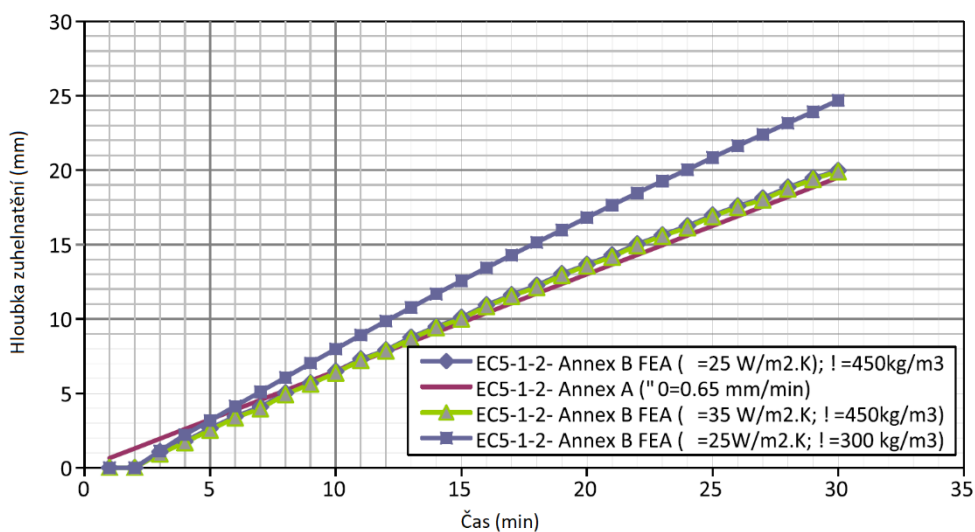


Graf 1 Vztah mezi rychlostí zuhelnatění a časem [7]

2.1.3.2 Výpočet hloubky zuhelnatění dle zahraničního výzkumu

V publikaci [12] autoři zkoumají výpočet zuhelnatění stanovený v ČSN EN 1995-1-2 a snaží se tento výpočet vylepšit či zahrnout do něho nové parametry. Práce poukazuje na to, že použitelnost v pokročilých metodách je podle této normy omezená. Ve své publikaci König [13] označuje, že nejsou výsledky normy konzistentní a pro například vyšší teplotní ohřev, než je tomu na křivce ISO 834, jsou výsledky extrémně konzervativní.

Pro kalibraci modelu vodivosti uvedeného v ČSN EN 1995-1-2 s parametrickými rychlostmi hoření se předpokládá, že hranice mezi zuhelnatěným a běžným dřevem je poloha izotermy 300 °C.[14][13][15] Tento předpoklad autoři ověřili pomocí numerického modelu v MKP v softwaru DIANA. Výsledky hloubky zuhelnatění dřeva dvou různých hustot vystavených různým hodnotám tepelného toku jsou patrné z Grafu 2.



Graf 2 Předpokládaná hloubka zuhelnatění [12]

Z výsledků modelů a zkoušek autoři upravili vztah mezi rychlostí zahřívání Γ a modifikačním faktorem $k_{\lambda,mod}$.

$$k_{\lambda,mod} = 1,45\Gamma^{-0,48} \quad (11)$$

Dále se autoři zabývali modifikací vodivosti, která je v ČSN EN 1995-1-2 nezávislá na hustotě dřeva a jeho vlhkosti. Z výsledků studie zjistili, že kolísání obsahu vlhkosti a hustoty má významný dopad na rychlost zuhelnatění předpovězenou pomocí numerického modelu. V průběhu výzkumu došli také k předpokladu, že je potřeba zohlednit vliv hustoty požárního zatížení, a tak výpočet modifikačního faktoru $k_{\lambda,mod}$ upravili na rovnici (12).

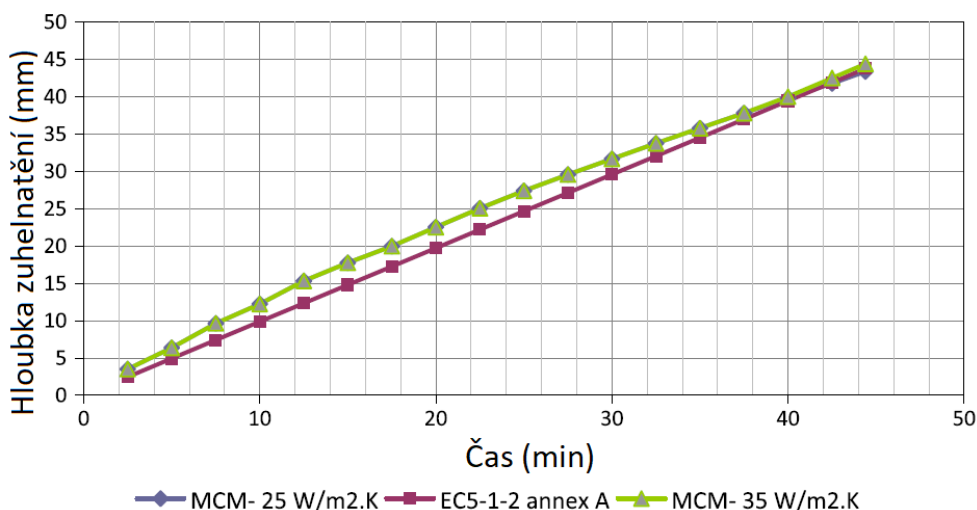
$$k_{\lambda,mod} = k_{\Gamma,mod} * k_{qtd,mod} \quad (12)$$

$$k_{\Gamma,mod} = 1,5\Gamma^{-0,48} \quad (13)$$

$$k_{qtd,mod} = \sqrt{\frac{q_{td}}{210}} \quad (14)$$

- kde $k_{\lambda,mod}$ modifikační faktor vodivosti; -
 $k_{\Gamma,mod}$ faktor rychlosti ohřevu; -
 $k_{qtd,mod}$ faktor hustoty zatížení požárem; -

Pro výpočet hloubky zuhelnatění při působení parametrického požáru autoři navrhuji úpravy oproti postupům uvedených v normě ČSN EN 1995-1-2. Tyto úpravy se týkají tepelných vlastností, které nejsou závislé pouze na teplotě, ale také na rychlosti zahřívání a požárním zatížení. Graf 3 uvádí porovnání hloubky zuhelnatění vypočítané dle normy a dle navrženého postupu v [12].



Graf 3 Porovnání hloubky zuhelnatění analýzou konečných prvků (FEA) a přílohou A pro $a = 25$ a $35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ($\Gamma = 10$, $q_{td} = 210 \text{ MJ}/\text{m}^2$, $\rho_o = 450 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\omega = 12\%$)

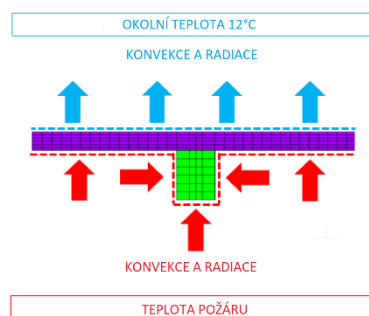
2.1.4 Numerické modelování dřevěných konstrukcí při požáru

2.1.4.1 Numerický model spřažené dřevobetonové stropní desky

V článku [17] se autoři zabývají MKP analýzou betonového stropu s výztuží z ocelových vláken – drátkobeton (SFRC) neseným dřevěným roštem (Obrázek 3) při působení teplot podle normové teplotní křivky. Autoři k simulaci zvolili program ANSYS 14 okrajové podmínky zavedené do modelu jsou patrné na Obrázku 4.



Obrázek 4 Model SFRC dřevěného roštu a drátkobetonové desky [15]

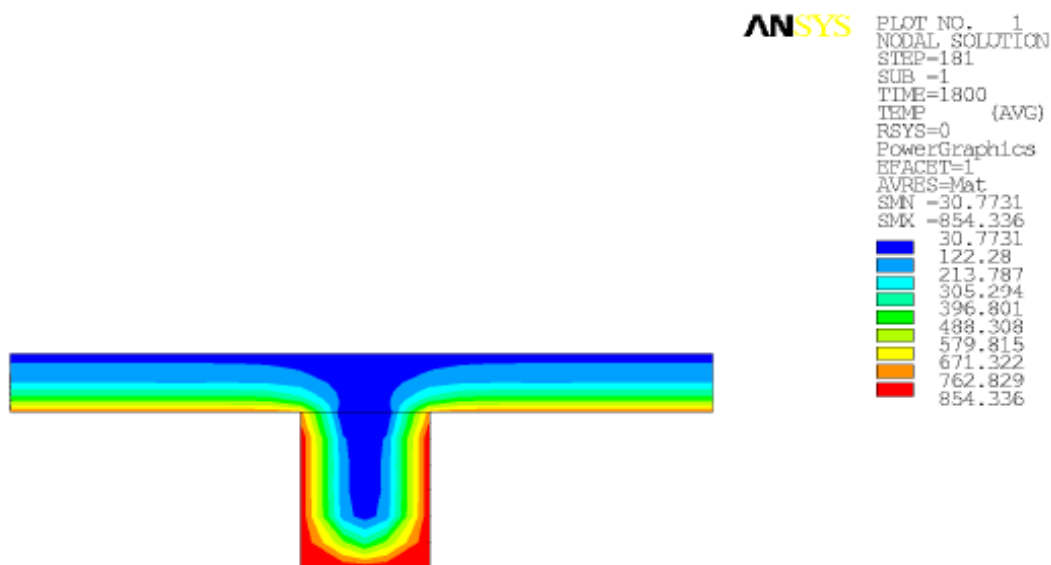


Obrázek 3 Okrajové podmínky do programu ANSYS [15]

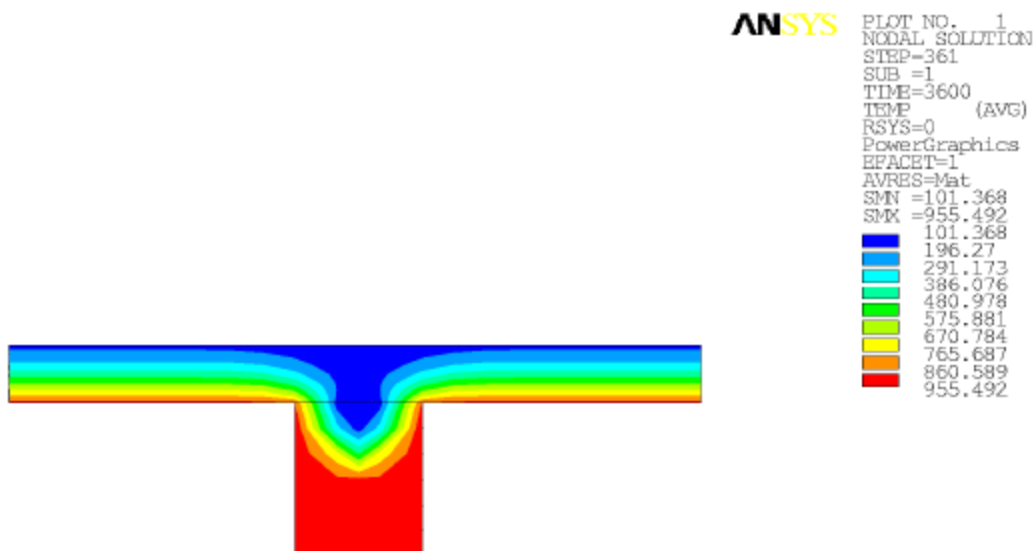
Teplotně závislé vztahy (hmotnostní hustota, tepelná vodivost a měrné teplo) pro vlastnosti dřeva autoři převzali z Eurokódu pro požární návrh dřevěných konstrukcí. Dřevo uvažovali za nelineární ortotropní materiál s Youngovým modelem závislým na teplotě. Pro přestup tepla byly použity koeficienty proudění na straně požáru $35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ a na odvrácené straně $30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Koeficient emisivity uvažovali 0,9.

Pro model materiálu dřeva přijali údaje pro lepené lamelové dřevo GL24h, modul pružnosti rovnoběžných s vlákny $11\,600 \text{ MPa}$, modul pružnosti kolmo na vlákna 390 MPa , smykový modul 720 MPa a pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny $16,5 \text{ MPa}$. Zuhelnatění dřeva uvažovali podle Eurokódu.

Výsledky průběhu teplot této analýzy ukazuje Obrázek 5 a Obrázek 6.



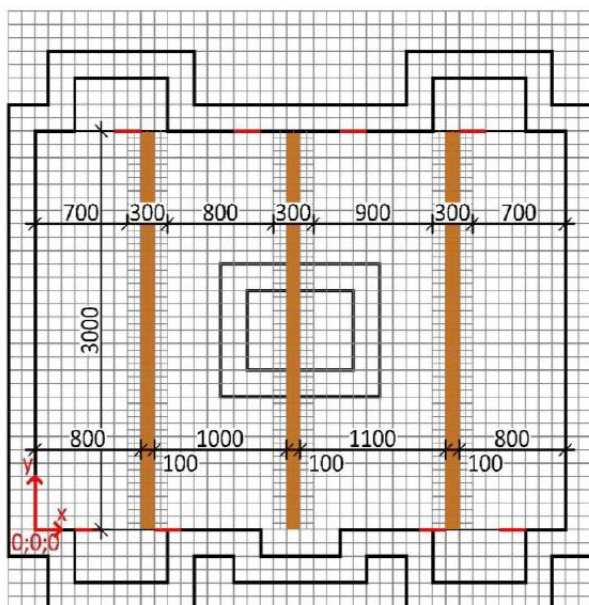
Obrázek 5 Vývoj teploty v 30. minutě [17]



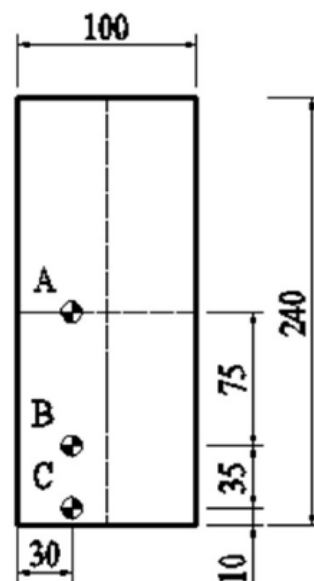
Obrázek 6 Vývoj teploty v 60. minutě [17]

2.1.4.2 Výpočet teplot v rostlém dřevu při požáru

V článku „Virtual test od fire-resistance od timber“ [18] se autoři zabývají ověřením výpočtu teploty dřeva z numerického modelu. Výsledky z modelu jsou porovnány s naměřenými daty z požární zkoušky. Předmětem jejich zkoumání byly tři dřevěné trámy o rozměrech 100 mm x 250 mm x 3000 mm umístěné pod stropem (Obrázek 7).



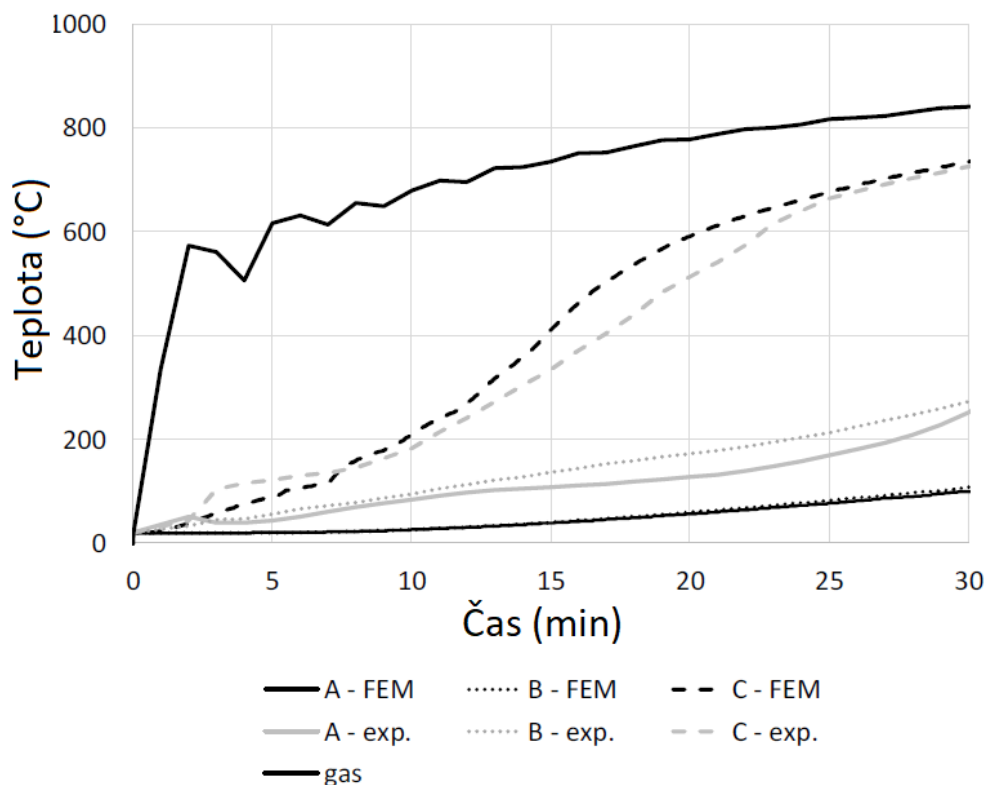
Obrázek 7 Půdorysné schéma rozmístění dřevěných trámů [18]



Obrázek 8 Řez dřevěným prvkem s označením kontrolních bodů A, B, C [18]

Pro výpočet přestupu tepla do dřeva v programu Atena Science použili teplotu prostředí v peci, kterou simulovali pomocí metody výpočetní dynamiky tekutin (CFD) softwarem FDS (Fire Dynamics Simulator). Tento postup byl zvolen z důvodu zaměření výzkumu na virtuální pec, která rozměrově a materiálově odpovídá skutečné peci. Tato skutečná pec se nachází v požární laboratoři PAVUS, a.s. v České republice.

Provedli tedy jak numerický model, tak i požární zkoušku. Stanovili si v obou variantách v průřezu dřevěného trámu tři kontrolní body A, B a C. Tyto body jsou umístěny v hloubce 30 mm. Přesná pozice bodů je znázorněna na Obrázku 8. Výsledky jejich práce jsou vidět na Grafu 4. Je zde patrné, že nejvyšší shoda výsledků je v bodě C, v ostatních bodech je rozdíl zhruba 100°C.

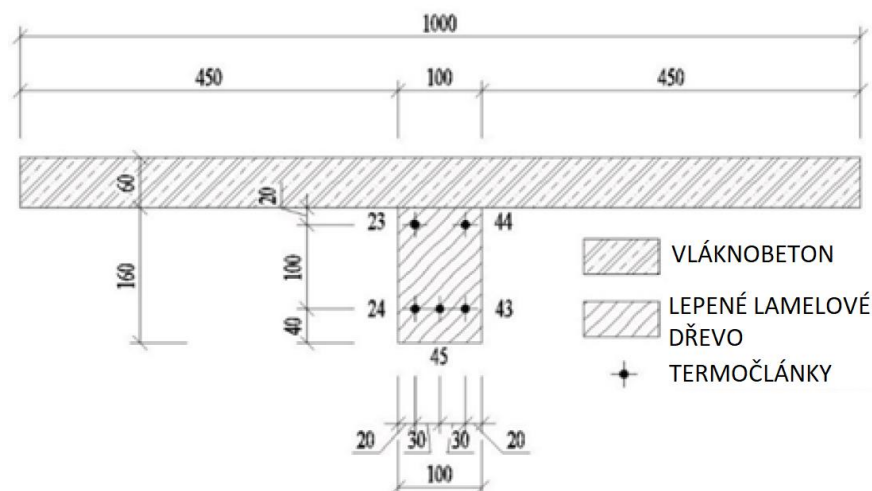


Graf 4 Porovnání výpočetních a naměřených teplot v kontrolních bodech A, B a C [18]

2.1.4.3 Zkouška dřevěného trámu při požáru a porovnání s analytickým modelem

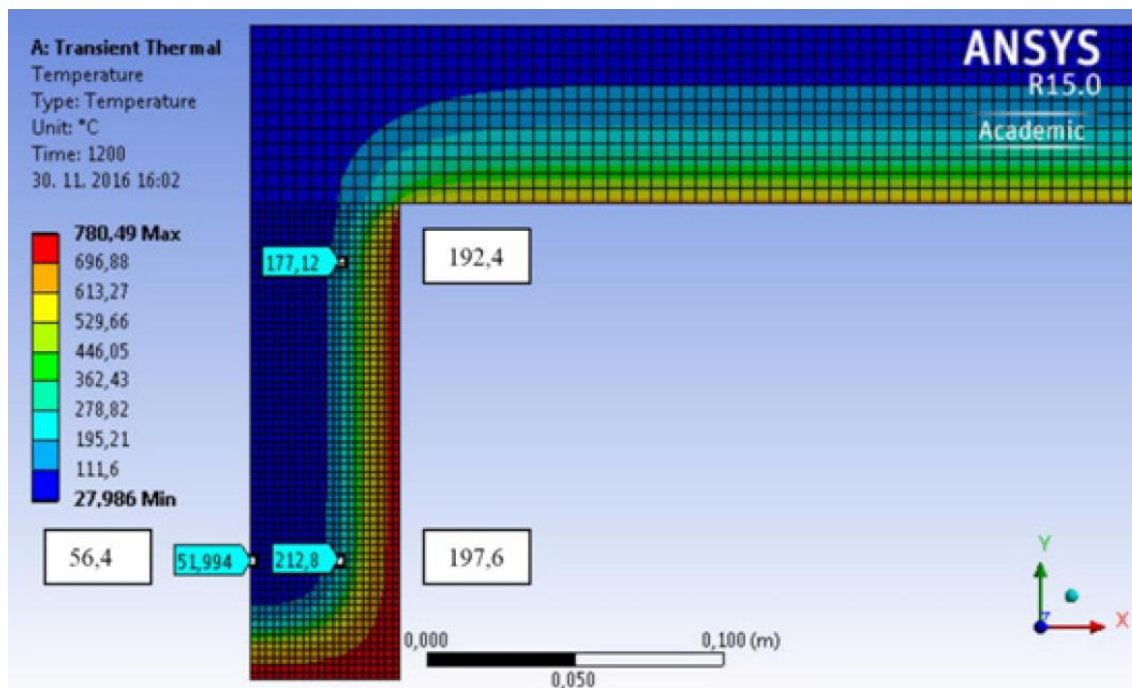
V první části publikace [9] se autoři zaměřili na teplotu při požáru v dřevěném trámu z experimentu ze zkušebny PAVUS, a.s, kterou porovnávali s výsledky modelu v programu AnsysWorkbench.

Jednalo se o dřevěný trám 100 mm x 160 mm, do kterého umístili termočlánky, které sloužily jako kontrolní body (body 23, 24, 43, 44 a 45). Nad dřevěným trámem byla umístěna betonová deska vyztužená ocelovými vlákny s tloušťkou 60 mm (Obrázek 9).



Obrázek 9 Znárodnění polohy termočlánků v průřezu [9]

V softwaru AnsysWorkbench vytvořili numerický model trámu totožný s experimentem a v kontrolních bodech posuzovali teplotu. Obrázek 10 ukazuje teploty naměřené během experimentu (teploty znázorněné v bílých rámečcích) a teploty z numerického modelu. Tyto hodnoty mají maximální odchylku $\pm 13 \%$.



