

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**ZUHELNATĚLÁ VRSTVA DŘEVĚNÝCH MASIVNÍCH
PRVKŮ POMOCÍ PRAVDĚPODOBNOSTNÍCH POSTUPŮ**

CHARRED LAYER OF MASSIVE TIMBER MEMBERS USING
PROBABILISTIC APPROACHES

Bc. Dominik Štraus

vedoucí práce: doc. Ing. Kamila Cáblová, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Štraus	Jméno: Dominik	Osobní číslo: 484457
Zadávací katedra: K134		
Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb		
Studijní obor/specializace: -		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zuhlenatělá vrstva dřevěných masivních prvků pomocí pravděpodobnostních postupů	
Název diplomové práce anglicky: Charred layer of massive timber members using probabilistic approaches	
Pokyny pro vypracování: Shrnutí současného stavu poznání Provedení experimentu Analýza dat ze zkoušky a statistické vyhodnocení vlivu intenzity požáru na zuhlenatělou vrstvu dřeva	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Kamila Cábová, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 3. 10. 2023	Termín odevzdání DP v IS KOS: 8. 1. 2024 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

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

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Dominik Štraus

Název diplomové práce: Zuhlenatělá vrstva dřevěných masivních prvků pomocí
pravděpodobnostních postupů

Základní část: Katedra dřevěných a ocelových konstrukcí podíl: 100 %

Formulace úkolů: Shrnutí současného stavu poznání

Provedení experimentu

Analýza dat ze zkoušky a statistické vyhodnocení vlivu intenzity požáru na
zuhlenatělou vrstvu dřeva

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím citované literatury pod odborným vedením doc. Kamily Cábové a konzultanty prof. Františka Walda a Ing. Jakuba Šejny.

Praha, 2. ledna 2024

.....

Bc. Dominik Štraus

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce, paní doc. Ing. Kamile Cábové, Ph.D., za vedení, za vytvoření příjemného prostředí a za možnost být součástí tohoto vědeckého projektu. Rád bych poděkoval Ing. Jakubu Šejnovi za jeho odpovědi na mé otázky, za velkou pomoc a technickou podporu. Velké díky patří mé rodině za neustávající podporu po celou dobu studia. Experimentální výzkum byl podpořen Grantovou agenturou České republiky v rámci projektu NO. 21-30949K “Charring of timber under fully developed natural fire – stochastic modelling”.

Obsah

Čestné prohlášení	I
Poděkování	II
Obsah	III
Seznam obrázků	V
Seznam tabulek	VII
Abstrakt	VIII
Abstract	VIII
1 Úvod a motivace	1
2 Cíle práce	2
3 Současný stav poznání	3
3.1 Dřevo	3
3.1.1 Složení dřeva	3
3.2 Vlastnosti dřeva za zvýšených teplot.....	4
3.2.1 Tepelně technické vlastnosti	4
3.2.2 Mechanické vlastnosti	8
3.2.3 Zuhelnatělá vrstva.....	9
3.2.4 Pyrolýza.....	9
3.3 Rychlost zuhelnatění.....	11
3.3.1 Zjednodušené postupy stanovení rychlosti zuhelnatění.....	11
3.3.2 Pokročilé metody stanovení rychlosti zuhelnatění	21
4 Experimentální studie	26
4.1 Popis experimentu.....	26
4.1.1 Room Corner Test.....	26
4.1.2 Zkušební vzorky a rozmístění vzorků v peci.....	26
4.1.3 Měření teploty.....	27
4.1.4 Zatížení.....	29
4.2 Průběh požáru	29
4.3 Sběr dat.....	31
4.3.1 Příprava prvků pro sběr dat.....	31
4.3.2 Sběr dat.....	32
4.4 Analýza dat.....	34
4.4.1 Teploty	34
4.4.2 Hloubka zuhelnatění	35
4.4.3 Rychlost zuhelnatění.....	39
4.4.4 Trhliny.....	40
5 Pravděpodobnostní výpočetní model	41
5.1 Tvorba výpočetního modelu.....	41

5.2	Obecný výpočetní model.....	44
5.3	Validace modelu	47
5.3.1	Úprava teplot výpočetního modelu.....	47
5.3.2	Zpřesnění materiálových charakteristik výpočetního modelu	49
5.3.3	Zpřesnění obsahu kyslíku ve výpočetním modelu	50
5.3.4	Vyhodnocení získaných výsledků.....	52
6	Parametrická studie	57
6.1	Parametrická studie výkonu hořáku.....	57
6.1.1	Parametr studie.....	57
6.1.2	Výsledky parametrické studie.....	60
6.1.3	Vyhodnocení hloubek zuhelnatění.....	68
6.2	Parametrická studie vlhkosti	70
6.2.1	Parametr studie.....	70
6.2.2	Výsledky parametrické studie vlhkosti.....	71
6.2.3	Výsledky parametrické studie vlhkosti.....	74
7	Závěr.....	76
	Literatura.....	78

Seznam obrázků

Obr. 3.1: Tři hlavní osy dřeva vzhledem ke směrům vláken a letokruhům [1].....	3
Obr. 3.2 Charakteristické vrstvy dřeva při požáru [7]	4
Obr. 3.3: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu [6]	5
Obr. 3.4: Vztah teploty a měrného tepla pro dřevo a dřevěné uhlí [6].....	6
Obr. 3.5 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin při počáteční vlhkosti 12 % [6].....	7
Obr. 3.6: Účinek teploty na modul pružnosti rovnoběžně s vlákny u dřeva jehličnatých dřevin [6]	9
Obr. 3.7: Rychlost zuhelnatění β v závislosti na čase t pro parametrický požár [6].....	16
Obr. 3.8: Porovnání normových křivek ISO 834 a ASTM E 119, graf závislosti teploty na čase [18]	18
Obr. 3.9: Srovnání rychlostí zuhelnatění v závislosti na čase pro různé metody [20].....	23
Obr. 3.10: Porovnání normové teplotní křivky a požárních scénářů 1-3 [23].....	25
Obr. 3.11: Znázornění scénářů přirozeného požáru [23]	25
Obr. 4.1: Dispozice místnosti Room Corner Test [25].....	26
Obr. 4.2: Rozmístění prvků v Room Corner Testu	27
Obr. 4.3: Rozmístění termočlánků ve zkušební peci.....	28
Obr. 4.4 (A) Rozmístění termočlánků v pracovním prostředí; (B) Umístění sloupů a termočlánků v RCT.....	28
Obr. 4.5: Výkon hořáku v průběhu experimentu v závislosti na čase.....	29
Obr. 4.6: (A) Fotografie průběhu požáru při výkonu 100 kW; (B) Fotografie průběhu požáru při výkonu 300 kW.....	30
Obr. 4.7: (A) Konec zkoušky a hoření sloupů; (B) Výsledné zuhelnatění sloupů po požáru.....	31
Obr. 4.8 (A) Sloupy se zuhelnatělou vrstvou; (B) Sloupy bez zuhelnatělé vrstvy.....	32
Obr. 4.9: (A) Stojan vytvořený pro fotodokumentaci prvků; (B) Ukázka měřeného prvku s měřítkem.....	33
Obr. 4.10: (A) Fotografie měřeného řezu ve výšce 1920 mm (B) Fotografie měřeného řezu ve výšce 1250 mm	34
Obr. 4.11: Teploty v různých hloubkách sloupu 1 ve výšce 1920 mm	34
Obr. 4.12: Teploty v různých hloubkách sloupu 3 ve výšce 1920 mm	35
Obr. 4.13: Měřený průřez ve výšce 1400 mm pro znázornění orientace vůči požáru.....	36
Obr. 4.14: Fotografie měřeného řezu ve výšce 1600 mm	37
Obr. 4.15: Hloubky zuhelnatění a vrstva pyrolýzy po výšce sloupu 1 v řezu A.....	37
Obr. 4.16: Hloubky zuhelnatění sloupu 1 po výšce (A) řez 2 (B) řez 3	38
Obr. 4.17: Hloubky zuhelnatění sloupu 1 po výšce (A) řez B (B) řez C.....	39
Obr. 4.18: Průřez ve výšce 1850 mm.....	40
Obr. 5.1: Porovnání normové rychlosti zuhelnatění a rychlostí zuhelnatění vypočtené pomocí rovnice 3.27	41
Obr. 5.2: Ukázka kódu z prostředí Python	42

Obr. 5.3: Graf zobrazující 100 výpočtů rychlosti zuhelnatění dle rovnice 3.27 pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovou rychlostí zuhelnatění [3, 6]	45
Obr. 5.4: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6].....	46
Obr. 5.5 Přibližný průběh hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6].	46
Obr. 5.6: Průběh teplot na deskovém snímači v průběhu experimentu	47
Obr. 5.7: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylu hodnot definovaných Hietaniemim pro průběh teplot z experimentu v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění.....	48
Obr. 5.8: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro průběh teplot z experimentu v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6].....	48
Obr. 5.9: Zobrazení střední hodnoty a odchylek rychlosti zuhelnatění v závislosti na čase.....	50
Obr. 5.10: Zobrazení střední hodnoty a odchylek hloubky zuhelnatění v závislosti na čase.....	50
Obr. 5.11: Zobrazení střední hodnoty a odchylek rychlosti zuhelnatění v závislosti na čase při zafixování kyslíku v průběhu experimentu	51
Obr. 5.12: Zobrazení střední hodnoty a odchylek hloubky zuhelnatění v závislosti na čase při zafixování kyslíku v průběhu experimentu	52
Obr. 5.13: Obrázek s čtyřmi dílčími řezy v porovnání s vypočtenými hodnotami	54
Obr. 5.14: Účinné průřezy pro návrh v různých průřezech	55
Obr. 6.1: Průběhy výkonů	58
Obr. 6.2: Průběhy teplot pro různé výkony hořáků	60
Obr. 6.3: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci FDS original	61
Obr. 6.4 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci FDS original	61
Obr. 6.5: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Experiment 1	62
Obr. 6.6 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Experiment 1	63
Obr. 6.7: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Constant.....	64
Obr. 6.8 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Constant	64
Obr. 6.9: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Fall_t300_0.....	65
Obr. 6.10 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Fall_t300_0.....	65
Obr. 6.11: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Fall_t600_100.....	66
Obr. 6.12: Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Fall_t600_100	67
Obr. 6.13: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Rise and fall	67
Obr. 6.14: Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Rise and fall.....	68
Obr. 6.15: Srovnání středních hodnot rychlosti zuhelnatění pro popsané simulace	69
Obr. 6.16: Srovnání středních hodnot hloubky zuhelnatění pro popsané simulace	70
Obr. 6.17: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 10 %.....	71
Obr. 6.18 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 10 %	72
Obr. 6.19: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 15 %.....	72
Obr. 6.20 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 15 %	73

Obr. 6.21: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 20 %.....	73
Obr. 6.22 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 20 %.....	74
Obr. 6.23: Srovnání středních hodnot rychlostí zuhelnatění pro různé vlhkosti dřeva.....	75
Obr. 6.24: Srovnání středních hodnot hloubek zuhelnatění pro různé vlhkosti dřeva	75

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu [6].....	5
Tab. 3.2: Vztah teploty a měrného tepla pro dřevo a dřevěné uhlí [6].....	6
Tab. 3.3 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin.....	8
Tab. 3.4: Kinetické koeficienty dle X. Wang [14]	11
Tab. 3.5: Návrhové rychlosti zuhelnatění β_0 a β_n uvedené v ČSN EN 1995-1-2 [6].....	12
Tab. 3.6: Charakteristické vlastnosti dřeva pro výpočty dle křivky ASTM E 119 [1].....	19
Tab. 3.7: Porovnání rychlostí zuhelnatění pro různé scénáře [2]	25
Tab. 4.1: Výpočet průměrné rychlosti zuhelnatění pro experiment trvající 30 minut.....	40
Tab. 5.1: Pravděpodobnostní rozdělení používaných hodnot [3]	43
Tab. 5.2 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin.....	44
Tab. 6.1: Výsledné hloubky zuhelnatění pro dané simulace.....	69
Tab. 6.2: Výsledné hloubky zuhelnatění pro dané vlhkosti	74

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá předpovědí hloubky zuhelnatění dřevěných prvků pomocí pravděpodobnostního přístupu. Vrstva zuhelnatělého dřeva má dobré izolační vlastnosti, zabraňuje přenosu tepla na tepelně nedegradované dřevěné prvky a přímo přispívá k požární odolnosti dřevěných prvků. V první části diplomové práce jsou shrnuty vlastnosti dřeva za zvýšených teplot a metody určování vrstvy zuhelnatělého dřeva. Druhá část se zabývá popisem experimentu provedeného v rámci Room Corner Testu, kde byly zkoumány tři dřevěné sloupy vystavené teplotám až 850 °C. V návaznosti na experiment byl proveden výpočet pomocí pravděpodobnostního přístupu zohledňující různé vlastnosti dřeva a jevy, které mohly ovlivnit výslednou velikost zuhelnatělé vrstvy s navazující analýzou hodnot srovnávající vypočtené hodnoty s hodnotami získanými experimentálně. Třetí částí diplomové práce je parametrická studie, kde byl pomocí výpočetního modelu založeném na pravděpodobnostním přístupu zkoumán především vliv různých průběhů a intenzit požáru na zuhelnatělou vrstvu dřeva.