Obrázek 10 Porovnání teploty z experimentu a z programu AnsysWorkbench [9]

2.1.4.4 Numerická simulace CLT panelu

V publikaci [19] autoři provedli požární zkoušku CLT panelu bez povrchové úpravy o rozměrech 1000 mm x 1500 mm x 80 mm (třívrstvý). Jednalo se o panel tvořený smrkovými třískovými lamelami s vlhkostí 12 %. Zkouška proběhla ve středně rozměrovém měřítku. Výsledky tohoto testu porovnávají s modelací v programu Ansys 18.1.

Experiment probíhal tedy na CLT panelu, který měl vrstvy 20 mm, 40 mm a 20 mm. Vzorek umístili do vzdálenosti 200 mm od radičního panelu, přičemž intenzita hoření byla 43,11 kW/m². Test probíhal 40 minut. Pozorovali zuhelnatění panelu, kde se první vrstva chová stejně, jako by se jednalo o rostlé dřevo. Když došlo k zuhelnatění první vrstvy, nastaly dvě situace. V té první zuhelnatělá vrstva odpadla, čímž tak přestala chránit zbylý průřez před účinky tepla, zatímco ve druhém případě zůstala zuhelnatělá vrstva na panelu a plnila tak tepelně izolační funkci, a tedy chránila zbylý prvek. Je proto logické, že nechráněná vnitřní vrstva rychleji odhořívala než vrstva chráněná zuhelnatělou vrstvou. V simulaci v programu Ansys 18.1 se snažili nastavit vstupní podmínky tak, aby co nejvíce odpovídaly reálnému prostředí zkoušky.

Na závěr porovnali hodnoty z obou studií, výsledky jsou vypsané v Tabulce 8. Jsou zde patrné jisté rozdíly. V případě experimentu došlo k zuhelnatění zejména na ploše ozařování, kdežto v simulaci ze středu ozařovaného místa až na okraj vzorku. Program není schopný zohlednit vady dřeva, což je právě ten důvod, proč podle tvůrců experimentu došlo k rozdílnému

vývoji teploty. Dále nebylo možné simulovat odpadnutí části zuhelnatění dřeva, tím pádem došlo v simulaci k izolaci nezasažené části prvku.

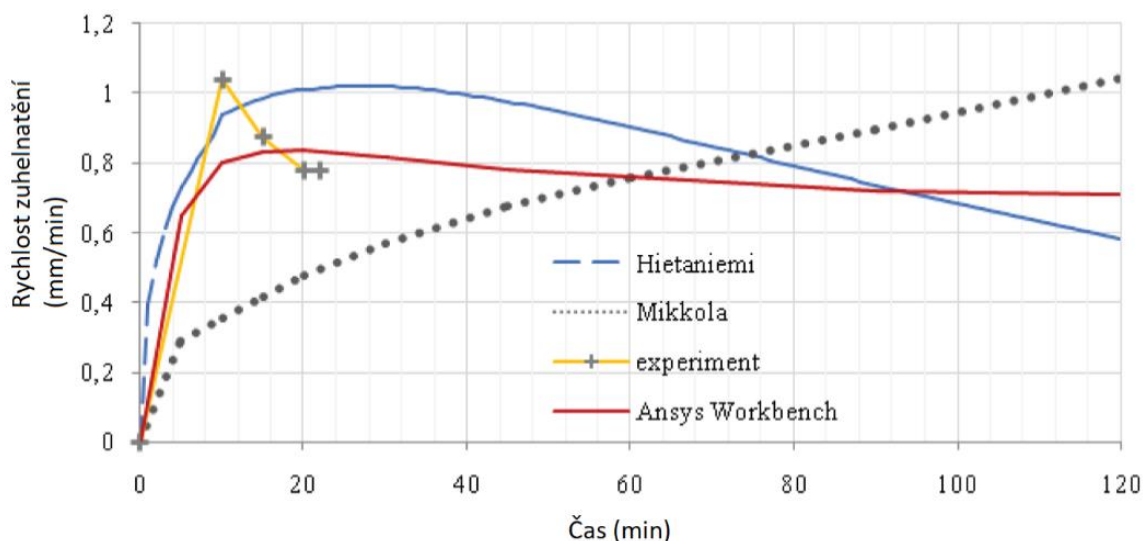
Tabulka 8 Výsledky zkoušky

	Experiment	Simulace
Maximální dosažená teplota na exponované straně panelu	711 °C	648 °C
Plamen na povrchu	7. minuta	9. minuta
Opadnutí zuhelnatělé vrstvy	Ano	Ne*

*Program neumožňoval tuto variantu

2.1.5 Rychlost zuhelnatění

V článku [9] se autoři rovněž zabývali srovnáním analytických modelů zuhelnatění dřeva podle Mikkoly (1991) a Hietaniemi (2005) s experimentem (popsaným výše) a numerický model v programu AnsysWorkbench. Výsledky zuhelnatění podle těchto metod můžeme vidět na Grafu 5. Bohužel byl experiment v 22. minutě přerušen, jelikož došlo k porušení termočlánku. Proto se rozhodli udělat ještě jeden experiment s většími rozměry dřevěného prvku, aby mohli sledovat zuhelnatění až do 120. minuty. Bohužel byla v tomto případě ovlivněna teplota spodní části prvku, a tak ji do výsledků neuvažují.

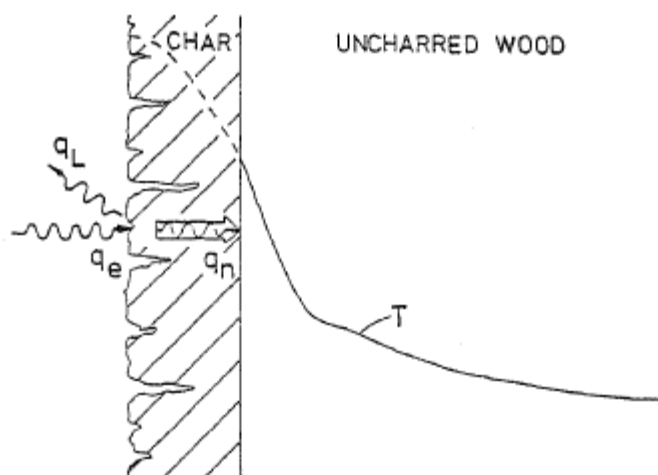


Graf 5 Porovnání metod zuhelnatění dřeva [9]

2.1.5.1 Rychlost zuhelnatění podle Mikkoly

Ve své publikaci [20] se autor zabývá rychlostí zuhelnatění dřeva, přičemž jejím obsahem jsou výsledky studií zuhelnatění, které bylo provedeno kuželovým kalorimetrem. Provedl více než 50 experimentů, kde sledoval různé typy dřevin a skutečnost, jak jejich vlastnosti (vlhkost, hustota) ovlivňují rychlost zuhelnatění.

Mikkola v celé své práci podrobně popisuje, jak se dřevo během požáru chová. Obrázek 11 ukazuje přenos tepla do ohněm nepoškozeného dřeva a energetickou bilanci. Zabývá se tedy i energetickou bilancí coby důležitou složkou pro výpočet zuhelnatění.



Obrázek 11 Přenos tepla ve dřevě vystaveném požáru[20]

Ze svých experimentů dospěl k názoru, že se rychlost zuhelnatění dá spočítat podle rovnice (15). Tato rovnice je napsána v základním tvaru, přičemž Mikkola ve své publikaci jednotlivé členy rovnice blíže popisuje.

$$\beta = \frac{q_n}{\rho * [C * (T_p - T_o) + L_v]}; \text{ mm/min} \quad (15)$$

kde	q_n	tepelný tok na straně zuhelnatění; W/m^2
	ρ	hustota dřeva; kg/m^3
	C	měrná tepelná kapacita; $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
	T_p	průměrná teplota vrstvy pyrolýzy; $^{\circ}\text{C}$
	T_o	počáteční teplota; $^{\circ}\text{C}$
	L_v	odpařované teplo suchého dřeva; J/kg

2.1.5.2 Zlepšení teplotního modelu

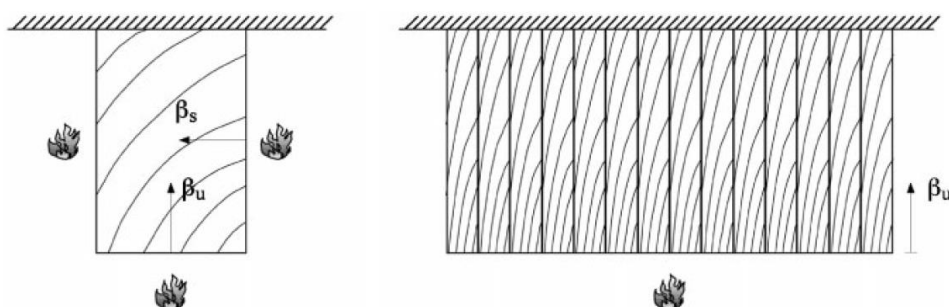
Tato publikace [21] popisuje chování dřevěných desek a masivního dřeva. Autoři provedli několik požárních zkoušek, kde jedna z nich se zaměřila na spoje a styky mezi dřevěnými deskami s dutým jádrem a druhá na celkové chování dřevěných desek během požáru. Při všech testech byla měřena hloubka zuhelnatění a teploty v různých bodech.

Doba trvání požárních zkoušek se pohybovala okolo 30–110 min, přičemž zkouška skončila po poruše konektorů či porušení desky. Zkoušky byly provedeny podle ISO 834. V Tabulce 9 jsou uvedené hodnoty z měření zuhelnatělé vrstvy, přičemž dřevěný trám je vystavený ze tří stran a lepená deska pouze z jedné, viz Obrázek 12.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty zuhelnatělé vrstvy

Vzorek	Rychlost zuhelnatění	n ₁	n ₂	\bar{x}	s	V
Nosník z masivního dřeva	β_s mm/min	14	83	0,67	0,07	0,11
Lepené dřevěné trámy	β_s mm/min	10	72	0,70	0,05	0,07
Laminátová dřevěná prkna	β_u mm/min	90	180	0,70	0,07	0,10
Desky s dutým jádrem	β_u mm/min	25	25	0,67	0,06	0,08
Vše	β mm/min	139	360	0,69	0,07	0,10

Naměřené rychlosti hoření se pohybovaly v rozmezí 0,67–0,70 mm/min a v porovnání s ČSN EN 1995-1-2 [7] (0,65–0,67 mm/min) vyšly získané hodnoty trochu vyšší. Dále upozorovali, že pokud je zbytkový průřez menší než 40–60 mm, zvýší se rychlost zuhelnatění β_u , pro větší zbytkové průřezy se rychlosti zuhelnatění β_u a β_s rovnají.



Obrázek 12 Dřevěný trám vystavený ze tří stran a dřevěná deska vystavená z jedné strany ohni [21]

Dále vylepšili výpočetní model Holz Brandschutz Hand pro výpočet teplotního profilu v dřevěném prvku vystaveném ISO požáru z jedné strany. Aby byla zachována platnost upravených rovnic (16) a (17), je potřeba dodržet minimální počáteční šířku průřezu, která se spočítá podle rovnice (18). Výpočet uvažuje konstantní rychlost zuhelnatění 0,7 mm/min. Pro dřevěný trám vystavený ohni ze tří stran je pro výpočet uvažována rovnice (19).

$$\theta_{(x)} = 20 + 180 \left(\frac{\beta_t}{x} \right)^\alpha \quad (16)$$

$$\alpha_{(t)} = 0,025 * t + 1,75 \quad (17)$$

$$b_{0,\min} = 2 * \beta_t + 2 \Delta x_t \quad (18)$$

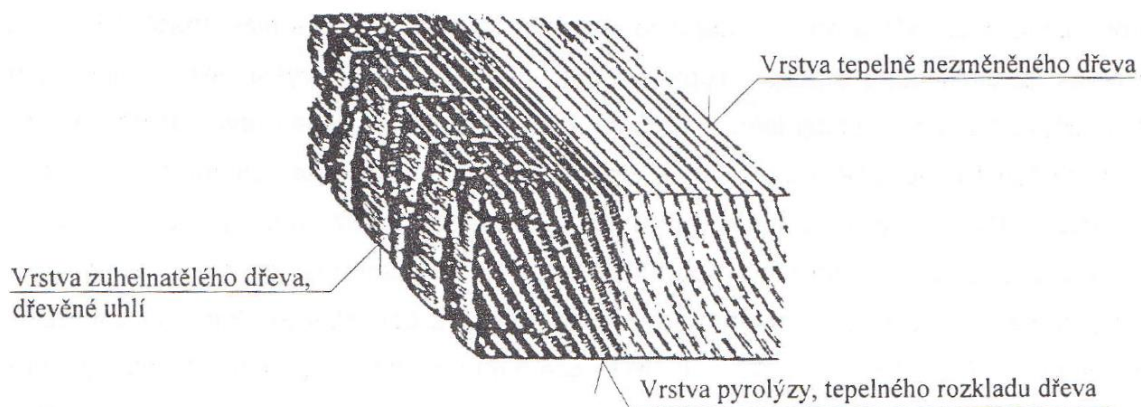
$$\theta_{(x,y)} = 20 + 180 (\beta_t)^\alpha \left[\left(\frac{1}{x} \right)^\alpha + \left(\frac{1}{b-x} \right)^\alpha + \left(\frac{1}{y} \right)^\alpha \right] \quad (19)$$

kde θ teplota; °C
 x funkce hloubky; mm
 y funkce hloubky; mm
 β rychlost zuhelnatění; mm/min
 t čas; min

Dle tvůrců poskytuje nový výpočetní model lepší předpověď měření hodnot teplotního profilu, a i když jsou teplotní profily o něco vyšší než naměřené.

2.1.6 Pyrolýza

Mezi zuhelnatělou vrstvou dřeva a dřevem, které je nezasážené požárem, se nachází vrstva pyrolýzy (Obrázek 13). Pyrolýza je tepelný rozklad dřeva bez přístupu kyslíku a má tloušťku přibližně 5 mm. Při teplotě do 275 °C dochází k pomalé pyrolýze, pokud je teplota vyšší jak 275 °C, nastávají silné exotermické reakce a teplota kvůli tvorbě lehce zápalné směsi uhlovodíků rychle stoupá.[22]



Obrázek 13 Vrstvy dřeva během požáru [23]

Pyrolýza většinou probíhá v rozmezí 200–500 °C, toto rozmezí je ovlivněno druhem dřeviny. Hlavními složkami dřeva jsou hemicelulóza, celulóza, lignin a voda. Hemicelulóza je obsažena ve dřevě zhruba 20–40 % a k jejímu teplotnímu rozkladu dochází v rozmezí 200–260 °C, kdežto celulóza tvoří 45–50 % suchého dřeva a nad teplotou 300 °C dochází ke vzniku zuhelnatění, dehtu a tvorbě plynů. Lignin se rozkládá při teplotě 280–500 °C. Složka vody (vlhkosti), která je obsažena ve dřevě, se odpařuje od teploty 100 °C a k odstranění veškeré vlhkosti dojde přibližně při 160 °C [24].

2.1.6.1 Kinetický model

V této publikaci [25] se autoři zabývají zkoumáním pyrolýzy dřevěných palet pomocí experimentálního zařízení, které umožňuje stanovit celkové ztráty hmotnosti, produkce plynu a dehtu. Pro experiment použili bukové a borovicové dřevo, ze kterého jsou vyrobené pelety o průměru 11–13 mm a délkou 6 cm. Používali dvě různé rychlosti zahřívání – 0,05 a 1 K/s.

Během experimentu zkoumali množství plynu, dehtu a zuhelnatění pro obě dvě rychlosti zahřívání. Obsah každého produktu je patrný v Tabulce 10. Jak je z ní zřejmé, rozdíl mezi borovicí a bukem je velmi malý. Dalším zajímavým poznatkem z tohoto projektu je zjištění, že při menší rychlosti zahřívání se zvyšuje procento plynu a zuhelnatění a pokles dehtu.

Tabulka 10 Množství jednotlivých produktů pyrolýzy během rychlosti zahřívání 1 a 0,05 K/s [25]

Rychlost zahřívání	1 K/s		0,05 K/s	
Materiál	Buk	Borovice	Buk	Borovice
Plyn	17 %	18 %	21 %	20 %
Dehet	62 %	61 %	53 %	54 %
Zuhelnatění	21 %	21 %	27 %	27 %
Error	-1,1 %	-1,1 %	-1,1 %	-1,3 %

V experimentu provedli další testy pro různou rychlost zahřívání a následně vytvořili kinetické schéma. Vytvořili tedy matematický model, který byl porovnán s experimenty, a výsledek považovali za uspokojivý.

Výhodou této práce bylo získání kinematického modelu pro větší/těžší vzorky, než jsou ty s hmotností několika miligramů. Během pomalého zahřívání dosahují výsledky mezi experimentem a modelem vynikajících výsledků a při rychlejším zahřívání uspokojivé výsledky. Podle tvůrců jejich model dosahuje lepších výsledků než literární modely, které předpovídají pouze primární pyrolýzu.

2.1.6.2 Modelování CLT panelu v programu B-RISK

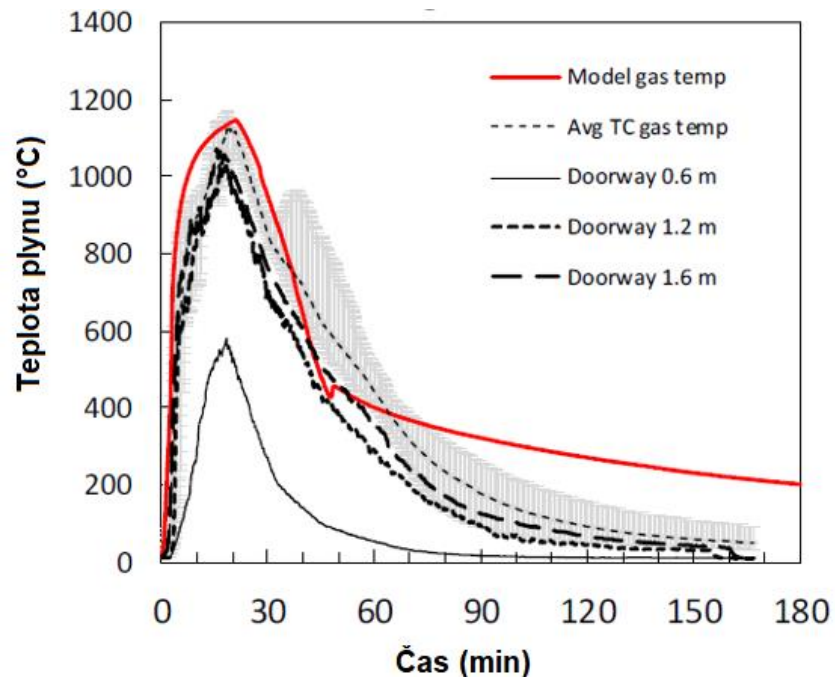
V článku [25] je dvouzónový program B-RISK upraven tak, aby uměl zahrnovat čtyřsložkový kinetický submodel pro pyrolýzu dřevěných povrchů. Pro míru úbytku dřevěných povrchů během požáru je používáno vícesložkové schéma. Jednotlivé složky jsou části dřeva, jako je hemicelulóza, celulóza, lignin a voda. Pro výpočet v programu byly použity vstupní hodnoty, které jsou vypsány v Tabulce 11. Současně autoři upozorňují, že tyto hodnoty nemusejí být přesné pro použitý CLT panel, který byl podroben zkoušce a simulaci. Pro výpočet byla použita diferenciální rovnice prvního řádu, kterou byly popsány jednotlivé složky dřeva a dopočítány míry úbytku hmotnosti.

Tabulka 11 Kinetické složky dřeva [26]

Složky dřeva	E_i [J/mol]	A_i [1/s]	n_i	Podíl ve dřevě
Hemicelulóza	164000	3.25E+13	2.10	~ 37 %
Celulóza	198000	3.51E+14	1.1	~ 44 %
Lignin	152000	8.41E+13	5.0	~ 9 %

Autoři provedli celkem 5 různých požárních modelů, které probíhaly vždy v místnosti 2,4 m x 4,5 m x 2,7 m s jedním dveřním otvorem, který se nacházel v jedné z delších stěn. Otvor měl rozměry 0,76 m x 2,0 m. Experimenty zahrnují různou kombinaci CLT panelu a konstrukčních prvků z lepeného lamelového dřeva. CLT panel se skládal z 5 vrstev, přičemž každá vrstva má tloušťku 35 mm. Celková tloušťka CLT panelu tedy činí 175 mm. Coby palivo byly v rámci experimentu zvoleny tři dřevěné hranice, každá o hmotností 120 kg.

První experiment byl pouze zkušební, jelikož zde nehořel žádný CLT panel, sloužil pouze pro porovnání s ostatními experimenty. V druhém experimentu tvořil CLT panel 33 % stěny a 10 % stropu, ve třetím experimentu bylo požáru vystaveno lepené lamelové dřevo, které odpovídalo 36 % plochy stěny. Ve čtvrtém experimentu bylo vystaveno požáru 100 % stropu z CLT panelu a lepené dřevo odpovídalo 19% plochy stěny. Poslední, pátý experiment tvořil 35 % stěny a 100 % stropu z CLT panelů.



Obrázek 14 Hodnoty ze zkoušky 1[26]

Na Obrázku 14 je znázorněna teplota plynu pro první experiment. Průměrná teplota odečtená ze stromu termočlánků je označena jako „Avg TC gas temp“ a teplota modelovaného plynu v horní vrstvě je označena jako „Model gas temp“.

Závěrem je v článku shrnuto, že kinetický submodel pyrolýzy poskytl dobré předpovědi pro předpověď maximální teploty plynu a dobu trvání plně rozvinutého požáru.

2.2 Chování ocelových konstrukcí za vysokých teplot

Ocel velmi dobře vede teplo, a jelikož jsou většinou ocelové konstrukce tenké (v řádech milimetrů a maximálně centimetrů) dochází k jejímu rychlému prohřátí. Proto je přijatelné zjednodušeně předpokládat, že dojde k rovnoměrnému rozložení teploty v ocelovém průřezu.[27] Tepelná vodivost je mnohonásobně vyšší, než tepelná vodivost dřeva.[28]

Ve stavebním odvětví se používá velké množství produktů vyráběných z oceli. Existuje i speciální ocel, která má zvýšenou odolnost vůči požáru, a tím zvyšuje požární odolnost ocelových konstrukcí.[29] Běžná stavební ocel ale nemá vysokou požární odolnost, a proto se

používají různé ochranné materiály, které ocel chrání před požárem.[28] V ČSN 73 0810 [30] se udává, že bez dalšího průkazu je možné uvažovat kritickou teplotu podle Tabulky 12.

Tabulka 12 Kritická teplota ocelových prvků

-	500 °C u sloupů, nosníků, průvlaků, vazníků apod. zajišťujících stabilitu objektu nebo jeho části, nebo u sloupů podpírajících technická a technologická zařízení;
-	560 °C u zavětrovacích prvků, střešních nosníků (vaznic, krokví apod.) či prvků střešních pláštů, u roštových podlahových a jiných prvků, u nichž se vyžaduje požární odolnost;
-	620 °C u nosných prvků obvodových pláštů, které nezajišťují stabilitu objektu ani jeho části.

2.2.1 Mechanické vlastnosti oceli při požáru

Ocel se sice řadí mezi nehořlavý materiál, ale má velmi nízkou požární odolnost. Při zvýšených teplotách mění své mechanické vlastnosti. Nežádoucím účinkem při vysokých teplotách působících na ocelové prvky je rostoucí deformace, snížení pevnosti a velká torzní roztažnost.[28][29]

Poměrná deformace oceli při zvýšených teplotách je způsobena teplotou, působícím silovým zatížením a tečením v čase. Tento jev lze popsat následující rovnicí [29]:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_i = \varepsilon_\sigma(\sigma; \theta) + \varepsilon_\theta(\theta) + \varepsilon_{cr}(\sigma; \theta; t) \quad (20)$$

kde	ε	poměrné protažení v čase t
	ε_i	počáteční protažení v čase $t = 0$
	ε_σ	část od silového zatížení závisící na napětí σ a na teplotě θ
	ε_θ	příspěvek teplotního protažení závislý na teplotě θ
	ε_{cr}	část od tečení oceli závisící na napětí σ , na teplotě θ a na čase t

Tepelná roztažnost oceli je při zvýšených teplotách výrazná, například při ohřevu o 400 °C se 10 metrů dlouhý nosník prodlouží o 50 mm.[28]

Tabulka 13 udává redukční součinitele uvedené v normě ČSN EN 1993-1-2 [31] pro vztah napětí-deformace pro ocel při zvýšených teplotách. Jedná se o redukční součinitel:

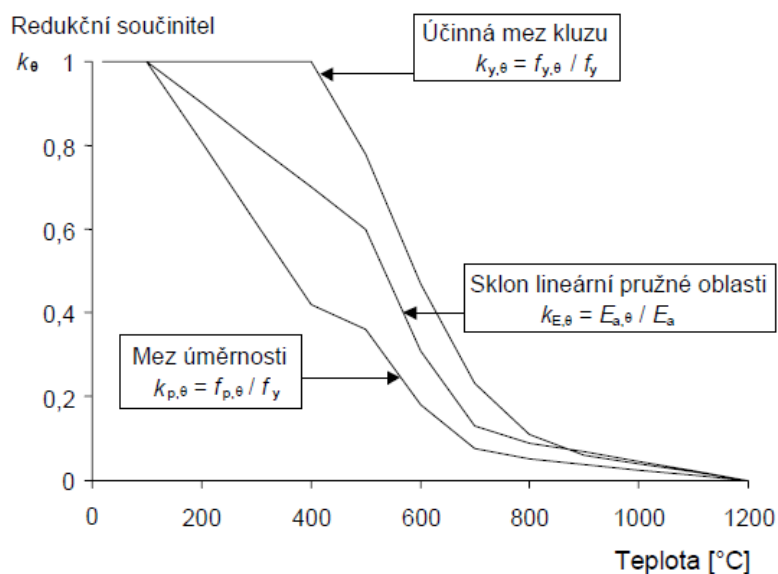
$k_{y, \theta}$	redukční součinitel pro mez kluzu
$k_{p, \theta}$	redukční součinitel pro mez úměrnosti
$k_{E, \theta}$	redukční součinitel pro sklon lineárního elastického rozsahu

Tabulka 13 Redukční vztah pro napětí – deformace [31]

Teplota oceli ϑ_a	Redukční součinitele při teplotě ϑ_a vztažené k hodnotě f_y nebo E_a při 20 °C		
	Redukční součinitel (vztažený k f_y) pro účinnou mez kluzu $k_{y,\vartheta} = f_{y,\vartheta} / f_y$	Redukční součinitel (vztažený k f_y) pro mez úměrnosti $k_{p,\vartheta} = f_{p,\vartheta} / f_y$	Redukční součinitel (vztažený k E_a) pro sklon lineární pružné části $k_{E,\vartheta} = E_{a,\vartheta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

POZNÁMKA Pro mezilehlé hodnoty teploty oceli lze lineárně interpolovat

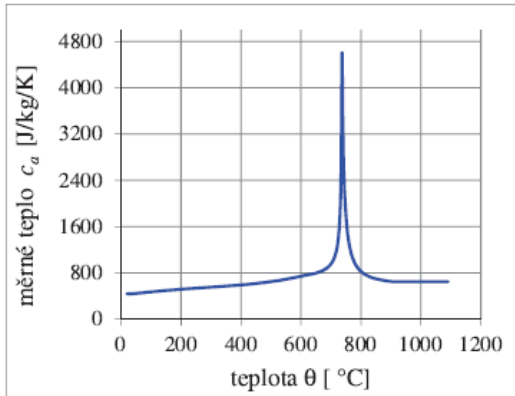
Na Grafu 6 je znázorněn vztah napětí a deformace oceli při zvýšených teplotách.



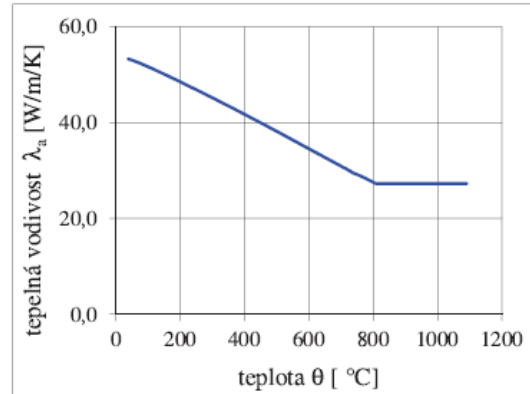
Graf 6 Redukční faktor pro vztah napětí - deformace oceli při zvýšených teplotách [31]

2.2.2 Tepelně technické vlastnosti oceli při požáru

Měrná tepelná kapacita, měrné teplo a tepelná vodivost ovlivňují ocelové konstrukce za zvýšených teplot (Graf 7).[28]



a) Měrné teplo oceli c_a



b) Tepelná vodivost oceli λ_a

Graf 7 Závislost tepelných charakteristik oceli na teplotě [29]

3 Analytický model

Řešený příklad se zabývá otázkou, jakou tloušťku dřeva, jakožto ochranného materiálu, musíme použít, abychom byli schopni ochránit ocelovou konstrukci před účinky požáru po určitý čas. Pro výpočet bylo použito rostlé smrkové dřevo a dřevotřísková deska.

Pro řešený příklad byl použit program Microsoft Office Excel 2007, do kterého byly zadány vstupní hodnoty (Tabulka 14) a použily se níže uvedené vzorce.

Veškeré rovnice, které se používají v přírůstkové teplotě, jsou uvažovány podle ČSN EN 1993-1-2 [31].

3.1 Použité vzorce a postup výpočtu

Před začátkem samotné analýzy bylo nutné zjistit/spočítat rychlost zuhelnatění pro námi zvolené prvky. Pro smrkové rostlé dřevo byla převzata hodnota z ČSN EN 1995-1-2 [7], viz Tabulka 6. Pro materiál na bázi dřeva je potřeba rychlost zuhelnatění dopočítat podle normy [7], jelikož je tato hodnota závislá na tloušťce materiálu, viz rovnice (21).

$$\beta_{o,p,t} = \beta_o * k_p * k_h \quad (21)$$

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (22)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (23)$$

kde	$\beta_{o,p,t}$	rychlost zuhelnatění pro materiály na bázi dřeva; mm/min
	β_o	jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení účinkům normového požáru (Tabulka 6); mm/min
	k_p	součinitel hustoty;
	k_h	součinitel tloušťky desky;
	ρ_k	charakteristická hustota; kg/m ³
	h_p	tloušťky desky; mm

Po určení rychlosti zuhelnatění bylo možné v analytickém modelu spočítat hloubku zuhelnatění, a to podle ČSN EN 1995-1-2 [7]. Použil se výpočet hloubky rychlosti zuhelnatění pro jednorozměrné vedení tepla závislé na čase.

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 * t \quad (1)$$

kde	$d_{\text{char},0}$	je návrhová hloubka zuhelnatění pro jednorozměrné zuhelnatění; mm
	β_0	jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení účinkům normového požáru (Tabulka 6); mm/min
	t	doba vystavená účinku požáru

Pro popis vývoje teploty plynů byla zvolena normová teplotní křivka (ISO 834). Pro znázornění této křivky byl použit níže uvedený vzorec (24). Časový interval byl zvolen 5 s.

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (24)$$

kde	Θ_g	teplota plynu; °C
	t	čas; min

Další částí bylo zjistit, jaký je průběh teploty na nechráněném ocelovém prvku. Tento průběh byl spočítán pomocí přírůstkové metody dle ČSN EN 1993-1-2 [31]. Metoda spočívá ve výpočtu přírůstku teploty za časový interval, rovnice pro výpočet je patrná níže.

$$\Delta\theta_{a,t,n} = k_{sh} \frac{A_m}{c_a \rho_a V} h_{net,d} \Delta t \quad (25)$$

kde	k_{sh}	faktor stínění; -
	A_m	povrchová plocha nechráněného prvku (obvod); m ² /m
	V	objem nechráněného prvku (plocha); m ³ /m
	c_a	měrné teplo oceli; J/(kg·K)
	ρ_a	objemová hmotnost oceli; kg/m ³
	$h_{net,d}$	tepelný tok; W/m ²
	Δt	časový interval; s

Faktor zastínění se určuje podle tvaru průřezu a pro konvexní průřezy je roven 1. Povrchová plocha nechráněného prvku je v podstatě obvod daného prvku, který se určuje podle tvaru průřezu a je blíže vysvětlen v ČSN EN 1993-1-2 [31]. Ve stejném Eurokódu je též vysvětlen objem nechráněného prvku – jedná se, jednoduše řečeno, o průřezovou plochu prvku. Měrné teplo oceli bylo v řešeném příkladě vypočítáno na základě rozmezí teploty (nebylo uvažováno zjednodušeně). Výpočet je uveden v rovnicích (26) až (29) a grafické znázornění je patrné na Grafu 7a.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \Theta_{a,t} < 600^{\circ}\text{C}$$

$$c_a = 425 + 0,773 * \Theta_{a,t} - 1,69 * 10^{-3} * \Theta_{a,t}^2 + 2,22 * 10^{-6} * \Theta_{a,t}^3 \text{ J/(kgK)} \quad (26)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \Theta_{a,t} < 735^{\circ}\text{C}$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \Theta_{a,t}} \text{ J/(kgK)} \quad (27)$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq \Theta_{a,t} < 900^{\circ}\text{C}$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\Theta_{a,t} - 731} \text{ J/(kgK)} \quad (28)$$

$$900^{\circ}\text{C} \leq \Theta_{a,t} < 1200^{\circ}\text{C}$$

$$c_a = 650 \text{ J/(kgK)} \quad (29)$$

kde $\Theta_{a,t}$ teplota oceli; $^{\circ}\text{C}$

Tepelný tok $h_{net,d}$ se skládá z přestupu tepla prouděním (rovnice 31) a z přestupu tepla sáláním (rovnice 32).

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (30)$$

$$h_{net,c} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_a) \quad (31)$$

kde α_c součinitel přestupu tepla prouděním
 $\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ – normová teplotní křivka
 $\alpha_c = 35 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ – parametrická teplotní křivka
 $\alpha_c = 50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ – uhlovodíková teplotní křivka

Θ_g teplota plynů v okolním prvku; $^{\circ}\text{C}$

Θ_a povrchová teplota prvku; $^{\circ}\text{C}$

$$h_{net,r} = \emptyset e 5,67 * 10^{-8} [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad (32)$$

kde \emptyset polohový faktor, zpravidla $\emptyset = 1$; -
 e emisivita – běžné ocelové prvky $\varepsilon = 0,7$; -
 Θ_r sálavá teplota okolí prvku (lze uvažovat Θ_g); $^{\circ}\text{C}$
 Θ_m povrchová teplota prvku; $^{\circ}\text{C}$

Při výpočtu přírůstkové teploty $\Delta\Theta_{a,t,ch}$ je nutné tento přírůstek přičíst k původní teplotě průřezu, tím je v daném čase vypočítána určitá teplota prvku.

Následně byla vypočítána přírůstkovou metodou teplota chráněného ocelového prvku.

$$\Delta\theta_{a,t,ch} = \frac{\lambda_p \left(\frac{A_p}{V}\right)}{d_p c_a \rho_a} * \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\emptyset}{3}} * \Delta t - (e^{\frac{\emptyset}{10}} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (33)$$

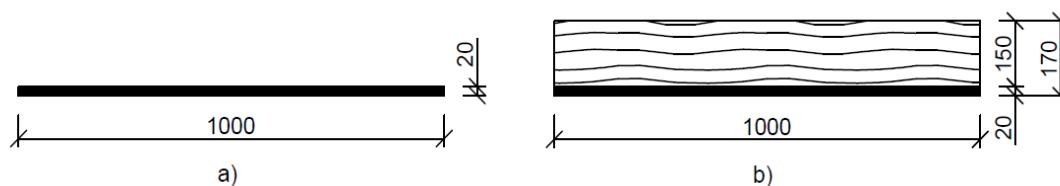
$$\emptyset = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} * d_p * \frac{A_p}{V} \quad (34)$$

kde	λ_p	tepelná vodivost požárně ochranného materiálu; W/(m·K)
	A_p	povrchová plocha požárně ochranného materiálu (obvod); m ² /m
	V	objem nechráněného prvku (plocha); m ³ /m
	c_a	měrné teplo oceli; J/(kg·K)
	c_p	měrné teplo požárně ochranného materiálu; J/(kg·K)
	ρ_a	objemová hmotnost oceli; kg/m ³
	ρ_p	objemová hmotnost požárně ochranného materiálu; kg/m ³
	d_p	tloušťka požárně ochranného materiálu; mm
	$\Delta\theta_{g,t}$	přírůstek okolní teploty během časového intervalu; °C
	Δt	časový interval; s
	$\theta_{g,t}$	teplota plynu; °C
	$\theta_{a,t}$	teplota oceli; °C

3.2 Vstupní údaje

Pro tento experiment se uvažovalo nejprve s jehličnatým rostlým dřevem (smrk), jakožto ochranným materiálem, se zvolenou tloušťkou 150 mm. Chráněným prvkem je ocelová deska s tloušťkou 20 mm. Na těchto hodnotách byl nastaven výpočet v programu Microsoft Office Excel 2007.

Zuhelnatělá vrstva dřeva je vždy odečtena od původní tloušťky, a tím je získána tloušťka ochranného materiálu v závislosti na čase. Všechny konstantní vstupní údaje jsou patrné z Tabulky 14.



Obrázek 15a) nechráněný ocelový prvek; b) chráněný ocelový prvek dřevem

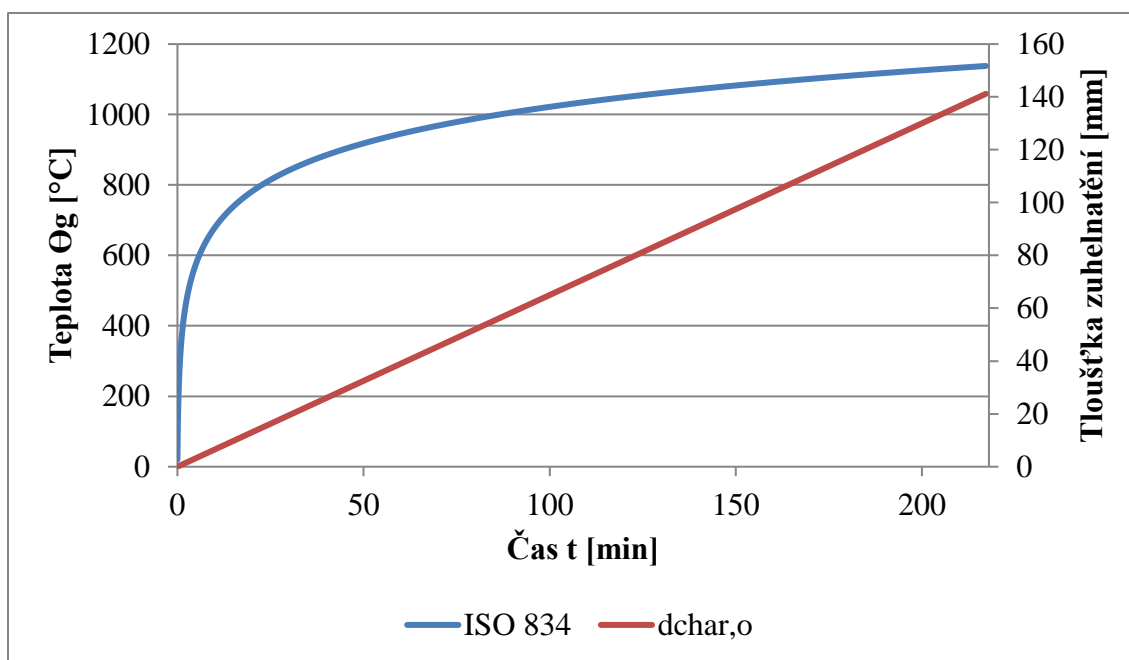
Tabulka 14 Konstantní vstupní údaje

Ocelová deska	Tloušťka	d_a	0,02	[m]
	Povrchová plocha prvku (obvod)	A_m	1	[m ² /m]
	Objemová hmotnost[32]	ρ_a	7850	[kg/m ³]
	Objem (plocha)	V_a	0,02	[m ³ /m]
	Emisivita[33]	ε	0,7	[-]
	Faktor stínění[31]	k_{sh}	1	[-]
Jehličnaté dřevo (smrk)	Tloušťka	d_p	0,15	[m]
	Jednorozměrná rychlost zuhelnatění[7]	β_0	0,65	[mm/min]
	Tepelná vodivost kolno na vlákna (w=15%)[5]	λ_p	0,12	[W/(m·K)]
	Objemová hmotnost(w=15%) [23]	ρ_p	470	[kg/m ³]
	Měrné teplo[5]	c_p	1664	[J/(kg·K)]
	Povrchová plocha prvku (obvod)	A_p	1	[m ² /m]
	Objem (plocha)	V	0,15	[m ³ /m]
Součinitel přestupu tepla prouděním[34]		α_c	25	[W/(m ² ·K)]
Polohový faktor nechráněného prvku		\varnothing	1	[-]
Časový interval		Δt	5	[s]

Hodnoty, které nejsou konstantní, jsou vypočítány podle vzorců v kapitole 3.1 v programu Microsoft Office Excel 2007.

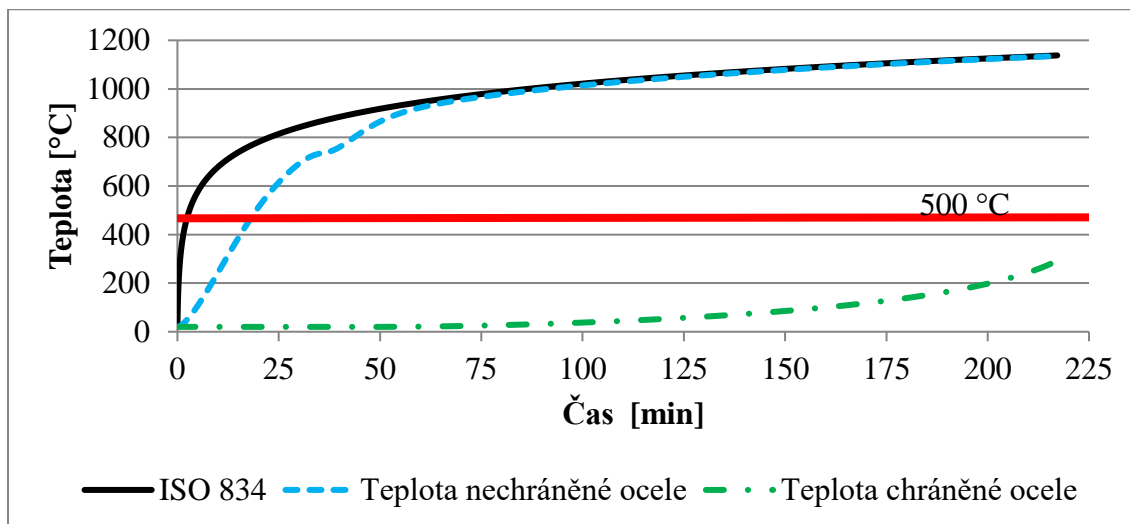
3.3 Výpočet

Nejdříve se provedl výpočet zuhelnatělé vrstvy, pro zvolený typ dřeva. Jak je patrné z Grafu 8, například v 200. minutě dosáhla tloušťka zuhelnatělé vrstvy 130 mm.



Graf 8 Závislost normové teplotní křivky a tloušťky zuhelnatění

Následoval výpočet chráněného a nechráněného ocelového prvku. Jak je na Grafu 9 vidět, námi zvolený nechráněný ocelový prvek dosáhne kritické teploty oceli (500 °C) přibližně v 19. minutě a ocel chráněná dřevem tloušťky 150 mm kritické teploty během 225 minut nedosáhne.



Graf 9 Teplota nechráněné ocele a chráněné ocele dřevem tloušťky 150 mm

Poté byl do výpočtu přidán další materiál, a to dřevotřísková deska (konstantní vstupní údaje jsou patrné v Tabulce 13). Tloušťka rostlého dřeva a dřevotřískové desky se měnila a zjišťovalo se, po jakou dobu ochrání ocelový prvek před dosažením kritické teploty 500 °C. Tím bylo možné určit požární odolnost pro různé tloušťky ochranného prvku. Byla stanovena pouze nejběžnější požární odolnost, a to po dobu 30, 45, 60 a 90 minut. Pro požární odolnost 15 minut nebyla stanovena tloušťka ochranného materiálu, jelikož tuto požární odolnost splňuje samostatný nechráněný ocelový prvek. Jednotlivé tloušťky jsou znázorněny v Tabulce 15.