Klíčová slova

dřevo; zuhelnatělá vrstva; pravděpodobnostní přístup; požár; Room Corner Test

Abstract

The diploma thesis is focused on the prediction of char depth of timber members using probabilistic approach. The char layer has good insulating properties, prevents heat transfer to heat-degraded timber members, and contributes directly to the fire resistance of timber members. The first part of the diploma thesis summarises the properties of wood at elevated temperatures and methods for determining the charred wood layer. The second part deals with the description of an experiment performed in the Room Corner Test, where three wooden columns exposed to temperatures up to 850 °C were investigated. Following the experiment, a calculation was performed using a probabilistic approach taking into account various wood properties and phenomena that could affect the resulting size of the charred layer with a subsequent analysis of the values comparing the calculated values with those obtained experimentally. The third part of the thesis is a parametric study, where the influence of different fire scenarios on the charred wood layer was investigated using a computational model based on a probabilistic approach.

Keywords

wood; char layer; probabilistic approaches; fire; Room Corner Test

1 Úvod a motivace

V posledních letech se výrazně zvýšilo používání dřeva pro stavební účely. Dřevo je udržitelný, obnovitelný, přírodní materiál šetrný k životnímu prostředí. Po dřevu se zvětšuje poptávka, začíná se ve stavebnictví více využívat a je tedy potřeba zajistit potřebnou požární odolnost. Jeden z největších problémů pro určení požadované požární odolnosti dřeva je výpočet hloubky zuhelnatění prvku vystaveného požáru.

Rychlost zuhelnatění není během požáru konstantní. V závislosti na intenzitě požáru dochází ke zvětšení nebo zmenšení zbytkového průřezu dřevěného prvku. Předpověď vývoje hloubky zuhelnatění při vystavení prvku přirozenému požáru, jehož intenzita se může během jeho průběhu zvyšovat či snižovat, by vedla ke zpřesnění návrhu dřevěných konstrukcí. Pokud by došlo ke zvětšení zbytkového průřezu, tak by stavba byla ekonomicky výhodnější a v druhém případě by stavba byla bezpečnější z hlediska požární bezpečnosti. Pro zpřesnění výpočtu je nutné využít pravděpodobnostní přístup. Pravděpodobnostní přístup je také nutný, pokud chceme do výpočtu zahrnout více neznámých, které ovlivňují výslednou hodnotu hloubky zuhelnatělé vrstvy.

Pro stanovení vývoje zuhelnatělé vrstvy ve dřevěném prvku vystaveném požáru je možné využít mnoho výpočetních postupů, a to od zjednodušených metod s lineárním či nelineárním průběhem až po metody pravděpodobnostně zohledňující široký rozsah vlastností dřeva [1]. Tyto metody jsou nejčastěji odvozeny, a jsou proto platné, pro vystavení dřevěného prvku normovému požáru. Při skutečném požáru v budovách jsou ale dřevěné prvky vystaveny přirozenému požáru, jehož průběh závisí na podmínkách daného požárního úseku, může být zcela odlišný od normového požáru. Přirozený požár tak může způsobit odlišný vývoj zuhelnatělé vrstvy dřeva, než je uvažováno při normovém požáru.

Ve zjednodušených výpočetních přístupech nelze rovněž zohlednit opětovné rozhoření dřeva od žhnutí dřeva, změnu procenta kyslíku ve vzduchu nebo vlhkost dřeva. V praxi se nejčastěji využívá lineární postup. Je to zjednodušený způsob a nelze tyto způsoby využívat při zohlednění více neznámých při výpočtu. Pro výpočet hloubky zuhelnatění dřeva zohledňující jeho heterogenní vlastnosti podrobnějším postupem je potřebný pravděpodobnostní přístup [2]. Jelikož je hloubka zuhelnatění nejdůležitějším parametrem pro výpočet požární odolnosti prvku, její zpřesnění umožní přesnější předpověď hloubky zuhelnatění dřeva vystaveného přirozenému požáru a tím i přesnější požární odolnost prvku.

Cílem této diplomové práce je analyzovat způsoby výpočtu zuhelnatění dřeva, navrhnout výpočetní postup založený na pravděpodobnostním přístupu a následně navržený postup porovnat s výsledky vlastních požárních experimentů. Dalším cílem práce, který je součástí parametrické

studie, je ověřit vliv intenzity požáru a vlhkosti na zuhelnatělou vrstvu pomocí postupu založeném na pravděpodobnostním přístupu.

2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je zpřesnit předpověď vývoje zuhelnatělé vrstvy dřeva a ověřit rovnice pro stanovení zuhelnatělé vrstvy dřeva dle Hietaniemiho [3].

Pro splnění hlavního cíle byly stanoveny následující dílčí cíle:

1. rešerše a analýza současného stavu poznání,
2. realizace vlastního experimentálního měření,
3. analýza vlastních experimentálních dat,
4. provedení a naprogramování výpočtu pro určení hloubky zuhelnatění,
5. porovnání výsledků z výpočtu a experimentu,
6. provedení parametrické studie.

3 Současný stav poznání

3.1 Dřevo

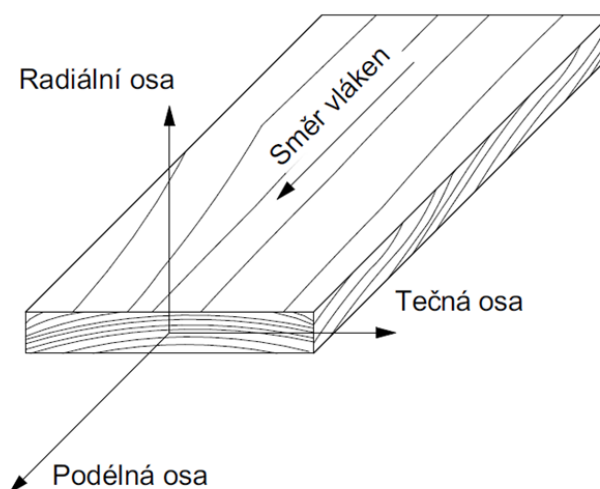
Dřevo je obnovitelný materiál. Ve stavebnictví se využívá již po staletí a udržuje si svou popularitu z dobrých důvodů. Jedním z těchto důvodů je jeho obnovitelný charakter, což znamená, že pokud se těží s ohledem na udržitelnost, může být ekologicky šetrným stavebním materiálem. Dřevo je navíc pevný a odolný materiál, který má ve stavebnictví širokou škálu využití.

3.1.1 Složení dřeva

Dřevo je organický, nehomogenní, ortotropní a hydroskopický materiál. Z hlediska chemického složení se dřevo skládá z několika základních prvků, přičemž hlavními jsou uhlík (cca 50 %), kyslík (43 %), vodík (6 %) a dusík (0,3 %). Dřevo obsahuje také různé minerální látky, jako je draslík, sodík a vápník. Tyto prvky vytvářejí dále řadu organických látek, mezi nimiž jsou i tři hlavní složky dřeva (celulóza, lignin, hemicelulóza). [4, 5]

Celulóza je tvořena molekulami glukózy a tvoří přibližně 40-50 % celkové hmotnosti dřeva. Ostatní cukry se spojují do hemicelulózy. Na rozdíl od celulózy je lignin vysokomolekulárním polymerem s podobností fenolu. Jeho role v dřevě je často popisována jako lepidlo, které spojuje buněčné stěny dohromady. [1]

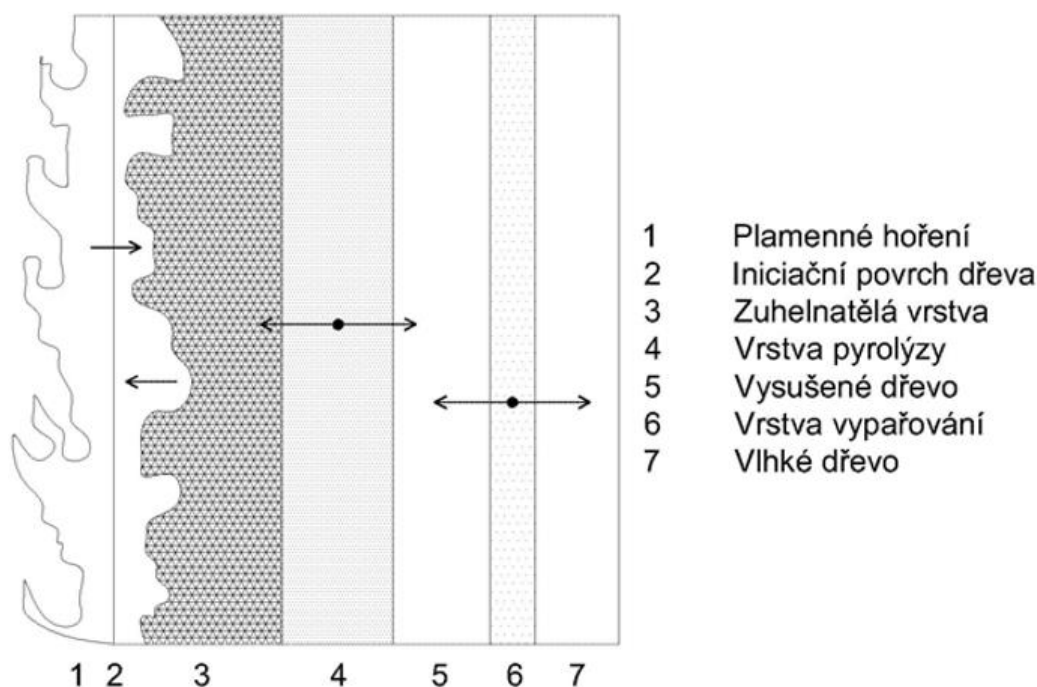
Vlastnosti dřeva se liší ve směru tří hlavních os, díky tomu, že se jedná o ortotropní materiál. Tři hlavní osy se dělí na podélné, radiální a tečné. Podélná osa (označovaná jako L) je rovnoběžná na vlákna. Radiální osa (R) je kolmá na letokruhy. Tangenciální osa (T) je kolmá na vlákna, ale tečna k letokruhům. Tyto osy jsou zobrazeny na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Tři hlavní osy dřeva vzhledem ke směrům vláken a letokruhům [1]

3.2 Vlastnosti dřeva za zvýšených teplot

Vlastnosti nejen dřeva, ale všech stavebních materiálů závisí na okolní teplotě. Změny vlastností se projevují v materiálových modelech. Změny původních hodnot lze vyjádřit funkcemi. Změny vybraných mechanických a tepelných vlastností dřeva v závislosti na teplotě jsou uvedeny v ČSN EN 1995-1-2 [6]. Dřevo se při požáru dělí do různých charakteristických vrstev, viz Obr. 3.2.



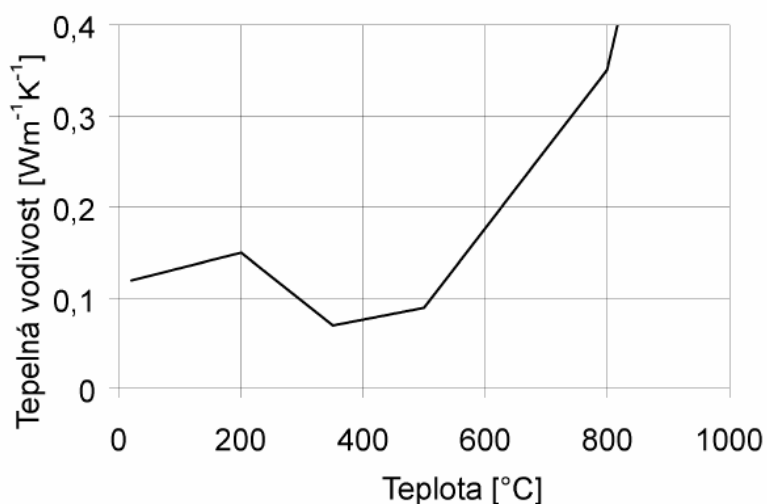
Obr. 3.2 Charakteristické vrstvy dřeva při požáru [7]

3.2.1 Tepelně technické vlastnosti

3.2.1.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je charakterizována pomocí součinitele tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti definován jako podíl hustoty tepelného toku a gradientu termodynamické teploty majícího stejný směr jako směr toku tepla [8]. Součinitel tepelné vodivosti závisí na obsahu vlhkosti, teplotě, hustotě, atd. [1].

Součinitel tepelné vodivosti se měří v ustáleném a neustáleném stavu pro pevné látky. Metoda neustáleného stavu je rychlejší, ale je méně přesná než metoda ustáleného stavu. Součinitel tepelné vodivosti je ovlivněn zuhelnatěním dřeva a ubývající vlhkostí. Průběh součinitele tepelné vodivosti lze popsat dvěma způsoby. Prvním z těchto způsobů je změna v závislosti na rostoucí teplotě. Tento vztah je uveden v Příloze B ČSN EN 1995-1-2 [6], kdy je předpokládána unifikace dřeva (viz Obr. 3.3 a Tab. 3.1). Tento způsob byl popsán autory Knudson a Schniewind [9]. Druhou metodou je zjednodušený přístup založený na dřívějších experimentech a vlastnostech materiálu.