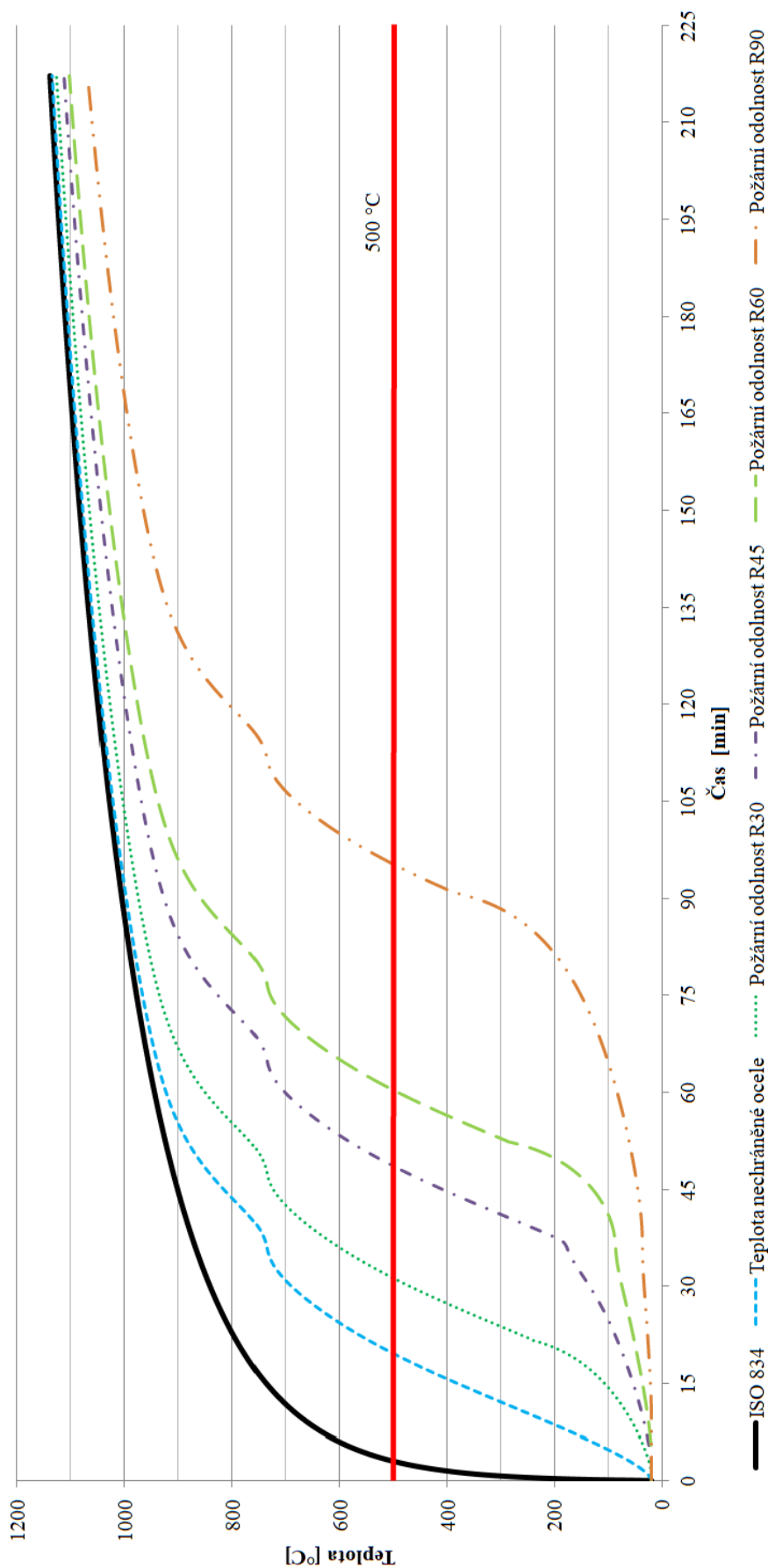
Tabulka 15 Potřebná tloušťka ochranného materiálu pro požadovanou požární odolnost

Požární odolnost	Tloušťka ochranného materiálu	
	Rostlé dřevo - smrk	Dřevotřísková deska
R15	-	-
R30	15 mm	15 mm (16 mm)*
R45	25 mm	23 mm (25 mm)*
R60	35 mm	30 mm (32 mm)*
R90	60 mm	41 mm (- mm)*

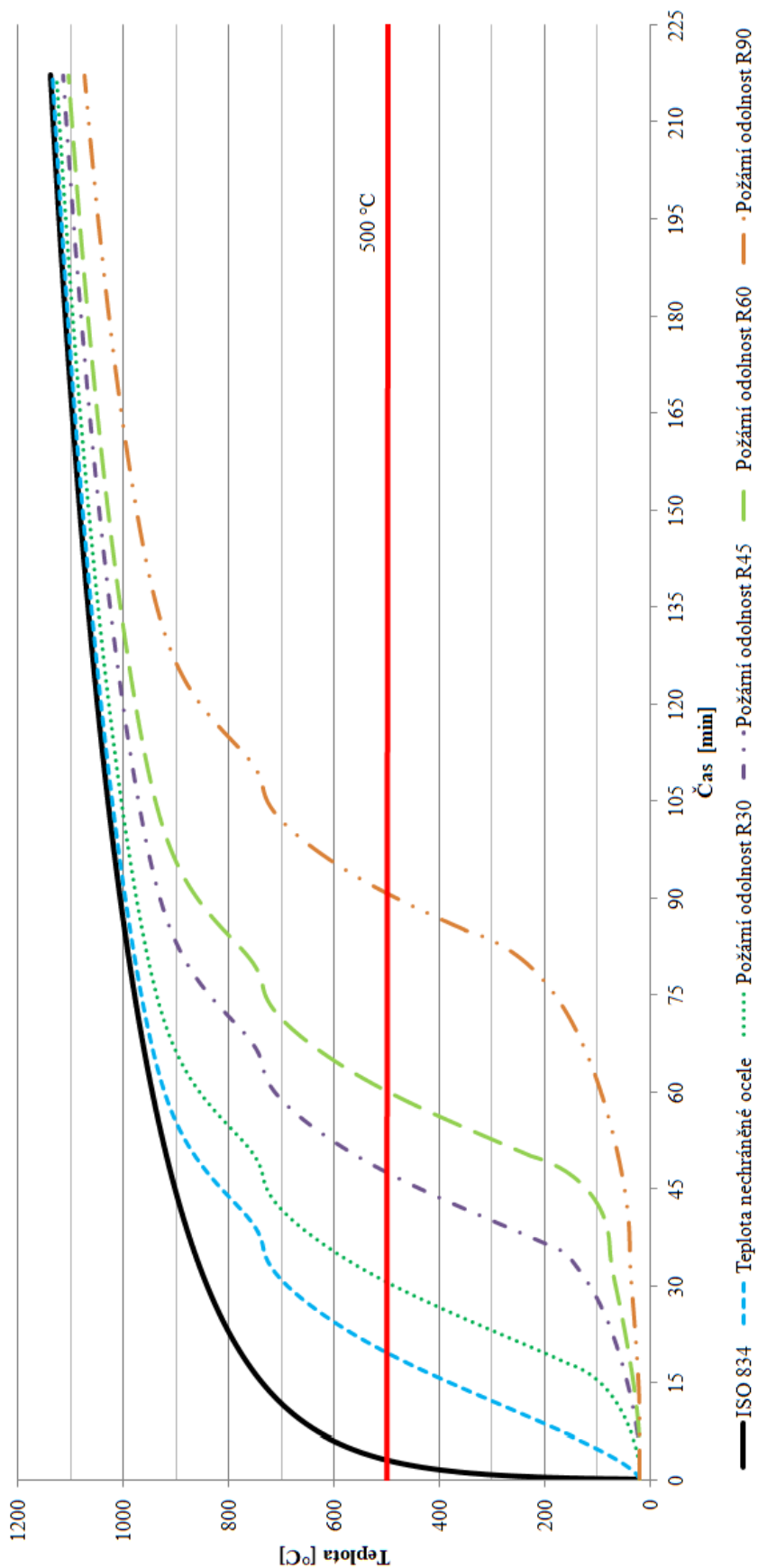
Poznámka: *Hodnoty uvedené v závorce jsou tloušťky desek dostupných na trhu, hodnoty bez závorky jsou minimální potřebné tloušťky pro splnění požární odolnosti

3.4 Vyhodnocení výpočtu

Jak je vidět na Grafu 10 a z Grafu 11, ocelovou konstrukci lze chránit dřevem či materiálem na bázi dřeva. Námí zvolený ocelový prvek bez ochranné vrstvy dosáhne kritické teploty přibližně v 19. minutě. Obložením dřevěnou konstrukcí se jeho požární odolnost zvyšuje s tloušťkou dřevěného prvku. Například tloušťka rostlého dřeva (smrku) 15 mm, což zhruba odpovídá tloušťce dřevěné latě, zvýší požární odolnost dřeva na 30 minut. Stejně tak tomu je i při ochranně dřevotřískovou deskou. Tato deska při tloušťce 16 mm splní požární odolnost 30 minut.



Graf 10 Průběh teplot v případě nechráněné ocele a v případě oceli chráněné rostlým dřevem o různých tloušťkách dřeva



Graf 11 Průběh teplot v případě nechráněné oceli a v případě oceli chráněné dřevotřískovou deskou v různých tloušťkách

4 Experiment

4.1 Úvod

V dnech 6.7.-8.7.2020 proběhly experimenty spojené s požární ochranou ocelové konstrukce materiálem na bázi dřeva. Experiment probíhal v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v rámci projektu 19-22435S podporovaným Grantovou Agenturou ČR.

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov (Obrázek 16), dále jen UCEEB, vznikl v Buštěhradě jako samostatný vysokoškolský ústav ČVUT v Praze. Dne 15.5.2014 byl za pomoci Evropského fondu pro regionální rozvoj a státního rozpočtu České republiky otevřen. UCEEB vznikl za účelem sjednocení a společné spolupráce čtyř fakult (stavební, strojní, elektrotechnické a biomedicínského inženýrství), které společně zkoumají energetické úspory na budovách. Tyto úspory jsou v dnešní době velkou prioritou nejen na území České republiky. [35]



Obrázek 16 Univerzitní centrum energeticky efektivních budov (UCEEB)[36]

4.2 Cíl experimentu

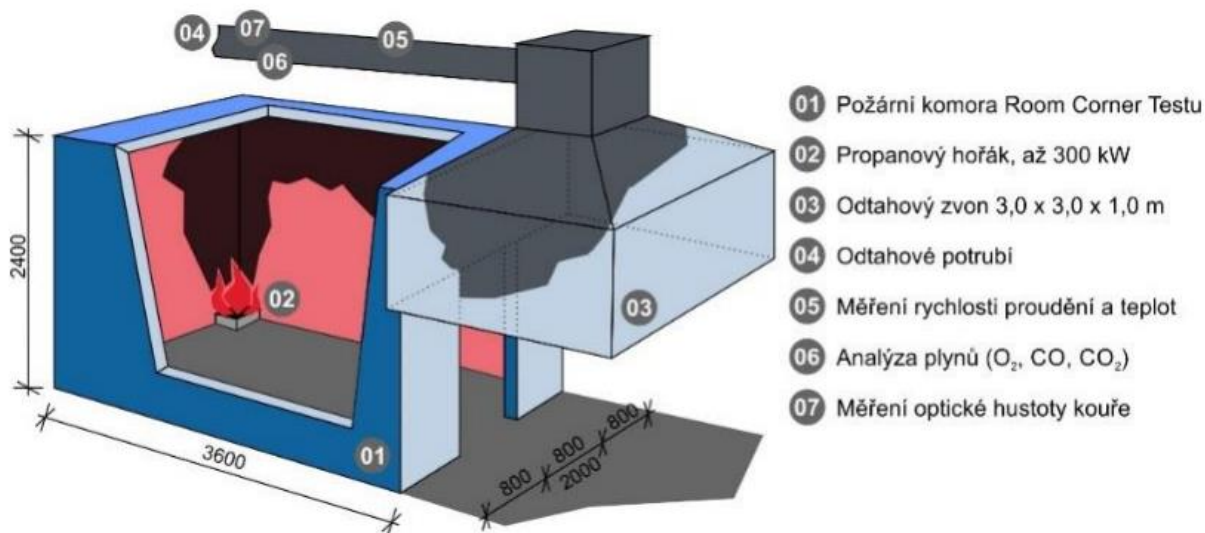
Experimenty probíhaly v Room Corner Testu (RCT) a ve středněrozměrové peci miniFUR. Účelem tohoto experimentu bylo ověření vlivu zuhelnatělé vrstvy na prostup tepla dřevěnou konstrukcí (obložení) a následný vliv na ocelovou konstrukci (obložený prvek).

4.3 Popis testovacích zařízení

4.3.1 Room Corner Test

Jedná se o velkorozměrovou zkoušku, která odpovídá svými vlastnostmi normě ČSN EN 14390. Testy jsou prováděny u prvků v reálném měřítku a provádí se v místnosti s půdorysnými rozměry 3,6 m x 2,4 m a výškou 2,4 m. Místnost je vyzděná z nehořlavých pórobetonových tvárníc. V místnosti je proveden dveřní otvor o velikosti 0,8 m x 2 m. V rohu

místnosti je postaven plynový hořák, který slouží jako zdroj tepla. Vedle této místnosti, na straně dveřního otvoru, je umístěn odtahový zvon s rozměry 3 m x 3 m x 1 m, který slouží k odvodu spalín hoření. Kouř je dále odváděn v odtahovém potrubí, kde dochází zároveň k měření průtoku a teplot, analýze obsahu plynu a měření optické hustoty kouře.[37] Grafické schéma je patrné na Obrázku 17.



Obrázek 17 Schéma RCT [38]

4.3.2 Pec miniFUR

Tuto pec vyvinula požární laboratoř ČVUT UCEEB, za účelem středněrozměrové indikativní zkoušky požární odolnosti stavebních konstrukcí, která je oproti zkouškám velkorozměrovým levnější a méně časově náročná. Jedná se o tzv. demontovatelný mobilní box, kde je možné strop a čelní boční stěny nahradit zkoumanými vzorky. Pec má rozměry 1,2 m x 0,8 m x 0,8 m. Pro přívod a odvod vzduchu slouží otvory na postranních stěnách pece, jak je patrné na Obrázku 18a. Pro dosažení průběhu teplot dle normové teplotní křivky zejména v horní polovině pece slouží plynový hořák. Tvar pece miniFUR je patrný na Obrázku 18b a Obrázku 18c.[39]



a)

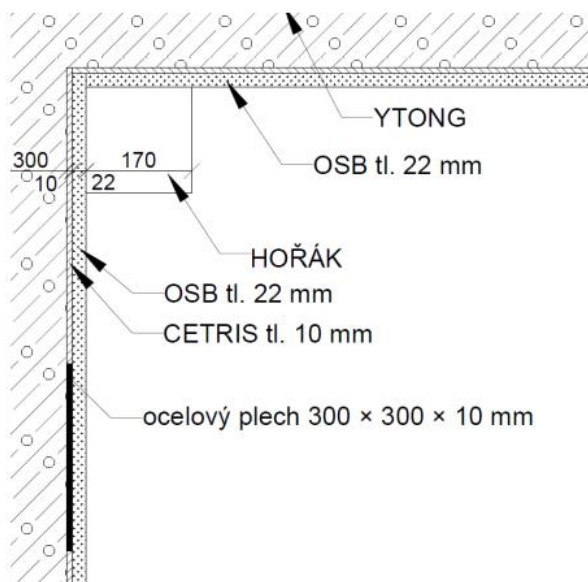
b)

c)

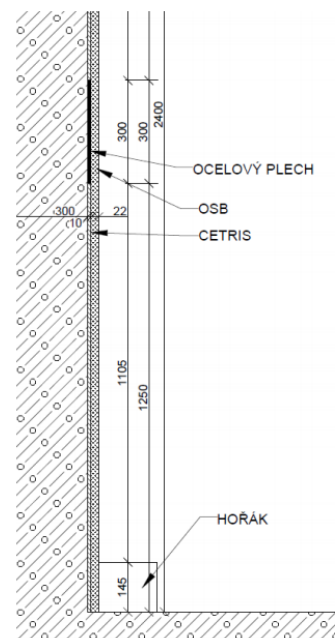
Obrázek 18 a) Otvory pro přívod a odvod vzduchu; b),c) Varianty uložení zkušební vzorku[39]

4.4 Experiment v Room Corner Test

V Room Corner Testu se prováděla zkouška s ocelovou deskou s rozměry 300 mm x 300 mm x 10 mm, která byla vložena do CETRIS desky (cementotřísková deska Cetris Basic 10 mm). Vrchním materiálem na obložení byla použita OSB deska (OSB 3 Superfinish). Umístění ocelové desky je patrné z Obrázku 19 a Obrázku 20.[40]

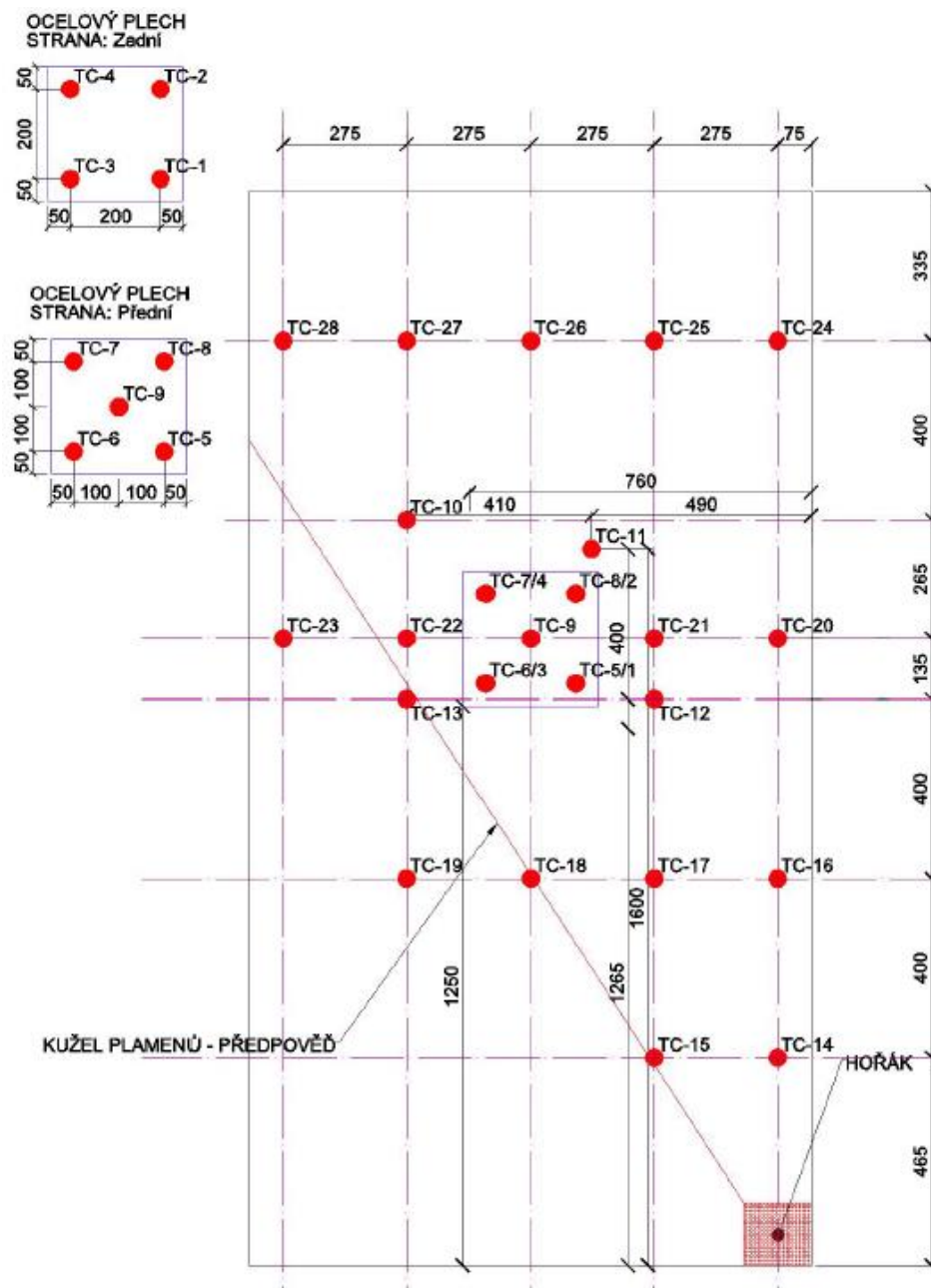


Obrázek 19 Půdorysné umístění desek a ocelového plechu v rohu RCT[40]



Obrázek 20 Umístění ocelového plechu v řezu[40]

Desky byly pomocí natloukacích hmoždinek připevněny do Ytongové stěny. Na experiment bylo použito 28 termočlánků rozmístěných po celé ploše s ohledem na dřívější zkušenost z předchozích experimentů, které byly pomocí sponkovačky upevněny do CETRIS desky. Termočlánky označené s čísly TC-1 až TC-4 jsou umístěné na zadní straně ocelové desky, tedy mezi ocelovou deskou a nehořlavou stěnou zkušební komory. Termočlánky s označením TC-5 -TC-9 jsou uchyceny na přední straně ocelové desky, tedy mezi ochrannou vrstvou (OSB deskou) a ocelovou deskou. Zbývající termočlánky se rozmístily po zadní straně OSB desky. Přesné rozmístění termočlánku je zřejmé z Obrázku 21.[40]



Obrázek 21 Rozmístění termočlánků při Room Corner Testu [40]

Na Obrázku 21 je také znázorněn předpokládaný tvar plamenů, který se vytvoří postupným zahříváním a odhoříváním ochranné desky. Tento tvar se předpokládal ve tvaru kužele. Pokud předpokládaný kužel porovnáme s Obrázkem 22b), který vyobrazuje zkušební prvek přibližně v 12. minutě experimentu, můžeme posoudit, že tvar se velmi podobá předpokladu. Samozřejmě se kužel od začátku experimentu postupně rozšiřoval, až došlo k postupnému odhoření celé ochranné desky. Postupné rozšiřování kuželu je znázorněno na Obrázcích 22a, b, c. V 18. minutě (Obrázek 22c) je vidět, že zkoušený vzorek dohořívá. Tento čas odpovídá době po ukončení zkoušky.

a) $t = 5 \text{ min.}$ b) $t = 12 \text{ min.}$ c) $t = 18 \text{ min.}$ *Obrázek 22 Průběh zkoušky v RCT [40]*

4.4.1 Vlastnosti použitých materiálů

Vlastnosti jednotlivých materiálů, které byly během zkoušky použity, jsou uvedeny v Tabulce 16.