Obr. 3.3: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu [6]

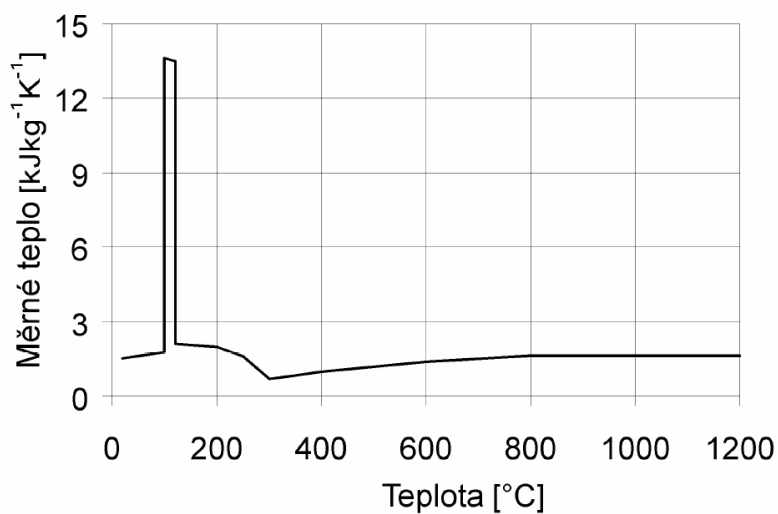
Tab. 3.1: Vztah teploty a tepelné vodivosti pro dřevo a zuhelnatělou vrstvu [6]

Teplota °C	Tepelná vodivost Wm ⁻¹ K ⁻¹
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

3.2.1.2 Měrné teplo

Zjednodušeně lze říci, že měrné teplo materiálů je definované jako množství tepla potřebné pro zvýšení 1 kilogramu látky o 1 Kelvin za konstantního tlaku. U materiálů, kde probíhají fázové přeměny při určité teplotě, se vyjadřuje měrné teplo jako součet vlastního měrného tepla a skupenského tepla potřebného pro zvýšení teploty 1 kilogramu o 1 Kelvin. Měrné teplo je měřeno pomocí diferenční skenovací kalorimetrie [7].

Průběh změny měrného tepla je ovlivněn především vlhkostí dřeva. Na Obr. 3.4 a v Tab. 3.2 je možné vidět průběh měrného tepla v závislosti na teplotě. V rozmezí 100-120 °C je vidět nejprve vysoký nárůst měrného tepla a následně pokles. Tento jev je způsoben přeměnou vlhkosti na vodní páru. Tento průběh je možné pozorovat také v betonových konstrukcích, kde se vázaná voda mění na vodní páru.



Obr. 3.4: Vztah teploty a měrného tepla pro dřevo a dřevěné uhlí [6]

Tab. 3.2: Vztah teploty a měrného tepla pro dřevo a dřevěné uhlí [6]

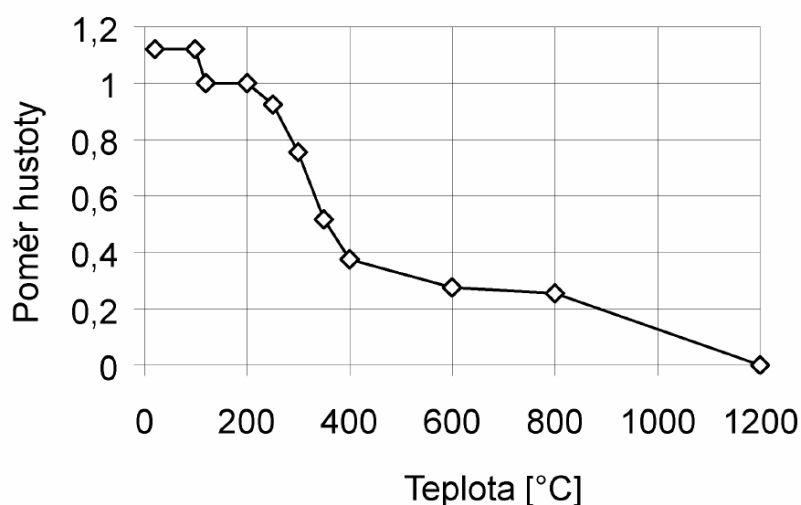
Teplota °C	Měrné teplo kJkg ⁻¹ K ⁻¹
20	1,53
99	1,77
99	13,60
120	13,50
120	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

3.2.1.3 Objemová hmotnost

Objemovou hmotnost materiálu lze definovat jako hmotnost materiálu v jednotce objemu. Objemová hmotnost se liší pro druh dřeva a množství vlhkosti, proto je vždy udávána i s vlhkostí. Charakteristické a průměrné hodnoty objemové hmotnosti dřeva jsou uvedeny v ČSN EN 338 [7, 10].

Objemová hmotnost dřeva se mění uvolněním obsažených těkavých látek, roztažností a objemovými dilatacemi. Objem i hmotnost se mění zahříváním. Hmotnostní změny se určují termo-gravimetrickou analýzou a objemové změny se určují dilatometrickou analýzou [7].

Na Obr. 3.5 lze vypozorovat, že největší změna objemové hmotnosti nastává v teplotách okolo 220-320 °C. Toto je způsobeno tepelnou degradací, při níž se surové dřevo přeměňuje na zuhelnatělou vrstvu. Jelikož zuhelnatělá vrstva slouží jako izolant a ochrana nezasaženého dřeva, tak v této fázi, kdy se na prvku zuhelnatělá vrstva nevyskytuje, odhořívá surové dřevo nejvíce. Díky zuhelnatělé vrstvě dochází při vyšších teplotách k pomalejšímu úbytku objemové hmotnosti. Následně při teplotě dřeva 800 °C nastává další zlom, jelikož se zuhelnatělá vrstva považuje za téměř nulovou. Vývoj objemové hmotnosti v závislosti na teplotě a vlhkosti je zobrazen v Tab. 3.3.



Obr. 3.5 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin při počáteční vlhkosti 12 % [6]

Tab. 3.3 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin

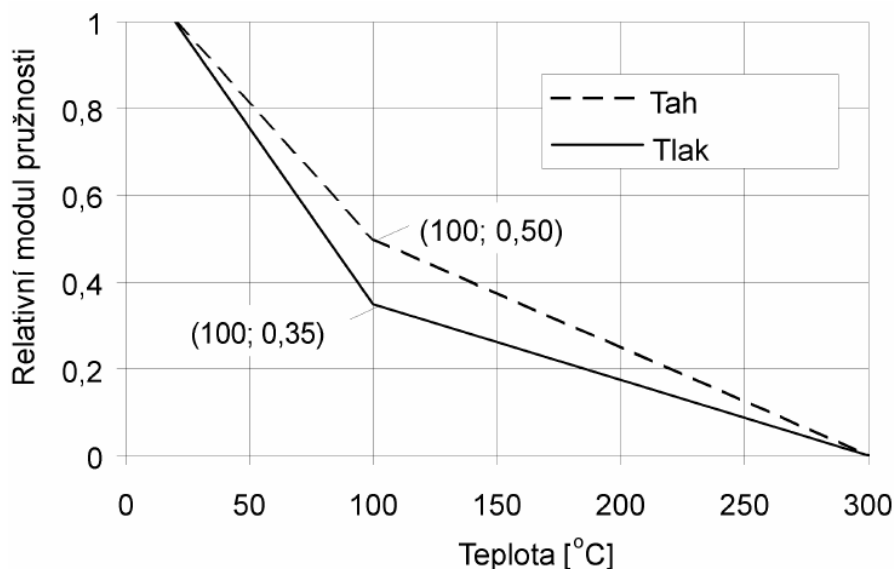
Teplota °C	Poměr hustoty
20	$(1 + \omega)$
99	$(1 + \omega)$
120	$(1 + \omega)$
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00
ω je vlhkost dřeva	

3.2.2 Mechanické vlastnosti

3.2.2.1 Modul pružnosti

Ve dřevě lze definovat tři moduly pružnosti (E_L , E_R , E_T), což je způsobené tím, že se jedná o ortotropní materiál. Moduly pružnosti se liší v závislosti na směru vláken. Modul pružnosti kolmo na vlákna je nižší než modul pružnosti rovnoběžně s vlákny ($E_L > E_T$). [1]

Vývoj modulu pružnosti za požáru se tedy zohledňuje součiniteli, které jsou uvedené ČSN EN 1995-1-2 [6]. Z Obr. 3.6 je zřejmé, že pokles modulu pružnosti v tlaku je 1,4krát rychlejší než pokles modulu pružnosti v tahu.