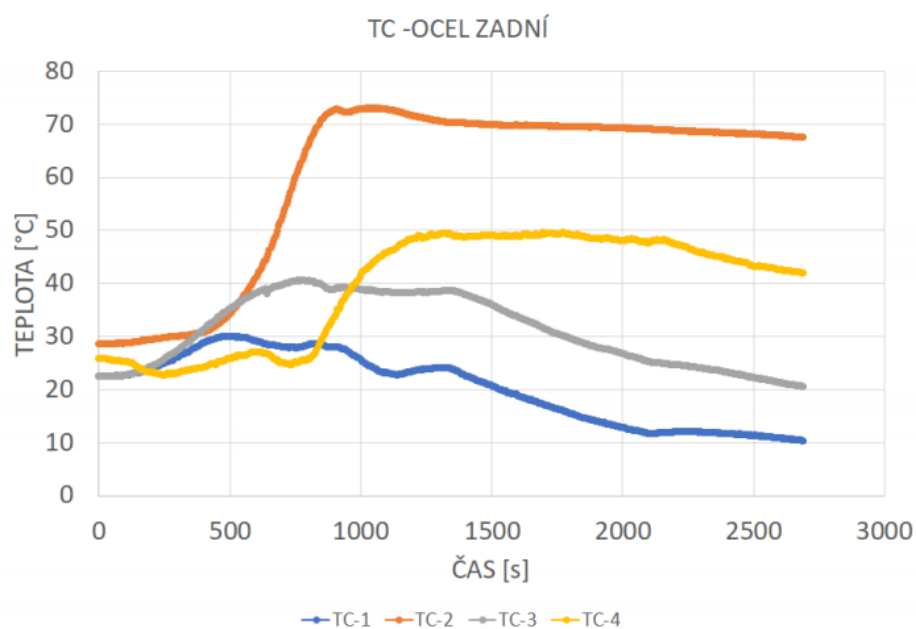
Tabulka 16 Vlastnosti použitých materiálů [40]

Materiál při teplotě 20 °C	OSB 3 Superfinish	Cetris Basic 10	Ocelový plech
Výrobce	Kronospan	Cidem	-
Tloušťka	22 mm	10 mm	10 mm
Objemová hmotnost	600 kg/m ³	1350 kg/m ³	7850 kg/m ³
Tepelná vodivost	0,1 W/(m·K)	0,2 W/(m·K)	60,5 W/(m·K)
Měrná kapacita	1680 J/(kg·K)	1580 J/(kg·K)	434 J/(kg·K)
Třída reakce na oheň	D-s2,d0	A2-s1,d0	A1
Povrchová úprava	Není provedena	Není provedena	Není provedena

4.4.2 Průběh a vyhodnocení zkoušky pomocí RCT

Experiment s tímto rozložením desek byl proveden ve třech různých variantách, které závisely na výkonu hořáku - tedy s nastavením na 30 kW, 50 kW a výkonu dle normy pro RCT. Během všech zkoušek byl patrný rozšiřující se kužel plamenů a postupné zahřívání jednotlivých termočlánků.[40]

Veškeré výsledky byly ukládány v tabulkovém rozhraní Excel. Na Grafu 12 je vyobrazen průběh teplot na termočláncích, které jsou umístěné v rozích na odvrácené straně ocelové desky.[40]



Graf 12 Průběh teploty na termočláncích umístěných na odvrácené straně ocelové desky s nastavením hořáku dle normy pro RCT [40]

4.5 Experiment v peci miniFUR

Druhá část experimentu proběhla ve středněrozměrové zkušební peci, která je navržena tak, aby výsledky odpovídaly zkoušce provedené v akreditované zkušebně na vzorcích skutečné velikosti.[39]

4.5.1 Vlastnosti použitých materiálů

Jednotlivé vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny v Tabulce 17. OSB desky a smrkové dřevo byly pomocí kamnářského tmelu přilepeny k ocelovému plechu.[40]

Tabulka 17 Materiálové vlastnosti pro experiment v peci miniFUR [40]

Materiál při teplotě 20 °C	OSB 3 Superfinish	Dřevo smrkové	Ocelový plech
Výrobce	Kronospan	-	-
Tloušťka	22 mm	20 mm	10 mm
Objemová hmotnost	600 kg/m ³	487 kg/m ³	7850 kg/m ³
Tepelná vodivost	0,1 W/(m·K)	0,239 W/(m·K)	60,5 W/(m·K)
Měrná kapacita	1680 J/(kg·K)	1680 J/(kg·K)	434 J/(kg·K)
Třída reakce na oheň	D-s2,d0	D-s2,d0	A1
Povrchová úprava	Není provedena	Není provedena	Není provedena

4.5.2 Zkoušený vzorek

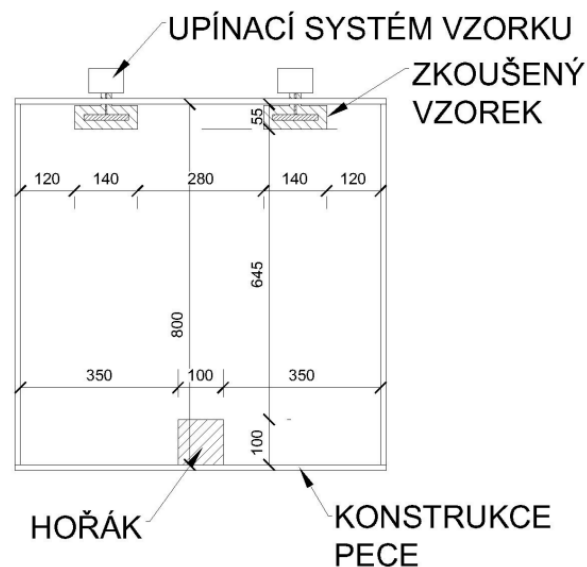
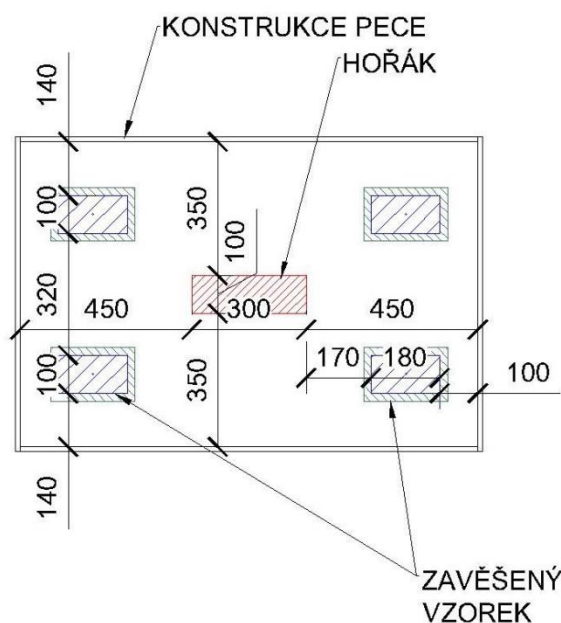
Zkoušely se 2 typy vzorků, v rámci prvního byl ocelový plech chráněn smrkovým dřevem, v případě druhého byla použita OSB deska. Každý typ vzorku byl vyhotoven čtyřikrát (čtyřikrát ocelový plech chráněn smrkem a čtyřikrát ocelový plech chráněn OSB deskou). Materiál byl pomocí kamnářského tmelu přilepen k ocelovému plechu. Aby zkouška proběhla v pořádku a dosáhlo se správných výsledků, bylo potřeba vzorek ochránit před vstupem tepla boční stranou prvku. Toho bylo docíleno pomocí minerální vaty tloušťky 25 mm, která byla nalepena po obvodě zkušebních vzorků (viz Obrázek 23).[40]



Obrázek 23 Příprava zkušebních vzorků [40]

4.5.3 Průběh a závěr zkoušky

Do zkušební pece byly vloženy čtyři totožné vzorky - do každého rohu pece jeden. Umístění vzorků v píce je vidět na Obrázku 24 a Obrázku 25. Hořák se nachází na podlaze s rozměry 300 mm x 100 mm x 100 mm, uprostřed pece. Hořák byl nastaven tak, aby teplota v píce sledovala teplotu podle normové teplotní křivky (ISO 834). Pro každý vzorek byly použity 4 termočlánky. Dva byly umístěné vždy mezi ochrannou vrstvou (dřevem/OSB deskou) a ocelovou deskou, další byl pak umístěn několik centimetrů pod vzorkem v prostoru pícky - tento termočlánek zachycoval průběh teploty v peci i s vlivem odhořívání ochranného materiálu. Plynový hořák byl vždy vypnut po 30. minutě zkoušky, jelikož dle výpočtu závislého na rychlosti odhořívání byla doba odhořívání pro ochranu obou dvou materiálů (smrkové dřevo a OSB deska) stanovena právě pod 30 minut.[40]



Obrázek 24 Půdorysné uspořádání vzorků a hořáku ve zkušební peci[40]

Obrázek 25 Umístění v řezu zkušebních vzorků a hořáku ve zkušební peci[40]

Při dosažení 30. minuty došlo k vypnutí plynového hořáku. Během následujícího patnáctiminutového měření pak vzorky chladly. Po úplném zchladnutí vzorků byly vzorky zabaleny do strečové folie a připraveny k následnému zkoumání vzniku trhlin ve dřevě.[40] Fotografie z průběhu zkoušky jsou vidět na Obrázku 26.



a)



b)



c)

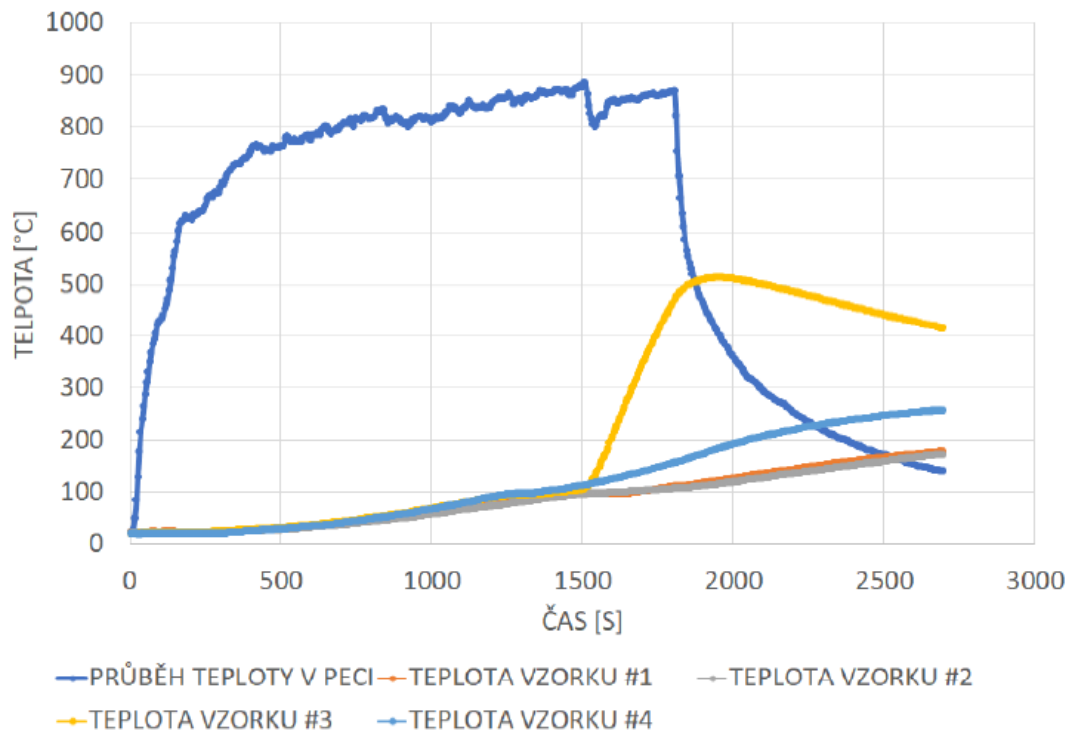
Obrázek 26 Průběh zkoušky v středněrozměrové peci a) v 20 minutě; b) v 31 minutě; c) v 45 minutě[40]

Pro porovnání průběhu teplot dvou odlišných ochranných materiálů je uvedena Tabulka 18. Uvedené teploty jsou snímány termočlánky umístěnými mezi ochrannou vrstvou a ocelovou deskou a jsou průměrnou hodnotou ze všech 4 stejných zkušebních vzorků (tedy průměr z 8 termočlánků). Z Tabulky 18 je patrné, že teploty pro OSB desku jsou nižší, než je tomu u smrkového dřeva.[40]

Tabulka 18 Porovnání průběhu teplot rozdílných ochranných materiálů

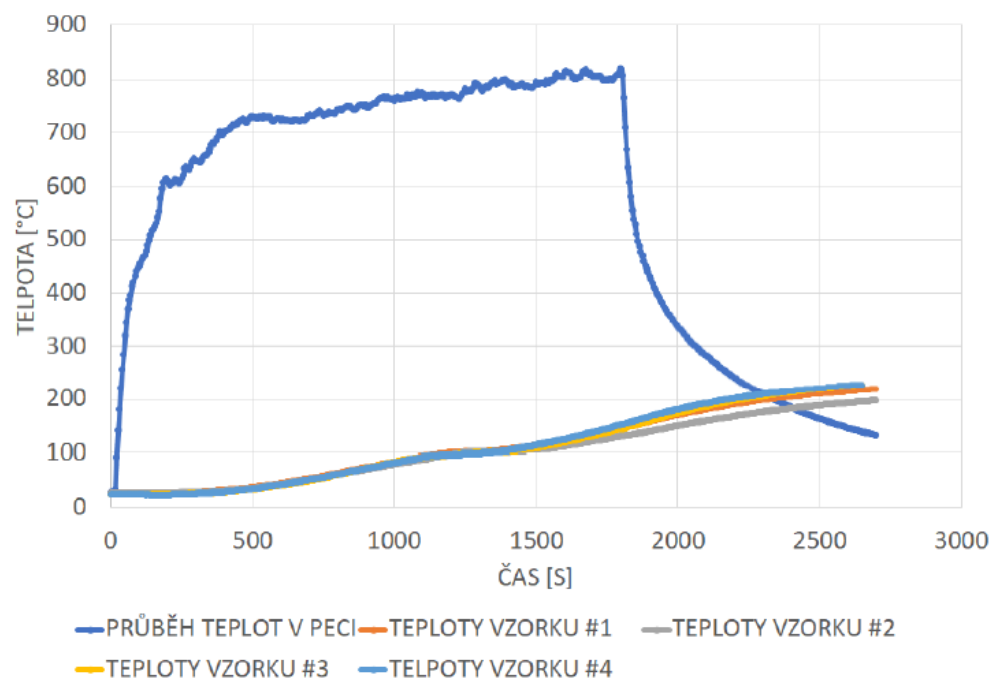
Čas zkoušky [s]	Teplota – ochrana SMRK [°C]	Teplota – ochrana OSB [°C]
0	24,5	22,3
50	24,6	23,6
100	24,7	23,7
200	24,8	23,7
300	26,5	24,1
600	42,3	34,9
900	72,1	54,9
1200	97,6	82,7
1500	111,5	103,4
1800	144,4	126,8
2100	180,7	158,9
2400	204,6	184,5
2700	218,5	203,7

Při zkoušce s ochranným prvkem z OSB desky, došlo v cca 25. minutě k odpadnutí ochranné vrstvy, následně došlo k výraznému zvýšení teplot, což nám potvrzuje funkci požární ochrany dřevem. Tento výkyv teploty je patrný na Grafu 13 v podobě žluté barvy.[40] Po uplynutí 5 minut od odpadnutí ochranné vrstvy nastal teplotní rozdíl mezi chráněným a nechráněným vzorem cca 350 °C. Pokud si ale uvědomíme, že rychlost zuhelnatění pro OSB desku je $\beta_0 = 0,95$ mm/min, tak kolem 25. minuty už nezbývá žádná ohněm nezasažená část OSB desky. Jinými slovy, je zřejmé, že zuhelnatělá vrstva chrání spodní materiál před pronikáním tepla.



Graf 13 Průběh teplot během použití ochranného materiálu z OBS desky [40]

Graf 14 nám znázorňuje průběh naměřených teplot při použití smrkového dřeva jakožto ochranného materiálu pro ocelový plech.[40]



Graf 14 Průběh teplot během použití ochranného materiálu ze smrkového dřeva [40]

5 Numerický model v programu B-RISK

Program B-RISK, který slouží pro modelování požárních rizik, byl vyvinutý společností BRANZ a University of Canterbury. Předchůdcem programu B-RISK je program BRANZFIRE, který se od nového programu liší rozšířením základního fyzikálního modelu a lepším pochopením rizika spojeného s požárem v budovách.[41]

B-RISK je počítačový program, který simuluje oheň a kouř v jedné či více místnostech, které jsou navzájem propojené. Jedná se o dvouzónový model, který popisuje horní (teplejší) a dolní (chladnější) vrstvu. Předpokládá, že každá vrstva má homogenní objem se stejnou teplotou, hustotou a koncentrací plynů, které jsou závislé na čase. Používá zákon zachování energie a hmoty s řadou empirických korelací apod.[41]

Model umí mimo jiné vyhodnotit teplotu vrstev, teplotu povrchů místnosti, výšku kouřové vrstvy a viditelnost. Výsledky je možné také zobrazit pomocí softwaru Smokeview.[41]

Smokeview je program vyvinutý společností NIST, který slouží pro 3D barevné znázornění modelovaného prostoru. Pomocí trojrozměrné animace vyobrazuje výsledky simulace programu B-RISK. Umí také znázornit pohyb a růst kouřové vrstvy, různou koncentraci plynu a různé teploty ve zkoumaném prostoru.[42]

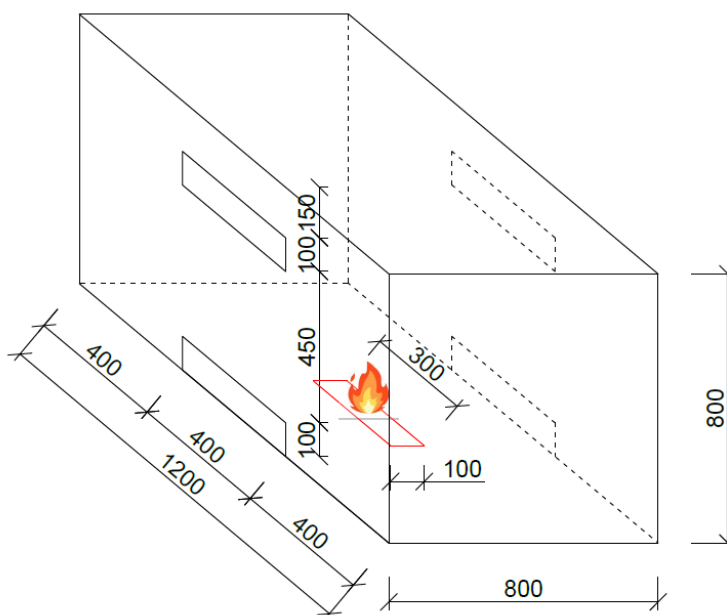
5.1 Cíl numerického modelu v programu B-RISK

Smyslem práce ve dvouzónovém programu B-Risk je vymodelovat a porovnat výsledky s provedeným experimentem, který je podrobněji popsán v kapitole 4. Jedná se tedy o modelování středněrozměrové zkoušky, která proběhla v peci miniFUR. Cílem je zjistit průběh teploty v horní vrstvě pece, dopočítat množství uvolněného tepla během odhořívání materiálu na bázi dřeva, dosadit do programu a následně porovnat vývoj teploty i s přírůstkem od hoření s experimentem. Následně dopočítat průběh teploty ve vzorku a opět porovnat s uskutečněným experimentem.

5.2 Modelování v programu B-RISK

5.2.1 Ověření programu

Před samotnou modelací experimentu byla provedena zkouška přesnosti programu. Pro tuto zkoušku byla vymodelována prázdná pec o rozměrech 1,2 m x 0,8 m x 0,8 m. Na bočních (delších) stranách pece jsou vymodelované vždy dva otvory o rozměrech 0,4 m x 0,1 m. Otvory jsou umístěny do středu stěny a symetricky na obou stěnách. Dolní otvory mají spodní hranu totožnou s výškou podlahy, zatímco spodní hrana horních otvorů se nachází ve výšce 550 mm od podlahy pece, viz Obrázek 27. Materiál pece byl modelován dle skutečného provedení s tím, že všechny strany pece jsou obloženy Fermacell Power H₂O s tloušťkou 12,5 mm.



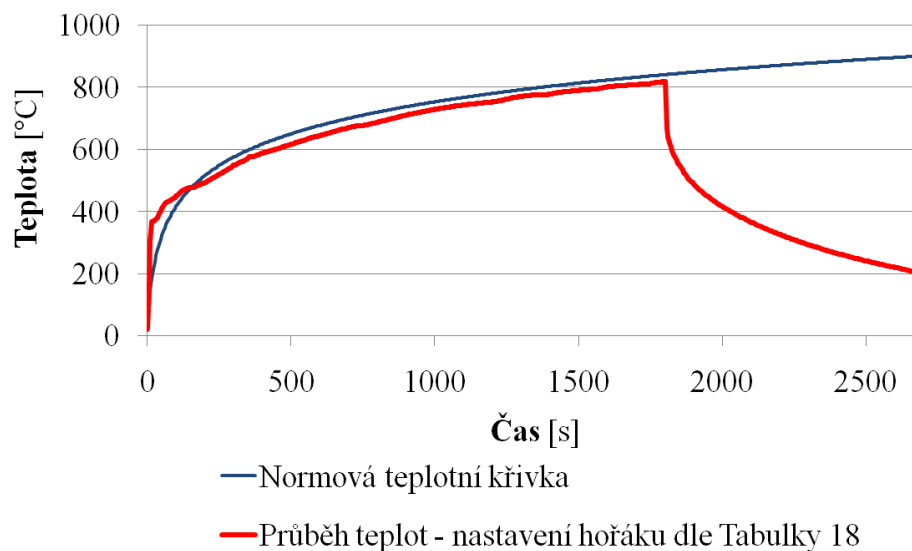
Obrázek 27 Rozměry modelované pece

Místo požáru bylo modelováno ve středu místnosti, kde v experimentu je umístěn plynový propanový hořák o ploše 0,3 m x 0,1 m. Výkon hořáku byl nastaven podle [43], kde se autor zabýval krom jiného i validací pece a porovnáváním experimentu s CFD modelem, při kterém dosáhl pomocí svého nastavení výkonu hořáku velmi uspokojivých výsledků. Takto nastavený výkon hořáku pro průběh teplot dle normové teplotní křivky v horní vrstvě pece uvedený v [43] se používá i během experimentů právě v peci miniFUR. Hodnoty výkonu hořáku převzaté z [43] jsou zobrazeny v Tabulce 19.

Tabulka 19 Nastavení výkonu hořáku pro prázdnou pec v programu B-RISK

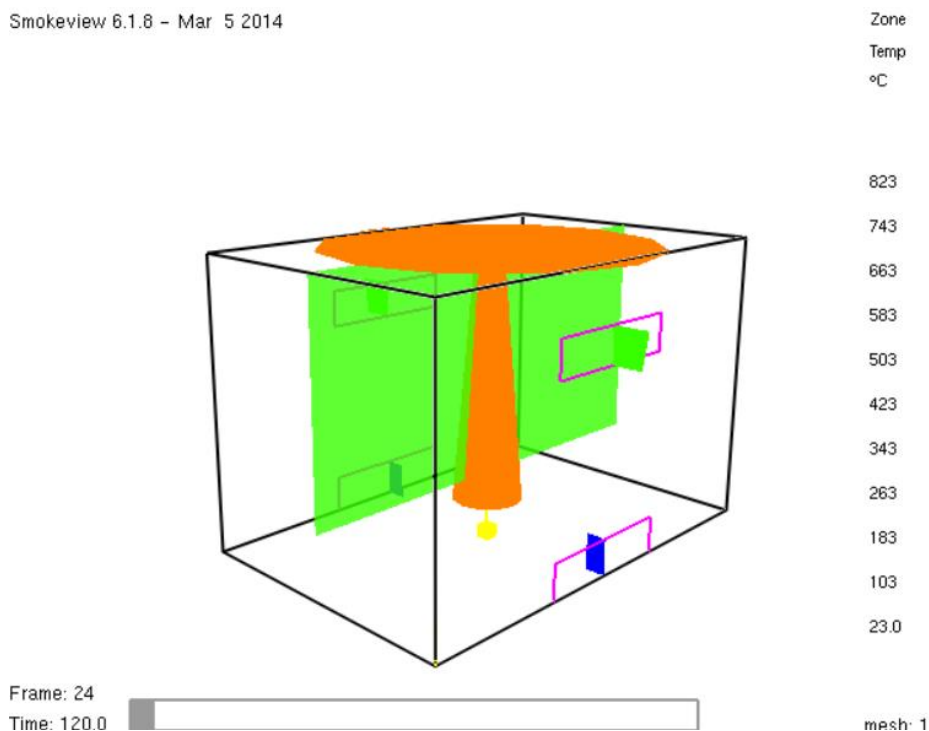
Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]
0	0	150	88	570	117	990	127.6	1410	136
10	60	180	90	600	117.4	1020	128	1440	137
15	61	210	92	630	118	1050	128.4	1470	137.2
20	62	240	96	660	119	1080	128.6	1500	137.4
25	63	270	100	690	119.6	1110	128.8	1530	137.6
30	64	300	104	720	120	1140	128.84	1560	138
35	66	330	106	750	121	1170	128.9	1590	140
40	70	360	110	780	122	1200	129	1620	140.2
45	72	390	112	810	123	1230	130	1650	140.4
50	74	420	112	840	124	1260	132.4	1680	140.6
55	76	450	113	870	125	1290	133	1710	140.8
60	78	480	114	900	126	1320	133.1	1740	141
90	80	510	115	930	126.6	1350	133.4	1770	142.2
120	86	540	116	960	127	1380	134	1800	142.4

Po vymodelování prázdné pece a nastavení všech vstupních podmínek byl spuštěn výpočet programu, který byl porovnán s normovou teplotní křivkou ISO 834. Jak je vidět ve výsledcích na Grafu 15, průběh teploty v horní vrstvě pece se pohybuje nepochybně níže, než je normová teplotní křivka. Dále je vidět v 1800 s pokles teplot v peci, což je způsobeno přerušením dodávky propanu do hořáku – hořák byl vypnut.



Graf 15 Porovnání normové teplotní křivky s průběhem teplot v prázdné peci

Program B-RISK má i schopnost 3D zobrazení pomocí programu Smokeview. Na Obrázku 28 je vyobrazena pec ve 120. sekundě. Jak je vidět, dolními otvory je načerpávám čerstvý/studený vzduch a horními otvory dochází k úniku tepla.



Obrázek 28 Vizualizace prázdné pece v programu Smokeview ve 2. minutě

5.2.2 Modelování skutečného výkonu z experimentu

Po ověření správné funkčnosti programu a kontrole vstupních údajů došlo k nahrání skutečného výkonu hořáku. Byly provedené 2 experimenty a pro každý experiment je jiný průběh výkonu hořáku. Skutečné výkony hořáků z experimentů jsou popsány pro rostlé smrkové dřevo v Tabulce 20 a pro OSB desku v Tabulce 21. V Tabulce 20 je patrné, že kolem času 570 s byl výkon hořáku manuálně snížen. Podobně tomu bylo i při experimentu s OSB deskou (Tabulka 21) kolem času 840 s. Snížení výkonu během experimentu bylo provedeno z důvodu udržení teploty plynu v píce v mezích, které uvádí norma ČSN EN 1363-1[44].

Tabulka 20 Výkon hořáku podle experimentu pro smrkové dřevo

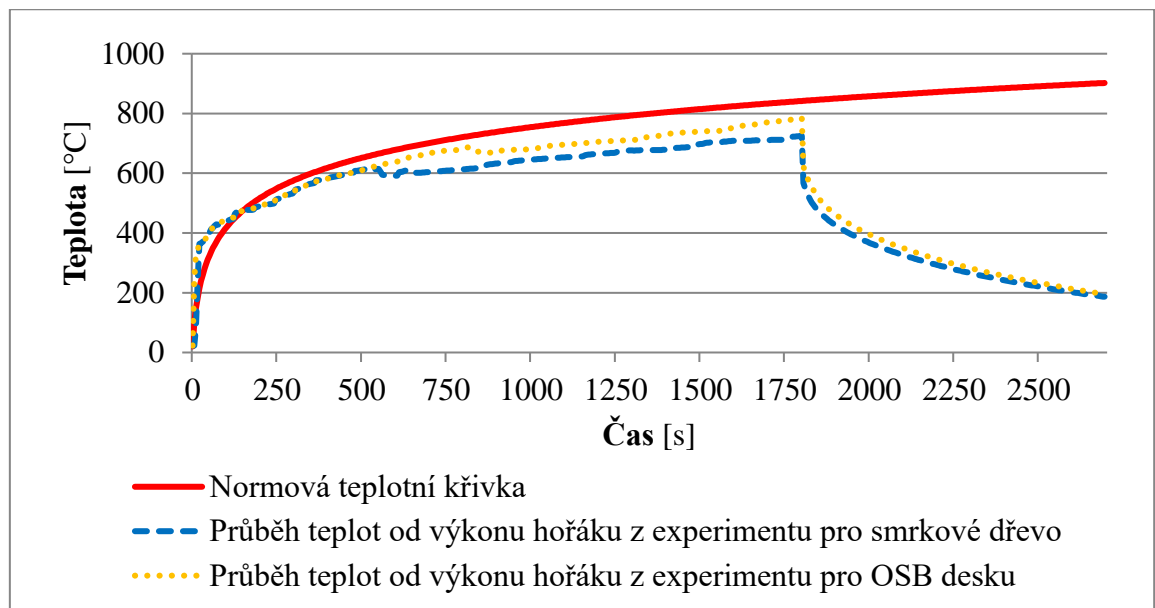
Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]
0	0	150	86	570	100	990	105	1410	113
10	7	180	87	600	99	1020	105	1440	112
15	56	210	89	630	105	1050	105	1470	112
20	60	240	90	660	100	1080	105	1500	116
25	60	270	94	690	100	1110	105	1530	117
30	62	300	101	720	100	1140	105	1560	117
35	63	330	103	750	100	1170	107	1590	117
40	65	360	106	780	100	1200	107	1620	116
45	69	390	109	810	100	1230	107	1650	116
50	71	420	111	840	100	1260	109	1680	116
55	74	450	110	870	104	1290	109	1710	116
60	74	480	114	900	104	1320	109	1740	116
90	78	510	113	930	104	1350	110	1770	120
120	79	540	110	960	105	1380	110	1800	120

Tabulka 21 Výkon hořáku podle experimentu pro OSB desku

Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]	Čas [s]	Výkon [kW]
0	0	150	86	570	115	990	113	1410	123
10	48	180	88	600	115	1020	114	1440	123
15	58	210	89	630	116	1050	116	1470	123
20	60	240	91	660	118	1080	116	1500	123
25	60	270	95	690	118	1110	116	1530	123
30	62	300	99	720	120	1140	116	1560	123
35	64	330	103	750	119	1170	117	1590	126
40	65	360	104	780	119	1200	117	1620	129
45	70	390	109	810	122	1230	117	1650	129
50	71	420	110	840	111	1260	117	1680	129
55	72	450	110	870	109	1290	118	1710	131
60	75	480	113	900	109	1320	119	1740	132
90	79	510	112	930	113	1350	120	1770	137
120	80	540	114	960	113	1380	121	1800	136

Průběhy hořáků byly vloženy do programu B-RISK, pomocí kterého byl vypočítán průběh teplot v závislosti na čase a vloženého výkonu hořáku pro každý typ experimentu. Každý z průběhů se v první části pohyboval tak, že přibližně kopíroval normovou teplotní křivku.

Následně je na Grafu 16 v obou křivkách patrný zlom v průběhu teplot přibližně kolem 550. sekundy pro smrkové dřevo a 820. sekundy pro OSB desku. V tuto chvíli došlo ke snížení výkonu hořáku.



Graf 16 Průběh teplot dle nastaveného výkonu hořáku z experimentů

5.2.3 Ruční výpočet přírůstku teploty od hoření dřeva

Přírůstek teploty se spočítá díky pyrolýze dřeva, která v něm probíhá. Matematicky se dá popsat diferenciální rovnicí prvního řádu (35) uvedenou v [45]. Pro tento výpočet byl použit upravený vzoreček (36) [45], který počítá s hmotnostní rychlostí odhořívání. Podmínka (37) určuje, zda pyrolýza probíhá či nikoli.[45]

$$\frac{Y_{i,j}}{dt} = c_i * A_i * e^{-\frac{E_i}{R*T_j}} * Y_{i,j}^{n_i} \quad (35)$$

$$r_{tj} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s,0}}\right)^{n_{s,ij}} * A_{i,j} * e^{-\frac{E_i}{R*T_s}} \quad (36)$$

$$\max[0, T_s - T_{ing,ij}] \quad (37)$$

kde	$Y_{i,j}$	zbytková hmotnostní frakce
	r_{jt}	hmotnostní rychlost odhořívání; 1/s
	c_i	počáteční stav látky
	A_i	předexponenciální faktor pro složku i; 1/s
	E_i	aktivační energie pro složku i; J/mol
	R	plynová konstanta 8,314472 J/(K·mol)
	$n_{s,ij}$	řád reakce pro složku i; -
	T_s	teplota j-tého prvku; °C
	$T_{ing,ij}$	iniciační teplota pro složku i; °C
	$\rho_{s,i}$	hustota dřeva při i-té teplotě; kg/m ³

$\rho_{s,0}$ hustota dřeva při teplotě 20 °C; kg/m³

Dřevo i OSB deska jsou ve výpočtu rozděleny do tří složek, a to na celulózu, hemicelulózu a lignin. Voda se ve výpočtu neuvažovala, jelikož se předpokládá, že se v první fázi (teplota kolem 100 °C) odpařila. Vstupní hodnoty pro tyto složky smrkového dřeva a OSB desky jsou vypsány v Tabulce 22.[45]

Tabulka 22 Vstupní hodnoty pro jednotlivé složky smrkového dřeva a OSB desky

Složky dřeva[45]	E_i [J/mol]	A_i [1/s]	n_i	Podíl ve dřevě
hemicelulóza	164000	3.25E+13	2.10	~ 37 %
celulóza	198000	3.51E+14	2.10	~ 44 %
lignin	152000	8.41E+13	2.10	~ 9 %
Složky OSB desky				
hemicelulóza	112460	3.80E+7	1.21	~ 39,8 %
celulóza	325620	2.51E+25	1.54	~ 34,8 %
lignin	55940	524.8	3.08	~ 25,4 %
<i>Poznámka: Hodnoty pro OSB desku poskytl Ing. Jakub Šejna</i>				

Pro výpočet bylo nutné uvažovat i iniciační teplotu jednotlivých složek. Pro složku hemicelulózy byla iniciační teplota uvažována 200 °C, pro celulózu 300 °C a pro lignin 280 °C [24]. Tyto složky jsou ve výpočtu uvažované tak, že jejich nárůst v přírůstku teploty roste do teploty 500 °C, po dosažení této teploty jsou uvažované jako konstantní. Tento předpoklad byl zvolen na základě úvahy, že dřevo postupně odhořívá v průběhu času a oblast pyrolýzy se tedy v závislosti na čase posouvá v průřezu dál od požáru.

Ve výpočtu také figuruje hustota prvku, která je závislá na teplotě. Hustota smrkového dřeva při teplotě 20 °C byla uvažována podle experimentu, a to s hodnotou 487 kg/m³ a dle poměru hustoty uvedeného v ČSN EN 1995-1-2 [7] byla dopočítána hustota závislá na čase pro smrkový prvek. OSB deska má hustotu při teplotě 20 °C 600 kg/m³ a pro přepočítání byl také použit výpočet dle ČSN EN 1995-1-2 [7], i když norma udává, že poměr hustoty je určen pro jehličnaté dřeviny. Pro OSB desku nebyl bohužel nebyl zjištěn jiný, vhodnější, způsob zjištění hustoty OSB desky v závislosti na teplotě.

Jelikož teplota na povrchu prvku nebyla vždy pouze rostoucí - během experimentu docházelo i ke snížení teploty, bylo nutné zajistit, aby se hustota prvku při snížení teploty

nevracela zpátky na původní (vyšší) hodnoty. Bylo zapotřebí nastavit, aby docházelo k postupnému snižování hustoty, tohoto efektu bylo docíleno zachováním poměru úbytku hmotnosti po dobu poklesu teploty.

Po dosažení všech hodnot do rovnice (36) bylo dosaženo výsledků v jednotkách 1/s. Z důvodu dosažení správných jednotek (kg/s) bylo nutné výsledky ještě vynásobit hmotností prvku. Pro dopočítání rychlosti uvolňování tepla (Q), které má jednotky W, bylo zapotřebí výsledky z rovnice (36) vynásobit efektivní výhřevností prvku. Vzorec pro tento výpočet je popsán níže.[45]

$$Q = r_{t,j} * \Delta H_{eff} \quad (38)$$

kde r_{jt} hmotnostní rychlost odhořívání; 1/s
 ΔH_{eff} efektivní výhřevnost prvku; J/kg

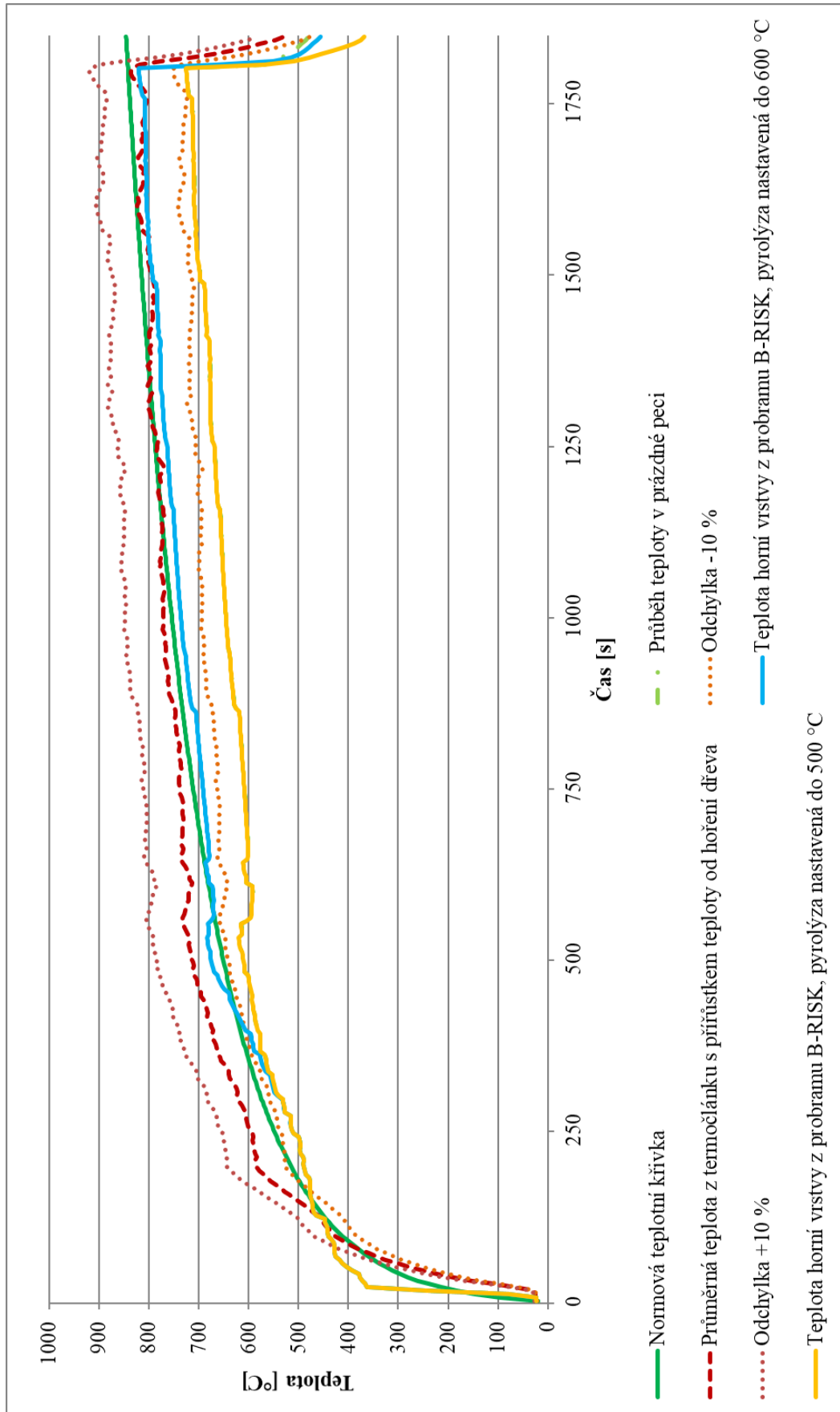
5.2.4 Vyhodnocení výsledků

Článek [24] uvádí, že pyrolýza probíhá do teploty 450-500 °C, proto je v první části výpočtu uvažována teplota 500°C. Tyto hodnoty jsou ale závislé na druhu dřeviny a poměrně významně ovlivňují průběh teplot s přírůstkem odhořívání. Na Grafu 17 a Grafu 18 je vidět, že přírůstek od hoření při nastavení konstantních hodnot od 500 °C (vysvětleno výše) je málo patrný. Je možné, že to je způsobeno použitím jednoduššího (zónového) modelu, který uvažuje průměrnou teplotu v horní vrstvě, kdežto během experimentu byl termočlánek umístěn přímo pod zkušebním vzorkem.

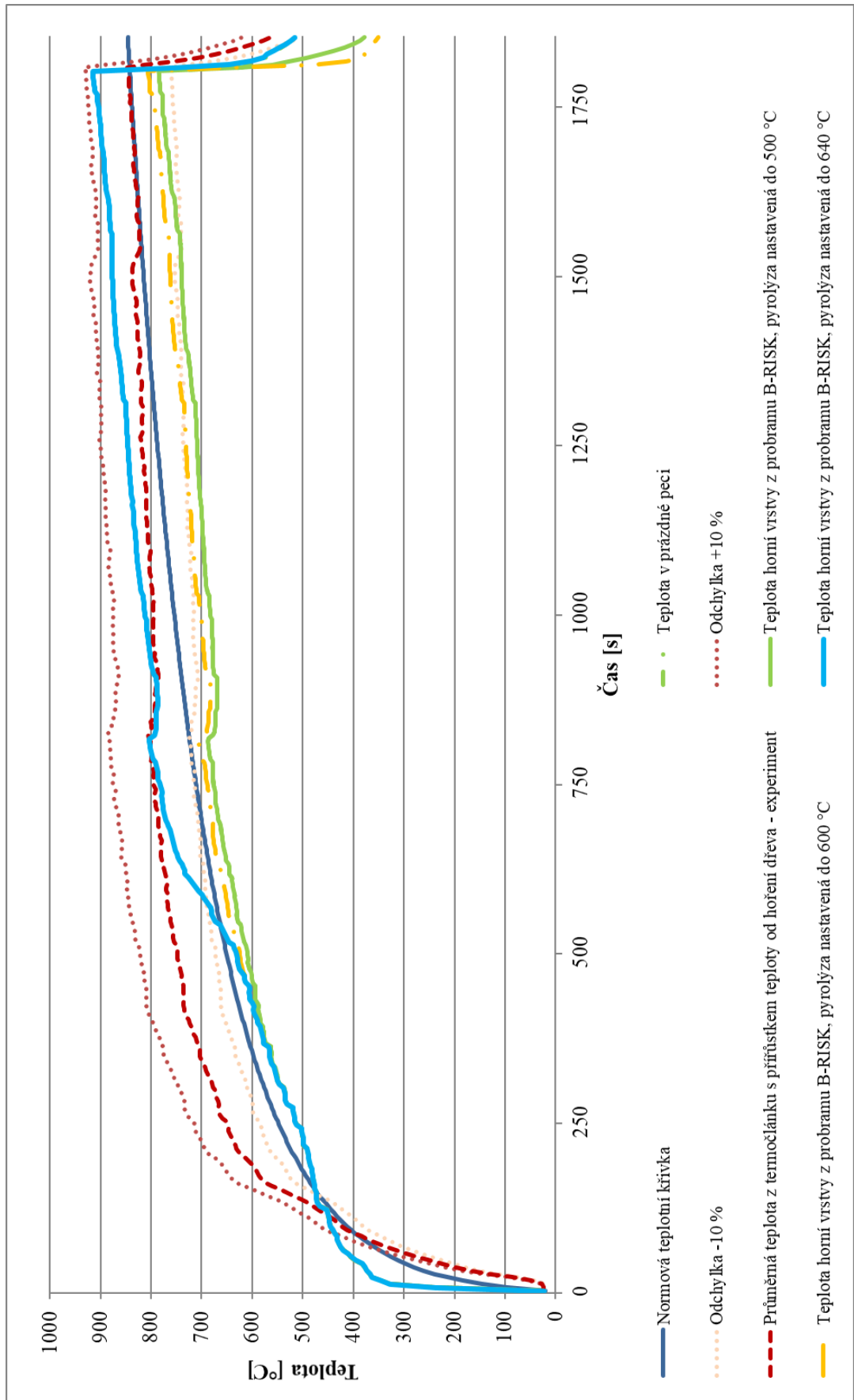
Výpočet byl tedy podroben studii citlivosti výsledků na teplotu, při které probíhá pyrolýza. V dalším výpočtu byla uvažována teplota pyrolýzy až na teplotu 600 °C, aby se dostalo většího přírůstku tepla od hořícího materiálu. Pokud se podíváme na Grafu 17, je z něho vidět, že takto zadaná pyrolýza daleko lépe odpovídá hodnotám z experimentu. V první fázi, do cca 300. sekundy, je patrněji pod křivkou z experimentu a téměř kopíruje průběh prázdné pece. Tento jev může být způsobem opět jednodušším zónovým modelem či délkou výpočetního kroku, které by bylo potřeba ještě dále zkoumat. Délka výpočetního kroku činí minimálně 5 vteřin, kvůli čemuž nebylo možné provést přesnější výpočet. Pro ověření tohoto předpokladu by bylo nutné provést citlivější analýzu.

Z Grafu 18 je možné vidět, že teploty jsou sice vyšší, než tomu bylo při nastavení na 500 °C, ale hodnoty jsou mimo meze zvolené odchylky 10 % od průběhu teplot z experimentu. U OSB desky nedošlo až tak velkému přírůstku od hoření OSB desky, jako tomu bylo u smrkového dřeva. Podstatným faktorem, který to ovlivňuje, je kromě vstupních vlastností prvků, včetně poměru mezi hustotou při teplotě 20 °C a hustotou, kterou má daný prvek při dosažení teploty 600 °C (500 °C), i tepelná vodivost.

Pro získání podobného průběhu teplot, jako u experimentu pro OSB desku, bylo nutné výpočet pyrolýzy nastavit do teploty 640 °C. Pro tuto hodnotu průběh teplot odpovídal zvolené odchylce +/- 10 % od experimentu.