Obr. 3.6: Účinek teploty na modul pružnosti rovnoběžně s vlákny u dřeva jehličnatých dřevin [6]

3.2.3 Zuhelnatělá vrstva

Jedná se o vrstvu dřeva, která se vlivem tepelné degradace mění ze surového dřeva na zuhelnatělou vrstvu a má odlišné fyzikálně mechanické vlastnosti. Zuhelnatělá vrstva snižuje mechanické vlastnosti dřeva, ale zároveň při požáru funguje jako izolant a snižuje účinky teplot na surové dřevo a tím napomáhá k pomalejšímu odhořívání. Zuhelnatělá vrstva vzniká také u chráněných prvků, ale proces zuhelnatění probíhá značně pomaleji [4, 7, 11].

Hloubka zuhelnatění, je dle normy ČSN EN 1995-1-2 [6] definována jako vzdálenost mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění. Hloubka zuhelnatění slouží především ke stanovení skutečné požární odolnosti dřevěného prvku.

Pro možné stanovení vývoje zuhelnatělé vrstvy je možné využít mnoho výpočetních postupů, a to od zjednodušených s lineárním průběhem, nelineární nebo se zohledněním pravděpodobnostních rozsahů vlastností dřeva [1], nejčastěji využívající vystavení normovému požáru. Ve zjednodušených přístupech nelze zohlednit opětovné rozhoření dřeva od žhnutí dřeva, změnu procenta kyslíku ve vzduchu nebo vlhkost dřeva. Do zjednodušených metod je řazeno například stanovení hloubky zuhelnatění pomocí rychlosti zuhelnatění, která vyjadřuje vývoj hloubky zuhelnatění v čase. Do zjednodušených metod je také zařazeno nelineární průběh rychlosti zuhelnatění. Pokročilé metody představují numerické simulace a tyto metody jsou závislé na více faktorech, dále do nich patří výpočty se zohledněním pravděpodobnostních rozsahů vlastností dřeva.

3.2.4 Pyrolýza

Pyrolýza je v podstatě tepelný rozklad organických látek za omezeného přístupu kyslíku nebo v inertní atmosféře, což je stav bez přístupu kyslíku. Inertní atmosféra, či omezený přístup kyslíku

do surového dřeva je způsobeno díky zuhelnatělé vrstvě. Zuhelnatělá vrstva zabraňuje plamenému hoření dřeva a izoluje teplotní účinky na dřevo. Pyrolýza dřeva je obvykle zahájena při teplotě 200 °C a končí při 450-500 °C, v závislosti na druhu dřeva. Pyrolýza hraje velmi důležitou roli při spalování dřeva. Pyrolytický rozklad dřeva zahrnuje složitou řadu reakcí, a proto velmi ovlivňuje teplotu uvnitř dřevěného prvku. Chemický průběh je také výrazně ovlivněn složením dřeva. Suché dřevo je tvořeno téměř 77 % těkavých látek z jeho hmotnosti [12].

Pyrolýzu dřeva je složité zahrnout do výpočetních modelů. Lze ji v modelech definovat pomocí tzv. kinetických parametrů E_j , A_j , n_j . Kinetické parametry se dají získat spálením vzorků dřeva v kónickém kalorimetru. Rovnice 3.1 zohledňuje pyrolýzu a je možné ji aplikovat do výpočetních modelů [7, 13].

$$r_{tj} = \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s,0}} \right)^{n_{s,j}} A_j e^{-\frac{E_j}{RT_s}} \quad (3.1)$$

kde:

r_{tj}	je rychlost j-té reakce,
$\rho_{s,i}$	objemová hmotnost dřeva při dané teplotě [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
$\rho_{s,0}$	objemová hmotnost dřeva při teplotě 20 °C [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
$n_{s,j}$	řád reakce,
A_j	před exponenciální faktor [l/s],
E_j	aktivační energie [j/mol],
R	plynová univerzální konstanta,
T_s	teplota povrchu dřeva.

Při výpočtu je nutné zvolit vhodné kinetické součinitele, schéma pyrolýzy a poměr fiktivních složek. U každého druhu dřeva je rozdělení koeficientů rozdílné a při výběru vhodných kinetických součinitelů je potřebné provést citlivostní analýzu. Například X. Wang [14] definoval schéma a koeficienty (Tab. 3.4) pyrolýzy následovně:

1. reakce: Celulóza → zuhelnatělý zbytek
2. reakce: Hemicelulóza → zuhelnatělý zbytek
3. reakce: Lignin → zuhelnatělý zbytek

Tab. 3.4: Kinetické koeficienty dle X. Wang [14]

Fiktivní složka	A_i	E_i	n_i	$\rho_{i,0}/\rho_0$
smrk	l/s	kJ/mol	-	-
Celulóza	3,36E+11	187	0,9	0,40
Hemicelulóza	1,54E+11	141	1,5	0,37
lignin	2,14E+10	119	4,4	0,13

3.3 Rychlost zuhelnatění

3.3.1 Zjednodušené postupy stanovení rychlosti zuhelnatění

3.3.1.1 Normová metoda pro normový požár

Pro nechráněné povrchy během doby vystavení účinkům požáru norma ČSN EN 1995-1-2 [6] uvádí hodnoty rychlosti zuhelnatění β pro různé druhy dřeva. V normě jsou uváděny dvě rychlosti zuhelnatění β_0 a β_n a to pro 1D vedení tepla, nebo pro případ, kdy je potřeba zohlednit vliv zaoblení rohů. Hodnoty uvedené v Tab. 3.5 jsou určeny pouze pro vystavení účinkům normového požáru. Tepelné vlastnosti dřeva se kterými počítá norma ČSN EN 1995-1-2 [6] jsou určeny pro dřevo s vlhkostí 12 %.

Tab. 3.5: Návrhové rychlosti zuhelnatění β_0 a β_n uvedené v ČSN EN 1995-1-2 [6]

	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).		