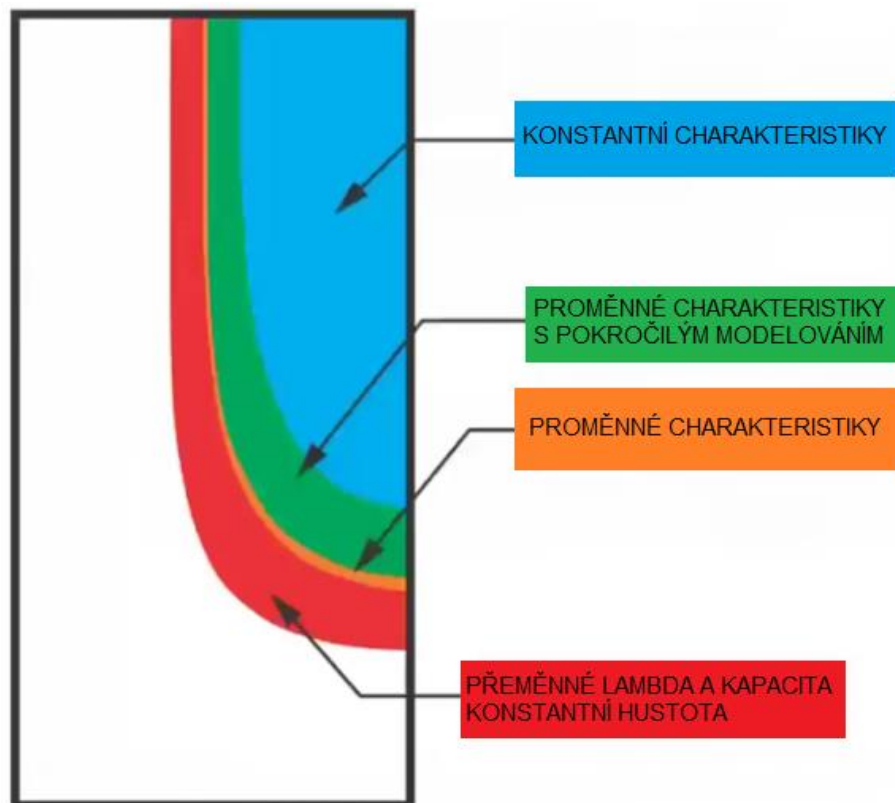
Graf 17 Porovnání výsledků přírůstku teploty od odhořívání smrkového dřeva



Graf 18 Porovnání výsledků přírůstku teploty od odhořívání OSB desky

6 Teplota ocelového prvku

Je několik variant, jakým způsobem je možné dopočítat teplotu chráněného prvku, který je chráněn materiálem na bázi dřeva či přímo dřevem. Záleží na způsobu, kterým je spočítán účinný průřez dřevěného prvku. Jedním z příkladů je postup výpočtu, který je využitý v kapitole 3, kde byly všechny vstupní údaje dřeva považovány za konstantní. Pokud je použit tento typ výpočtu, dostane se nejmenší účinný průřez prvku v porovnání k ostatním zvoleným variantám (viz Obrázek 29). Další variantou je, že se použijí proměnné charakteristiky dřeva s pokročilým modelováním, kde může dojít k ovlivnění v důsledku odpaření vodní páry či tvorbou izolační vrstvy, která je tvořena zuhelnatěním dřeva. Třetí varianta je téměř totožná s variantou číslo dvě (uvažují se pouze proměnné charakteristiky dřeva), zatímco poslední, čtvrtá varianta nám dá největší účinný průřez prvku, čehož dosáhneme tehdy, pokud bude uvažována proměnná tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita dřeva s konstantní hustotou. Všechny tyto varianty jsou znázorněné na Obrázku 29.



Obrázek 29 Ovlivnění velikosti účinného průřezu typem výpočtu [45]

V této práci je porovnána křivka z provedeného experimentu v kombinaci s konstantními a proměnnými charakteristikami smrkového dřeva. Průběh teplot na chráněném ocelovém prvku bude spočítán pomocí přírůstkové metody. Jednotlivé vzorce pro tuto metodu jsou popsány v kapitole 3.

Pro lepší přehlednost zvolených variant slouží Tabulka 23, kde je popsáno, jak se jednotlivé parametry uvažovaly.

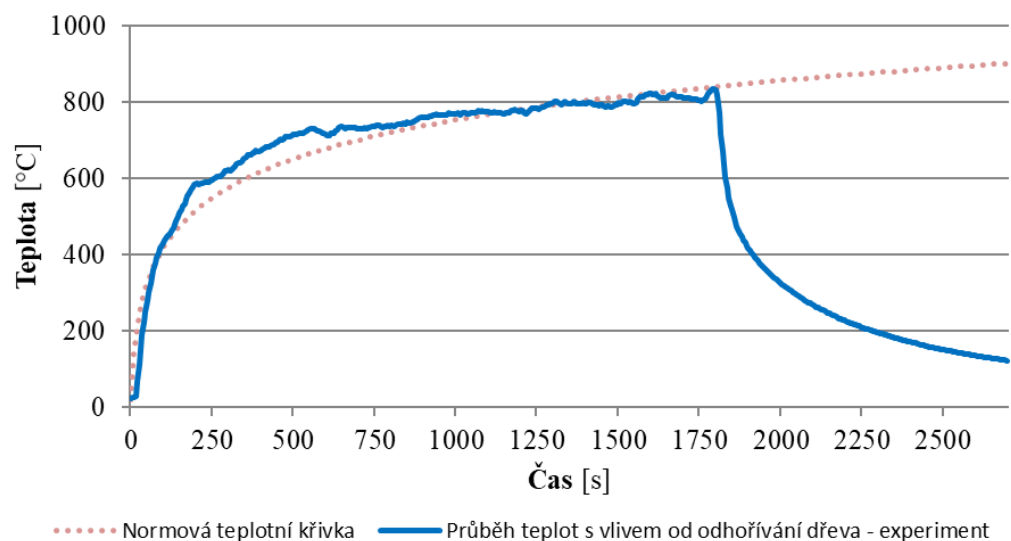
Tabulka 23 Přehled jednotlivých variant

Varianta	Tloušťka ochranného materiálu		Tepelná vodivost		Měrná tepelná kapacita		Hustota	
	Zuhel.	PNP	Zuhel.	PNP	Zuhel.	PNP	Zuhel.	PNP
A	-	P	-	K	-	K	-	K
B	-	P	-	P	-	P	-	P
C	-	K	-	K	-	K	-	K
D	P	P	K	P	K	P	K	P

Vysvětlivky:
Zuhel. – zuhelnatění
PNP – požárem nezasážený prvek
P – proměnné vlastnosti
K – konstantní vlastnosti

6.1.1 Povrchová teplota prvku

Pro porovnání budou použity průběhy teplot z experimentu, který je popsán v kapitole 4.3.2. V Grafu 19 je vyobrazena křivka z experimentu pro smrkovou dřevěnou desku. Tato křivka bude uvažována jako povrchová teplota při výpočtu přírůstku teploty na ocelovém prvku. Jelikož jsou v experimentu potřebné hodnoty měřeny na 4 místech, a to vždy pod vzorkem, použitá křivka je průměrnou teplotou z těchto 8 termočlánků (vždy jsou na jednom vzorku umístěny 2 termočlánky).



Graf 19 Průběh teplot s vlivem odhořívání smrkové desky - experiment

6.1.2 Vstupní charakteristiky dřeva

Pomocí přírůstkové metody bude dopočítán průběh teplot na ocelové desky tl. 10 mm, které budou chráněny smrkovým dřevem tloušťky 20 mm. V jednom případě se zachovají konstantní vstupní vlastnosti dřeva a v druhém případě budou tyto vlastnosti proměnné. Jedná se o vlastnosti: měrná tepelná kapacita, hustota a tepelná vodivost.

Pro všechny čtyři varianty (A, B, C, D) budou v případě ocelové desky použity stejné vstupní vlastnosti. Jednotlivé vstupní údaje jsou popsány v Tabulce 24.

Tabulka 24 Vstupné údaje ocelové desky

Ocelová deska	Tloušťka	d_a	0,01	[m]
	Povrchová plocha prvku (obvod)	A_m	0,18	[m ² /m]
	Objemová hmotnost [40]	ρ_a	7850	[kg/m ³]
	Objem (plocha)	V_a	0,0018	[m ³ /m]
	Emisivita[33]	E	0,7	[-]
	Faktor stínění[31]	k_{sh}	1	[-]
Součinitel prostupu tepla prouděním[34]		α_c	35	[W/(m ² ·K)]
Polohový faktor nechráněného prvku[31]		\emptyset	1	[-]
Časový interval		Δt	5	[s]

Jedná se tedy o ocelovou desku s tloušťkou 10 mm a půdorysnými rozměry 100 mm x 180 mm. Jelikož se jedná o 1D vedení tepla, do výpočtu je zahrnuta pouze jedna strana vzorku. Ocelová deska stejné půdorysné rozměry jako ochranný prvek.

Pro součinitel prostupu tepla prouděním, který se ve výpočtu započítává do nechráněného ocelového prvku, je zvolena hodnota 35 W/(m²·K). Tato hodnota se používá při použití zónových modelů.

6.1.2.1 Konstantní charakteristiky dřeva

V Tabulce 25 jsou popsány konstantní charakteristiky dřeva, a to konkrétně smrkového. Tyto charakteristiky byly použity do výpočtu přírůstkové metody. Tloušťka dřeva byla pro počáteční fázi zvolena stejná jako v experimentu (kapitola 4.5), tedy o hodnotě 20 mm. Vlivem odhořívání se ale tato tloušťka v závislosti na čase mění. Rychlost zuhelnatění pro smrkové dřevo byla uvažována $\beta_0 = 0,65$ mm/min.

V experimentu byly zkoumány 4 vzorky, které byly symetricky umístěny ze zkušební píce. Přesné umístění je popsáno a znázorněno v kapitole 4.5.3. V tomto výpočtu je zkoumáno 1D vedení tepla pro jeden z těchto vzorků.

Tabulka 25 Konstantní charakteristiky dřeva - smrk

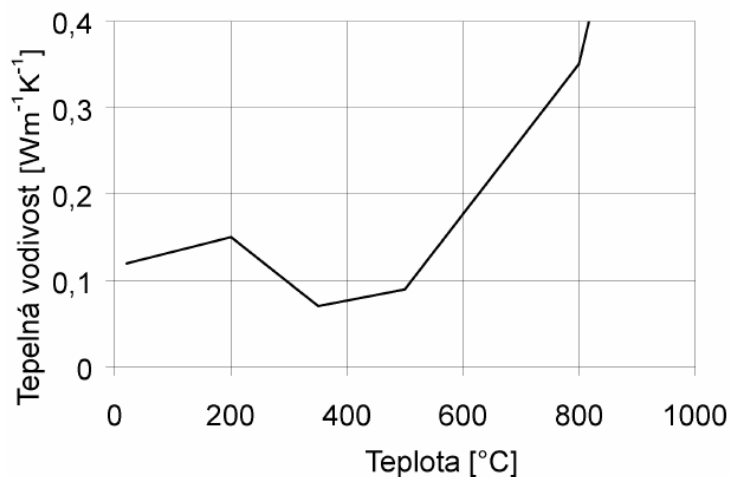
Tloušťka	d_p	0,02	[m]
Jednorozměrná rychlost zuhelnatění[7]	β_0	0,65	[mm/min]
Tepelná vodivost kolno na vlákna [36]	λ_p	0,239	[W/(m·K)]
Objemová hmotnost [36]	ρ_p	487	[kg/m ³]
Měrná teplotná kapacita [36]	c_p	1680	[J/(kg·K)]
Povrchová plocha prvku (obvod)	A_p	0,18	[m ² /m]
Objem (plocha)	V	0,0036	[m ³ /m]

6.1.2.2 Proměnné charakteristiky dřeva

Ve výpočtu budou jako proměnné charakteristiky dřeva použity tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a hustota. Průběhy těchto charakteristik jsou voleny podle ČSN EN 1995-1-2 [7].

1) Tepelná vodivost

Průběh tepelné vodivosti je znázorněn na Grafu 20 a číselně v Tabulce 26.



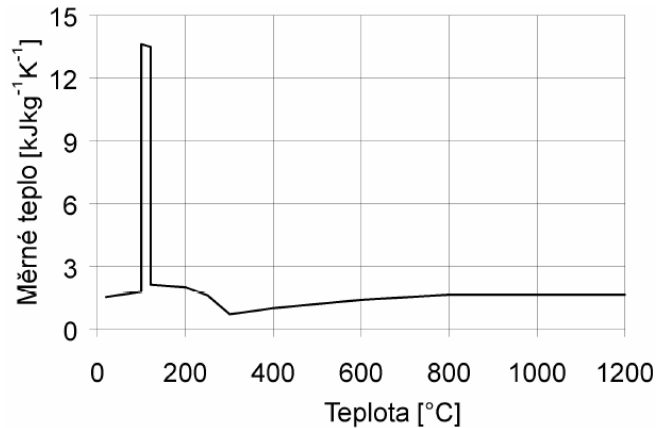
Graf 20 Průběh tepelné vodivosti dřeva [7]

Tabulka 26 Tepelná vodivost dřeva závislá na teplotě [7]

Teplota [°C]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
400	0,08
500	0,09
600	0,18
800	0,35
1200	1,50

2) Měrná tepelná kapacita

Průběh měrné tepelné kapacity dřeva je vidět na Grafu 21 a v Tabulce 27.



Graf 21 Průběh měrného tepla dřeva [7]

Tabulka 27 Měrné teplo dřeva závislé na teplotě [7]

Teplota [°C]	Měrné teplo [kJ/(kg·K)]
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

3) Hustota

V normě [7] je udáván poměr hustoty (viz Tabulka 28), který je nejen závislý na teplotě, ale i obsahu vlhkosti, která se do teploty 100 °C musí připočítat. Pokud je teplota vyšší jak 100 °C, uvažuje se s tím, že v dřevě už žádná vlhkost není.

Tabulka 28 Poměr hustoty jehličnatých dřevin [7]

Teplota [°C]	Poměr hustoty [-]
20	1 + w
99	1 + w
99	1 + w
120	1,00
120	1,00

200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0
w – vlhkost	

6.1.3 Vyhodnocení výsledků

Na Grafu 22, je vykreslen průběh teploty na nechráněném ocelové desce a jak je vidět na Grafu 23, vypočítané hodnoty z variant A a B se neshodují s experimentem a ani neodpovídají předběžnému odhadu dle Obrázku 29.

Varianta C (viz Graf 23) byla vložena pouze pro ověření toho, že zuhelnatělá vrstva také tvoří ochrannou (izolační) funkci. V této variantě se uvažovala konstantní tloušťka dřeva, což v reálném prostředí, kdy dřevo je namáháno vysokými teplotami (požárem) sice není možné, ale pokud ji porovnáme s křivkou z provedeného experimentu, přiblížíme se k ní daleko více, než je varianta A a B. Vyplývá z toho tedy, že zuhelnatělá vrstva má lepší tepelně izolační schopnost než samotné, požárem nedotknuté dřevo.

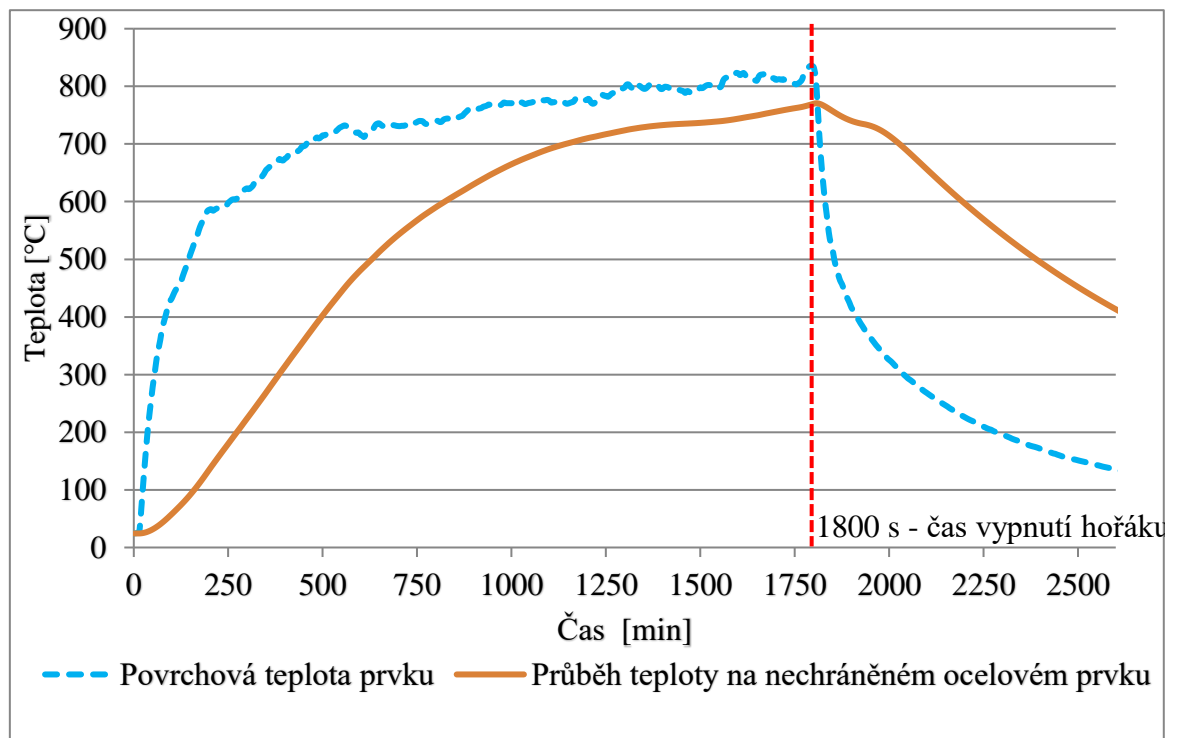
Jelikož předchozí varianty nezapočítaly zuhelnatělou vrstvu, byla přidána i varianta D (viz Graf 24), do které se právě zuhelnatělá vrstva připočítala. Bylo nutné provést složitější výpočet, který je rozdělený na 2 části. V první části se uvažuje jako ochranná vrstva zuhelnatělá vrstva a ochranným materiálem surové dřevo. Do výpočtu bylo tedy nutné vložit jednotlivé vlastnosti pro zuhelnatělou vrstvu, které jsou vypsány v Tabulce 29. Tato vrstva nemá konstantní tloušťku a je tedy závislá na rychlosti odhořívání dřeva. Jedná se o konstantní hodnoty, jelikož nejsou známe v závislosti na teplotě. Pro surové dřevo byly uvažovány proměnné charakteristiky, které nejsou závislé na povrchové teplotě, ale na teplotě, která vzniká na hranici zuhelnatělého a surového dřeva. Jak je vidět na Grafu 24, průběh teploty mezi těmito vrstvami je v prvních cca 150 sekundách strmější, jelikož se do teploty 100 °C hustota nemění (dle normy [7]). Další zlom této křivky nastává v cca 1845 sekundě, kde dojde k úplnému odhoření surového dřeva a zůstává zde pouze zuhelnatělá vrstva. I surové dřevo funguje jako jakýsi izolant mezi zuhelnatělou vrstvou a ocelovou deskou, proto když tato vrstva zmizí, dojde k většímu nárůstu teploty.

V dalším kroku bylo nutné vypočítat průběh teploty mezi surovým dřevem a ocelovou deskou, kde se jako povrchová teplota uvažovala křivka z předchozího výpočtu (teplota mezi zuhelnatělou vrstvou a surovým dřevem). Tato část výpočtu dále probíhala stejně jako ostatní varianty. Jak je na Grafu 24 vidět, varianta D je velmi podobná křivce získané z experimentu. Je

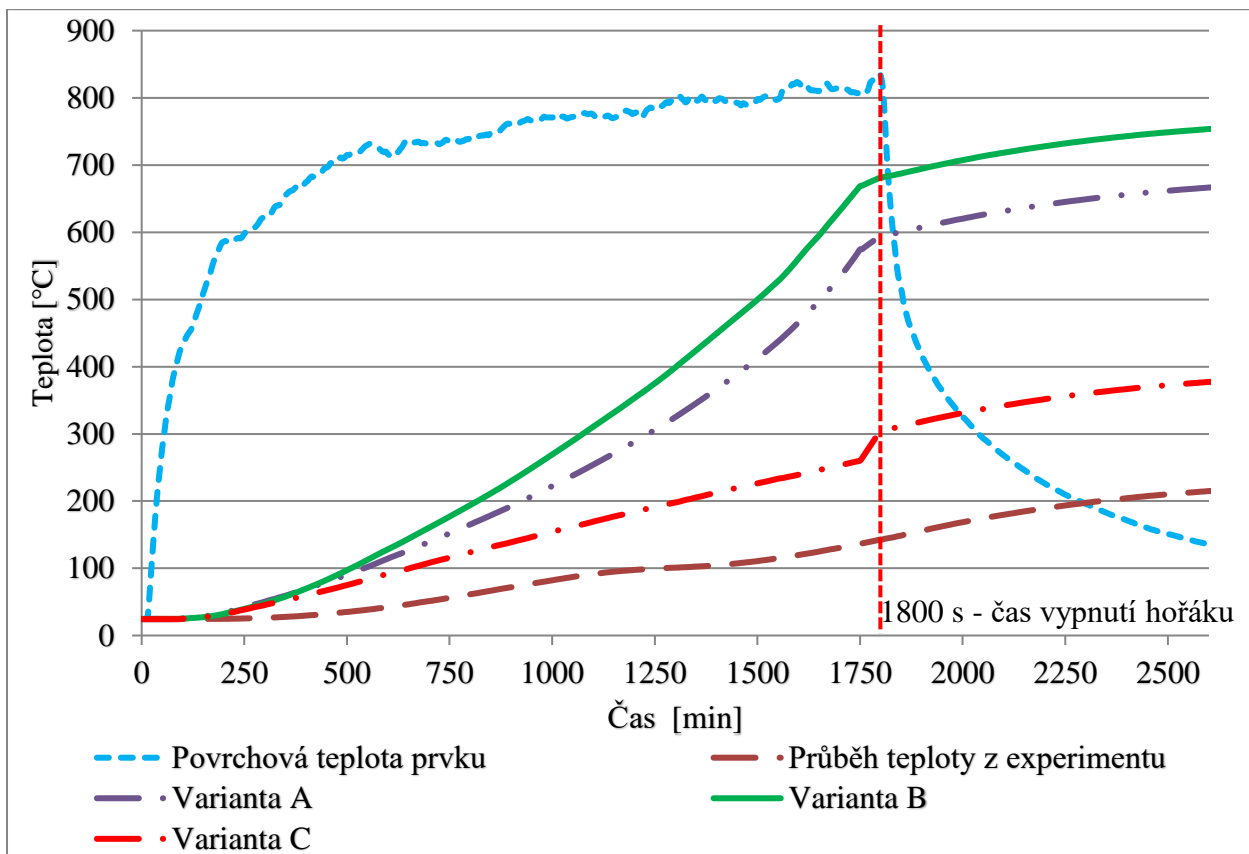
ale důležité podotknout, že tento výpočet nezahrnuje výskyt trhlin, uvažuje konstantní charakteristiky (hustotu, měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost) a předpokládá, že objem zuhelnatělé vrstvy odpovídá objemu surového dřeva. Je tedy potřeba brát tyto výsledky pouze jako přibližné, vytvořené za účelem předběžného odhadu.

Tabulka 29 Vstupní vlastnosti zuhelnatělé vrstvy [46]

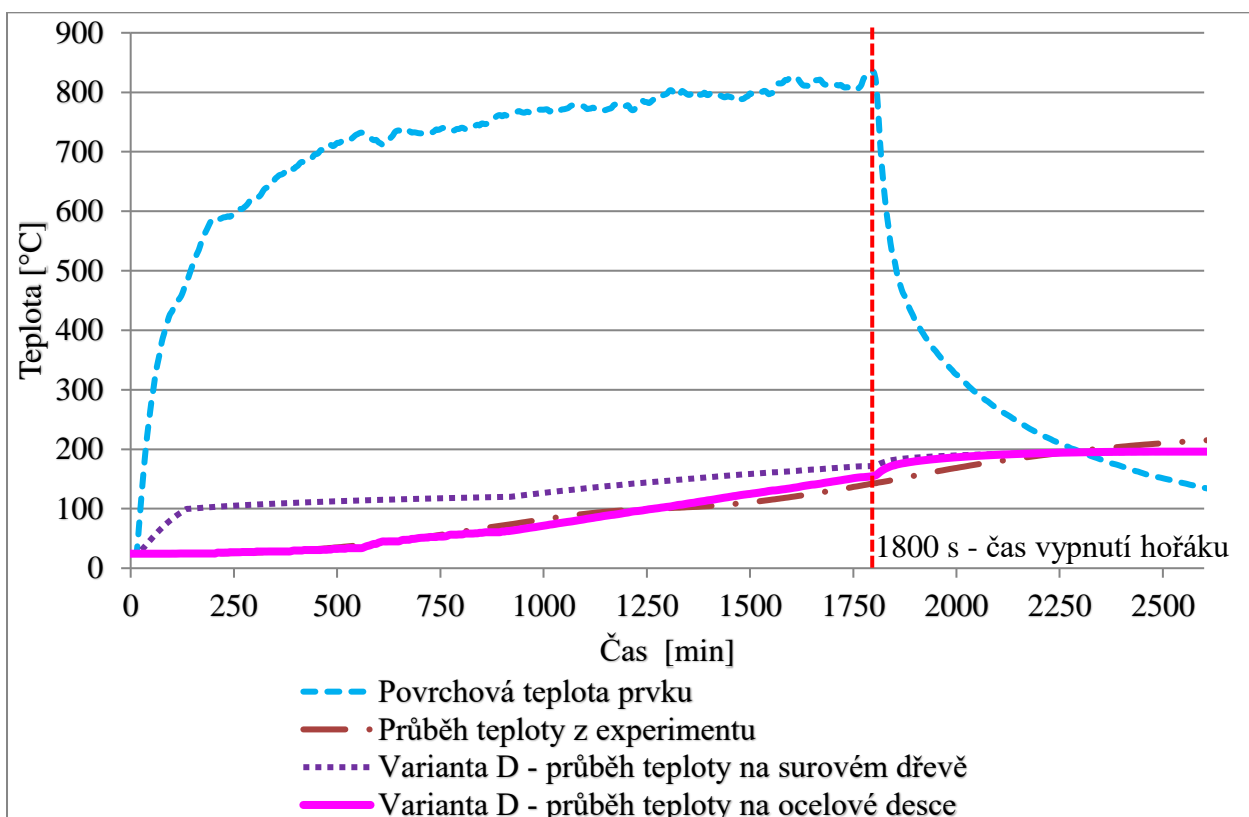
Měrná tepelná kapacita	800 J/(kg·K)
Tepelná vodivost	0,1 W/(m·K)
Hustota	299 kg/m ³



Graf 22 Průběh teploty na nechráněné ocelové desce



Graf 23 Průběh teplot variant A, B, C a porovnání s experimentem



Graf 24 Průběh teplot varianty D a porovnání s experimentem

7 Závěr

V první části práce jsou shrnuty základní informace týkající se dřeva a materiálů na bázi dřeva a také jejich chování za vysokých teplot za účelem použití těchto materiálů jako požární ochranu. Proběhla analýza českých i zahraničních literatur, které se zabývaly nejen analytickými a numerickými modely odhořívání dřeva, ale i porovnáním s jejich experimenty.

V další části práce uvádí analytický model, který počítá pomocí přírůstkové metody. Cílem tohoto modelu je porovnat různé typy dřeva a materiálů na bázi dřeva k požární ochraně ocelové konstrukce. Jako ochranný materiál se použilo smrkové rostlé dřevo a dřevotřísková deska. Tyto materiály chrání ocelovou desku, na které je sledován průběh teploty. Následně bylo provedeno vyhodnocení, která tloušťka daných materiálů dle výpočtu splňuje určitou požární odolnost. Dle výsledků lze zhodnotit, zda dřevo a materiál na bázi dřeva zvyšuje požární odolnost ocelové konstrukce, i když tento výpočet vykazuje konzervativní hodnoty oproti případné skutečnosti, jak bylo zjištěno v kapitole 6.

Experiment, který se konal v UCEEBu poskytl cenné informace, které bylo možné aplikovat do této práce. Během experimentu byly zkoušeny ocelové vzorky chráněné dřevem a OSB deskou v komoře pro RCT a v píce miniFUR. Právě scénář, který probíhal v peci miniFUR byl v rámci této práce modelován v programu B-RISK. Díky tomuto modelu bylo prokázáno, že lze přírůstek teploty vzniklé hořením dřeva jako požární ochrany předpovědět v zónovém modelu, který je řádově jednodušší než modely typu polí (CFD modely). Odhad přírůstku tepla od hoření dřeva, který byl zakomponován do zónového modelu byl dopočítán analytickým výpočtem v programu Excel.

Modelování v programu B-RISK přineslo zajímavé výsledky. Hodnoty se týkají nejen modelování prázdné pece, kdy výsledky vycházejí pouze s drobnou odchylkou, ale také modelování provedeného experimentu s příspěvkem od hoření dřeva. Při této simulaci bylo sice potřeba upravit výpočetní hodnoty poněkud odlišněji, než udává literatura, přesto se podařilo dosáhnout hodnot, které odpovídají mezím odchylky +/- 10 % od provedeného experimentu.

Pro dopočítání teploty na chráněné ocelové desce byla použita přírůstková metoda. Jako povrchová teplota byla aplikována křivka z experimentu, která zahrnovala i přírůstek tepla od odhořívání smrkového dřeva bez zahrnutí zuhelnatělé vrstvy. Tento postup neměl příliš uspokojivé výsledky. Bylo tedy nutné do výpočtu vložit i zuhelnatělou vrstvu, která přiblížila výslednou křivku ke křivce z experimentu. I tyto výsledky je ale nutno brát pouze jako přibližné z důvodu konstantních vlastností zuhelnatělé vrstvy a nezapočítání trhlin v této vrstvě. V postupu je také nutné brát v úvahu, že zvolená metoda je používána a validována pro přestup tepla do ocelových konstrukcí chráněných jiným materiálem, než je dřevo. Chování materiálu na bázi dřeva je natolik složité, že ho lze jen ztěžka předpovědět některou zjednodušenou inženýrskou metodou.

V práci bylo potvrzeno, že zvyšovat požární odolnost ocelových prvků dřevem či materiálem na bázi dřeva je možné a nese to s sebou mnoho výhod. Nejenže zvýšíme již několikrát zmiňovanou požární odolnost, ale použijeme k tomu obnovitelný přírodní zdroj, který nám navíc může v interiéru zlepšit design. Na druhou stranu se jedná o hořlavý materiál, jenž nosnou ocelovou konstrukci, která spadá do DP1 (nehořlavý konstrukční systém) přesune do DP3 (hořlavý konstrukční systém), což přináší určitá omezení ve výstavbě (např. omezení počtu nadzemních podlaží, velké odstupové vzdálenosti...).

Bohužel chování dřeva během požáru je velice složité, a proto je nutné s výzkumem dále pokračovat, aby numerické a analytické modely dokázaly plnohodnotně předvídat jeho chování.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Materiály na bázi dřeva	3
Obrázek 2 Jednorozměrné zuhelnatění širokého průřezu [7].....	7
Obrázek 4 Okrajové podmínky do programu ANSYS [15].....	12
Obrázek 3 Model SFRC dřevěného roštu a drátkobetonové desky [15].....	12
Obrázek 5 Vývoj teploty v 30. minutě [17]	13
Obrázek 6 Vývoj teploty v 60. minutě [17]	13
Obrázek 7 Půdorysné schéma rozmístění dřevěných trámů[18]	14
Obrázek 8 Řez dřevěným prvkem s označením kontrolních bodů A, B, C[18]	14
Obrázek 9 Znázornění polohy termočlánků v průřezu [9].....	15
Obrázek 10 Porovnání teploty z experimentu a z programu AnsysWorkbench [9]	16
Obrázek 11 Přenos tepla ve dřevě vystaveném požáru [20]	18
Obrázek 12 Dřevěný trám vystavený ze tří stran a dřevěná deska vystavená z jedné strany ohni [21].....	19
Obrázek 13 Vrstvy dřeva během požáru [23]	20
Obrázek 14 Hodnoty ze zkoušky 1 [26].....	22
Obrázek 15 a) nechráněný ocelový prvek; b) chráněný ocelový prvek dřevem	29
Obrázek 16 Univerzitní centrum energeticky efektivních budov (UCEEB)[36].....	35
Obrázek 17 Schéma RCT [38]	36
Obrázek 18 a) Otvory pro přívod a odvod vzduchu; b), c) Varianty uložení zkušební vzorku [39].....	37
Obrázek 19 Půdorysné umístění desek a ocelového plechu v rohu RCT[40].....	37
Obrázek 20 Umístění ocelového plechu v řezu[40].....	37
Obrázek 21 Rozmístění termočlánků při Room Corner Testu[40]	38
Obrázek 22 Průběh zkoušky v RCT [40]	39
Obrázek 23 Příprava zkušebních vzorků [40].....	42
Obrázek 24 Půdorysné uspořádání vzorků a hořáku ve zkušební peci [40]	43
Obrázek 25 Umístění v řezu zkušebních vzorků a hořáku ve zkušební peci [40]	43
Obrázek 26 Průběh zkoušky v středněrozměrové peci a) v 20 minutě; b) v 31 minutě; c) v 45 minutě [40].....	43
Obrázek 27 Rozměry modelované pece.....	47
Obrázek 28 Vizualizace prázdné pece v programu Smokeview ve 2. minutě.....	48

Obrázek 29 Ovlivnění velikosti účinného průřezu typem výpočtu [45] 56

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tepelná vodivost dřeva [5]	4
Tabulka 2 Tepelná vodivost materiálů na bázi dřeva [6].....	4
Tabulka 3 Vliv druhu dřeva a vlhkosti na měrné teplo [5]	5
Tabulka 4 Rozdělení domácích dřevin podle hustoty při vlhkosti 12 % [5].....	5
Tabulka 5 Hustota materiálů na bázi dřeva [8]	6
Tabulka 6 Návrhová rychlost zuhelnatění [7].....	8
Tabulka 7 Určení k_0 pro nechráněné povrchy s (t v minutách) [7].....	8
Tabulka 8 Výsledky zkoušky	17
Tabulka 9 Naměřené hodnoty zuhelnatělé vrstvy	19
Tabulka 10 Množství jednotlivých produktů pyrolýzy během rychlosti zahřívání 1 a 0,05 K/s [25]	21
Tabulka 11 Kinetické složky dřeva [26]	21
Tabulka 12 Kritická teplota ocelových prvků.....	23
Tabulka 13 Redukční vztah pro napětí – deformace [31]	24
Tabulka 14 Konstantní vstupní údaje.....	30
Tabulka 15 Potřebná tloušťka ochranného materiálu pro požadovanou požární odolnost.....	31
Tabulka 16 Vlastnosti použitých materiálů [40].....	40
Tabulka 17 Materiálové vlastnosti pro experiment v peci miniFUR [40]	41
Tabulka 18 Porovnání průběhu teplot rozdílných ochranných materiálů	44
Tabulka 19 Nastavení výkonu hořáku pro prázdnou pec v programu B-RISK	47
Tabulka 20 Výkon hořáku podle experimentu pro smrkové dřevo	49
Tabulka 21 Výkon hořáku podle experimentu pro OSB desku	49
Tabulka 22 Vstupní hodnoty pro jednotlivé složky smrkového dřeva a OSB desky.....	51
Tabulka 23 Přehled jednotlivých variant	57
Tabulka 24 Vstupné údaje ocelové desky	58
Tabulka 25 Konstantní charakteristiky dřeva - smrk	59
Tabulka 26 Tepelná vodivost dřeva závislá na teplotě [7].....	59
Tabulka 27 Měrné teplo dřeva závislé na teplotě [7].....	60
Tabulka 28 Poměr hustoty jehličnatých dřevin [7]	60
Tabulka 29 Vstupní vlastnosti zuhelnatělé vrstvy [46].....	62

Seznam grafů

Graf 1 Vztah mezi rychlostí zuhelnatění a časem [7]	10
Graf 2 Předpokládaná hloubka zuhelnatění [12].....	10
Graf 3 Porovnání hloubky zuhelnatění analýzou konečných prvků (FEA) a přílohou A pro $a = 25$ a $35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ($\Gamma = 10$, $q_{id}=210 \text{ MJ}/\text{m}^2$, $\rho_o= 450\text{kg}/\text{m}^3$, $\omega = 12\%$).....	11
Graf 4 Porovnání výpočetních a naměřených teplot v kontrolních bodech A, B a C [18]	15
Graf 5 Porovnání metod zuhelnatění dřeva [9]	17
Graf 6 Redukční faktor pro vztah napětí - deformace oceli při zvýšených teplotách [31]	24
Graf 7 Závislost tepelných charakteristik oceli na teplotě [29]	25
Graf 8 Závislost normové teplotní křivky a tloušťky zuhelnatění	30
Graf 9 Teplota nechráněné ocele a chráněné ocele dřevem tloušťky 150 mm	31
Graf 10 Průběh teplot v případě nechráněné oceli a v případě oceli chráněné rostlým dřevem o různých tloušťkách dřeva	33
Graf 11 Průběh teplot v případě nechráněné oceli a v případě oceli chráněné dřevotřískovou deskou v různých tloušťkách	34
Graf 12 Průběh teploty na termočláncích umístěných na odvrácené straně ocelové desky s nastavením hořáku dle normy pro RCT [40]	40
Graf 13 Průběh teplot během použití ochranného materiálu z OBS desky [40].....	45
Graf 14 Průběh teplot během použití ochranného materiálu ze smrkového dřeva [40]	45
Graf 15 Porovnání normové teplotní křivky s průběhem teplot v prázdné peci	48
Graf 16 Průběh teplot dle nastaveného výkonu hořáku z experimentů	50
Graf 17 Porovnání výsledků přírůstku teploty od odhořívání smrkového dřeva	54
Graf 18 Porovnání výsledků přírůstku teploty od odhořívání OSB desky	55
Graf 19 Průběh teplot s vlivem od odhořívání smrkové desky - experiment	57
Graf 20 Průběh tepelné vodivosti dřeva [7]	59
Graf 21 Průběh měrného tepla dřeva [7].....	60
Graf 22 Průběh teploty na nechráněné ocelové desce.....	62
Graf 23 Průběh teplot variant A, B, C a porovnání s experimentem	63
Graf 24 Průběh teplot varianty D a porovnání s experimentem	63

Literatura

- [1] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 978-80-86769-72-1.
- [2] ROTTER, T a Petr KUKLÍK. *Kovové a dřevěné konstrukce*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 978-80-01-01148-5.
- [3] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. ISBN 978-80-247-1329-8.
- [4] BÖHM, Martin, Jan REINER, Jan BOMBA a Jiří LUKÁŠEK. Materiály na bázi dřeva / Materiály na bázi dřeva. *Materiály na bázi dřeva* [online]. [vid. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://drevene-materialy.fld.czu.cz/uvod/>
- [5] HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-169-2.
- [6] AJDARÓW, Marek. *Velkoplošné materiály pro konstrukce staveb na bázi dřeva*. Brno, 2008. *Bakalářská práce*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. *Lesnická a dřevařská fakulta*.
- [7] ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 68 p.
- [8] LAUŠ, Ladislav. *Dřevo jako konstrukční materiál*. Brno, 2013. *Bakalářská práce*. Vysoké učení technické v Brně. *Fakulta strojního inženýrství*.
- [9] KAMENICKÁ, Zuzana, Jaroslav SANDANUS, Lukáš BLESÁK, Kamila CÁBOVÁ, František WALD a Jaroslav SANDANUS. Methods for determining the charring rate of timber and their mutual comparison. *WOOD RESEARCH*. 2018, **63**, 8.
- [10] CHARVÁTOVÁ, Magdaléna. *Požární odolnost lehkých dřevěných skeletů vícepodlažních budov*. Praha, 2017. *Disertační práce*. České vysoké učení technické v Praze. *Fakulta stavební*.
- [11] ZEMÁNEK, Pavel. *Posouzení požárních podhledů dřevěných konstrukcí a porovnání s Eurokódem*. Praha, 2018. *Diplomová práce*. České vysoké učení technické. *Fakulta stavební*.
- [12] HOPKIN, D.J., J. EL-RIMAWI, V. SILBERSCHMIDT a T. LENNON. An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires: Comparison of the Eurocode 5 parametric charring approach and advanced calculation models. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, **25**(5), 2584–2595. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.002](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.002)

- [13] KÖNIG, Jürgen. Effective thermal actions and thermal properties of timber members in natural fires. *Fire and Materials* [online]. 2006, **30**(1), 51–63. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.898
- [14] CACHIM, Paulo B. a Jean-Marc FRANSSSEN. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *Fire and Materials* [online]. 2009, **33**(3), 129–143. ISSN 03080501, 10991018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.985
- [15] Konig J, Walleij L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires part 2: a design model for standard fire exposure. I0001001. Stockholm: SP Tratek; 2000. nedatováno.
- [17] WALD, František a A KOL. *Benchmark studies: verification of numerical models in fire engineering*. Prague: CTU Publishing House, Czech Technical University, 2014. ISBN 978-80-01-05442-0.
- [18] CÁBOVÁ, Kamila, Filip ZEMAN, Lukáš BLESÁK, Martin BENÝŠEK a František WALD. Virtual test of fire-resistance of a timber beam. *Structures in Fire SiF'2018*. 2018, 8.
- [19] CHARRING LAYER ON A CROSS-LAMINATED TIMBER PANEL CONSTRUCTION. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen* [online]. 2019, (61(2)) [vid. 2020-05-14]. Dostupné z: doi:10.17423/afx.2019.61.2.11
- [20] MIKKOLA, E. Charring Of Wood Based Materials. *Fire Safety Science* [online]. 1991, **3**, 547–556. ISSN 18174299. Dostupné z: doi:10.3801/IAFSS.FSS.3-547
- [21] FRANGI, Andrea a Mario FONTANA. Charring rates and temperature profiles of wood sections. *Fire and Materials* [online]. 2003, **27**(2), 91–102. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.819
- [22] DUFKOVÁ, Magdaléna. Požadavky na požární bezpečnost dřevostaveb. *TZB-info* [online]. [vid. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/drevostavby-nove/7184-pozadavky-na-pozarni-bezpecnost-drevostaveb>
- [23] KUKLÍK, Petr, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, a STAVEBNÍ FAKULTA. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03310-4.
- [24] Sinha, S., Jhalani, A., M R, Ravi, Ray, Anjan. (2000). Modeling of pyrolysis in wood: A review. *J. Solar Energy Society of India*. 10. 41-62. nedatováno.
- [25] GRIECO, Enrico a Giancarlo BALDI. Analysis and modelling of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science* [online]. 2011, **66**(4), 650–660. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2010.11.018
- [26] WADE, Colleen, D.J. HOPKIN a Michael SPEARPOINT. *Enclosure fire model for mass timber construction - Benchmarking with a kinetic wood pyrolysis submodel*
- [27] WANG, Yong C. a Ian W. BURGESS, ed. *Performance-based fire engineering of structures*. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Spon Press, 2013. ISBN 978-0-203-86871-3.

- [28] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [29] LAUSOVÁ, Lenka. *Chování ocelových konstrukcí během požáru*. Ostrava, 2013. *Disertační práce*. Technická univerzita Ostrava. Fakulta stavební.
- [30] ČSN 73 0810. *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [31] EN 1993-1-2. *Eurokód 3: Návrh ocelových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Konstrukční požární konstrukce*. Brussels: CEN, 2005. 78 p.
- [32] KRATINA, Jakub. *Hustota materiálů a látek - Portál pro strojní konstruktéry*. *E-konstruktér* [online]. [vid. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>
- [33] *Tabulka emisivit běžných materiálů | Testo, s.r.o.* [online]. [vid. 2020-11-07]. Dostupné z: https://www.testo.com/cz-CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table
- [34] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [35] O nás. *UCEEB* [online]. 27. červenec 2020 [vid. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/o-nas>
- [36] ČVUT UCEEB konference 2020. *UCEEB* [online]. 20. květen 2020 [vid. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/aktuality/cvut-uceeb-konference-2020>
- [37] ČSN EN 14390. *Požární zkouška - Velkorozměrová ověřovací zkouška výrobků pro povrchové úpravy*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [38] POKORNÝ, Marek, Petr HEJTMÁNEK a Hana NAJMANOVÁ. *VIRTUÁLNÍ CFD MODEL PRO ROOM CORNER TEST*. nedatováno, 6.
- [39] *Vyvinuli jsme pec miniFUR pro středněrozměrové požární zkoušky*. *UCEEB* [online]. 2. září 2019 [vid. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://www.uceeb.cz/aktuality/vyvinuli-jsme-pec-minifur-pro-strednerozmerove-pozarni-zkousky>
- [40] ŠEJNA, Jakub. *Zpráva z experimentů provedených na UCEEB ČVUT v rámci GAČR č. 19-22435S ve dnech 6.7.-8.7.2020*. 2020, 27. 2020, 27.
- [41] WADE, Colleen. *Study report SR292 B-RISK 2013 software benchmarking examples*. nedatováno, 79.
- [42] RPEACOC. *CFast, Fire Growth and Smoke Transport Modeling*. *NIST* [online]. 25. květen 2010 [vid. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/product-services/consolidated-fire-and-smoke-transport-model-cfast>
- [43] CHLÁDEK, Jiří. *Malorozměrové zkoušky požární odolnosti*. Praha, 2019. *Diplomové práce*. ČVUT v Praze.

-
- [44] ČSN EN 1363-1. *Zkoušky požární odolnosti - Část 1: Obecné požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020
- [45] ŠEJNA, Jakub. Nosné konstrukce za požáru - Pokročilé modely odhořívání dřeva [přednáška]. In: SharePoint ČVUT [online]. Praha: ČVUT v Praze, 8.12.2020. [16.12.2020]. Záznam dostupný z: <https://sharepoint.cvut.cz/personal/my/sejnajak/Documents/NKPZ%20-%20p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka%20Pokro%C4%8Dil%C3%A9%20modelov%C3%A1n%C3%AD%20d%C5%99eva%20za%20po%C5%BE%C3%A1ru.mp4?e=4%3Ac9840edb1ce44eca9f91d487914d1405>. nedatováno.
- [46] GUPTA, Murlidhar, Jin YANG a Christian ROY. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles☆. *Fuel* [online]. 2003, **82**(8), 919–927. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00398-8