Jednorozměrná rychlost zuhelnatění β_0 [mm/min] se používá pro 1D vedení tepla. Rychlost se má uvažovat neměnná v čase a lze ji použít u prvků, které splní podmínku $b \geq b_{\min}$ [6] nebo u prvků u kterých se nevyskytují rohy. Podmínka $b \geq b_{\min}$ znamená, že nejmenší šířka průřezu musí být rovno nebo větší než hodnota b_{\min} . [6]. Pro výpočet hloubky zuhelnatění sloupů nebo nosníků norma doporučuje zohlednit vliv zaoblení rohů a trhlin. Vliv zaoblení rohů a trhlin je zahrnut v nominální rychlosti zuhelnatění β_n [mm/min], která se má uvažovat konstantní v čase. I když je zahrnut vliv zaoblení rohů, tak průřez zůstává obdélníkový a není nutné počítat poloměr zaoblení. Nominální rychlost zuhelnatění dosahuje vyšších hodnot než jednorozměrná rychlost zuhelnatění.

Hloubku zuhelnatění dle této metody lze získat lineárním vzorcem, kde se vynásobí rychlost zuhelnatění β_0 (popř. β_n) a čas t , za který je zpravidla dosazováno čas požadované požární odolnosti. Rychlost zuhelnatění je po celou dobu uvažována konstantní. Dle této normy se hloubka zuhelnatění označuje d_{char} a obecný vztah pro výpočet je znázorněn v rovnici 3.2. Pro výpočet jednorozměrného zuhelnatění je počítána hloubka zuhelnatění dle rovnice 3.3. Při zohlednění vlivu zaoblení rohů a trhlin je hloubka zuhelnatění počítána dle rovnice 3.4.

$$d_{char} = \beta t \quad (3.2)$$

kde:

d_{char} je hloubka zuhelnatělé vrstvy [mm], používáno dle ČSN EN 1995-1-2,
 t čas [min],
 β rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$].

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (3.3)$$

kde:

$d_{char,0}$ je hloubka zuhelnatělé vrstvy pro jednorozměrné zuhelnatění [mm],
 t čas [min],
 β_0 jednorozměrná rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$].

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (3.4)$$

kde:

$d_{char,n}$ je hloubka zuhelnatělé vrstvy se zohledněním zaoblení rohu a trhlin [mm],
 t čas [min],
 β_n nominální rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$].

Hodnoty uvedené v Tab. 3.5 platí pouze pro desky, které mají charakteristickou hustotu $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$ a tloušťku desky 20 mm. Pokud se jedná o desku, která nesplňuje podmínky, tak je nutné přepočítat rychlost zuhelnatění $\beta_{0,\rho,t}$ pomocí součinitelů k_ρ a k_h . Součinitel k_ρ je popsán v rovnici 3.6 a zohledňuje vliv hustoty desky. Součinitel k_h je znázorněn v rovnici 3.7 a zohledňuje tloušťku desky.

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (3.5)$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (3.6)$$

$$k_t = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (3.7)$$

kde:

- β_0 je jednorozměrná rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$],
 ρ_k charakteristická objemová hmotnost dřeva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 h_p tloušťka desky [mm].

3.3.1.2 Úprava rychlosti zuhelnatění dle vlhkosti dřeva a objemové hmotnosti

Norma ČSN EN 1995-1-2 používá tepelné vlastnosti určené pro vlhkost 12 %. Paulo B. Cachim a Jean-Marc Franssen [15] upravili rychlost zuhelnatění, kdy je možné zohlednit vlhkost a hustotu dřeva. Rychlost zuhelnatění při zohlednění dané vlhkosti a hustoty surového dřeva se stanoví dle rovnice 3.8.

$$\beta_{\omega,\rho,0} = \beta_0 \left(\frac{1,12}{1 + \omega} \right)^{1,5} \sqrt{\frac{450}{\rho_0}} \quad (3.8)$$

kde:

- $\beta_{\omega,\rho,0}$ je rychlost zuhelnatění zohledňující vlhkost dřeva a jeho hustotu [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$],
 ω vlhkost dřeva,
 ρ_0 hustota surového dřeva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

3.3.1.3 Normová metoda pro parametrický požár

V příloze A normy ČSN EN 1995-1-2 [6] je definován vztah mezi rychlostí zuhelnatění β a časem t pro nechráněné dřevo jehličnatých dřevin vystavených účinkům požáru podle metody součinitelů otvorů s použitím parametrických křivek. Vztah mezi rychlostí zuhelnatění a časem je popsán na Obr. 3.7. Z Obr. 3.7 je patrné, že rychlost zuhelnatění β je v úvodní fázi požáru konstantní do času t_0 , následně začíná lineárně klesat v závislosti na čase.

Rychlost zuhelnatění β_{par} zohledňuje parametry požárního úseku, kdy je přepočtena normová rychlost zuhelnatění β pomocí součinitele otvorů. Dle Hopkin a kol. [16] lze rovnici pro β_{par} použít pro nominální i jednorozměrnou rychlost zuhelnatění. Platí pro ně stejná pravidla, jako pro normový požár. Rychlost zuhelnatění β_{par} dřeva se určí podle rovnice 3.9.

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08} \quad (3.9)$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad (3.10)$$

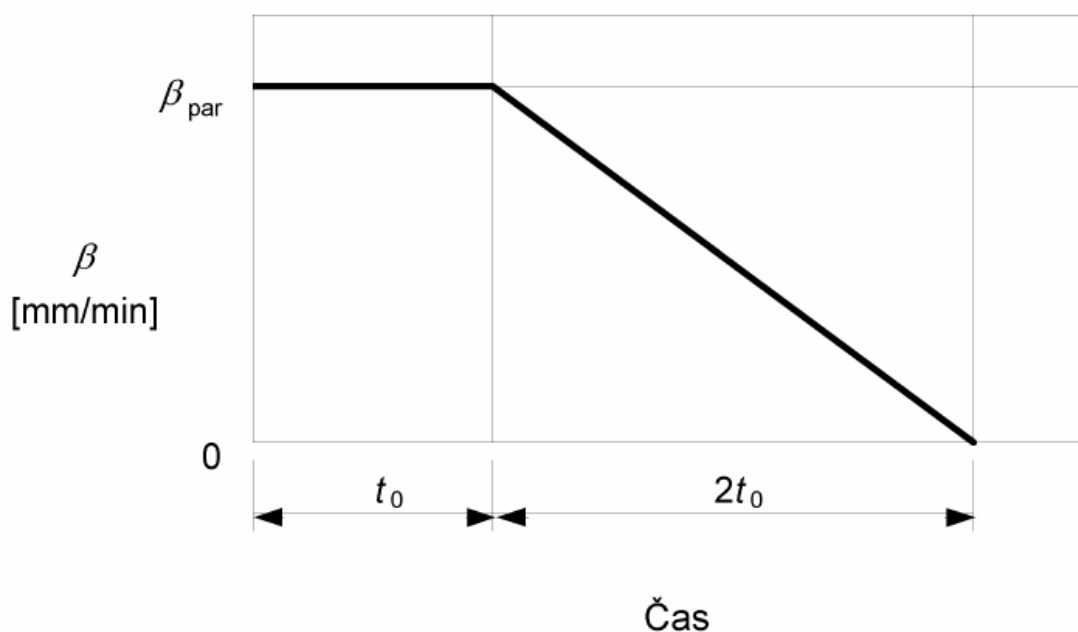
$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}} \quad (3.11)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (3.12)$$

$$h_{eq} = \sum \frac{A_i h_i}{A} \quad (3.13)$$

kde:

O	je	součinitel otvorů [$m^{0,5}$],
β_n		nominální rychlost zuhelnatění [$mm \cdot min^{-1}$],
A_v		celková plocha otvorů ve svislých ohraničeních požárního úseku [m^2],
A_t		celková plocha stropů, stěn a podhledů, které obklopují požární úsek [m^2],
A_i		plocha svislých i-tých otvorů [m^2],
h_{eq}		vážený průměr výšek svislých otvorů [m],
h_i		výška svislého i-tého otvoru [m],
Γ		součinitel uvažovaný pro tepelné vlastnosti ohraničení požárního úseku,
b		pohltivost pro celé ohraničující konstrukce, viz ČSN EN 1991-1-2, Příloha A [17],
λ		tepelná vodivost ohraničení požárního úseku [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],
ρ		objemová hmotnost ohraničení požárního úseku [$kg \cdot m^{-3}$],
c		měrné teplo ohraničení požárního úseku [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].



Obr. 3.7: Rychlost zuhelnatění β v závislosti na čase t pro parametrický požár [6]

Hloubka zuhelnatění d_{char} se pro parametrický požár vypočte pomocí rychlosti zuhelnatění β_{par} podle rovnic 3.14, 3.15 a 3.16. Hloubka zuhelnatění je stanovena ve 3 časových úsecích:

pro $t \leq t_0$

$$d_{char} = \beta_{par} t \quad (3.14)$$

pro $t_0 \leq t \leq 3t_0$

$$d_{char} = \beta_{par} \left(1,5t_0 - \left(\frac{t^2}{4t_0} \right) - \frac{t_0}{4} \right) \quad (3.15)$$

pro $3t_0 \leq t \leq 5t_0$

$$d_{char} = 2\beta_{par} t_0 \quad (3.16)$$

kde

$$t_0 = 0,009 \frac{q_{t,d}}{O} \quad (3.17)$$

kde:

$q_{t,d}$ je návrhová hustota požárního zatížení vztážená na celkovou plochu stropů, stěn a podhledů, které obklopují PÚ, viz ČSN EN 1991-1-2 [17] [$\text{MJ}\cdot\text{m}^2$],

t_0 časové období s konstantní rychlostí zuhelnatění [min].

Dané vztahy lze použít pouze pro:

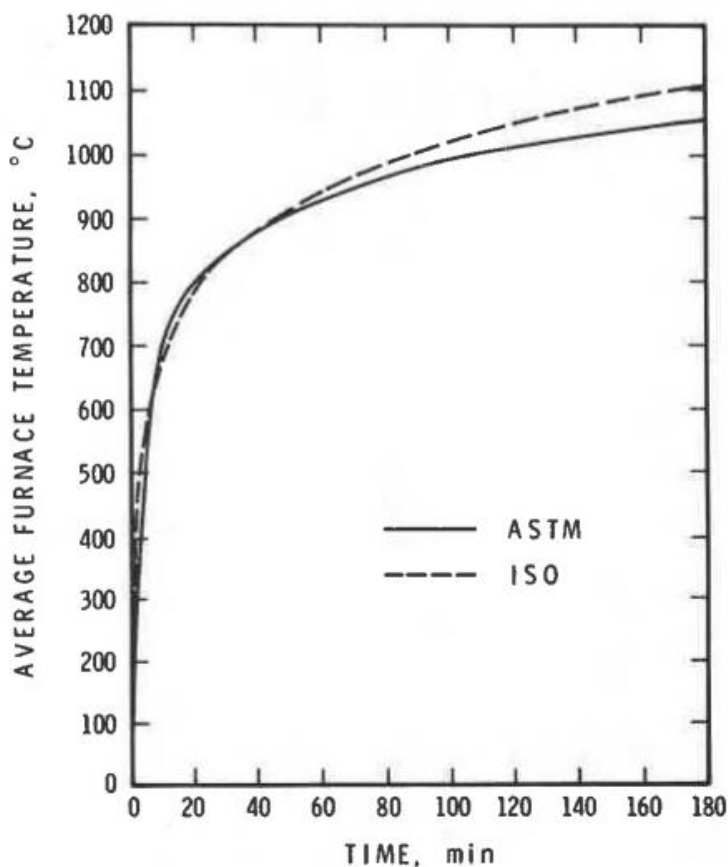
- $t_0 \leq 40$ min,
- $d_{\text{char}} \leq b/4$,
- $d_{\text{char}} \leq h/4$.

Dále musí být dodrženy podmínky pro parametry požárního úseku při výpočtu parametrického požáru uvedené v ČSN EN 1991-1-2 [17]. Těmito podmínkami jsou:

- $S \geq 500$ m²,
- $h \geq 4$ m,
- $100 \leq b \leq 2\,200$,
- $0,02 \leq O \leq 0,20$.

3.3.1.4 Metoda při vystavení křivce ASTM E 119 (USA)

V USA se oproti evropským postupům používá jiné značení a jiná normová teplotní křivka. Pro výpočty v USA je používána teplotní křivka podle normy ASTM E 119, která je velmi podobná evropské normové křivce ISO 834, viz Obr. 3.8. Základní vzorec pro výpočet hloubky zuhelnatění je založen na stejném principu (rovnice 3.18), jako vzorec evropský, ale liší se v definovaných hodnotách rychlosti zuhelnatění. Dále není uvažováno s vlhkostí 12 %, ale s vlhkostí 8-9 % [1].



Obr. 3.8: Porovnání normových křivek ISO 834 a ASTM E 119, graf závislosti teploty na čase [18]

$$t = Cx_c \quad (3.18)$$

kde:

x_c je hloubka zuhelnatělé vrstvy [mm],

t čas [min],

C rychlost zuhelnatění [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$].

Rychlost zuhelnatění je definována v Tab. 3.6. Dále je možnost pro dřeva, jako jsou douglaska tisolistá, borovice a dub bílý vypočítat rychlost zuhelnatění s ohledem na vlhkost a hustotu daného dřeva. Rychlost zuhelnatění pro tyto typy dřevin jsou uvedené v rovnicích 3.19, 3.20, 3.21.

$$C = (0,002269 + 0,00457\mu)\rho + 0,331 \text{ (Douglaska tisolistá)} \quad (3.19)$$

$$C = (0,000461 + 0,00095\mu)\rho + 1,016 \text{ (Borovice)} \quad (3.20)$$

$$C = (0,001583 + 0,00318\mu)\rho + 0,594 \text{ (Dub bílý)} \quad (3.21)$$

kde:

 C je rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$], μ vlhkost dřeva, ρ hustota dřeva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

Tab. 3.6: Charakteristické vlastnosti dřeva pro výpočty dle křivky ASTM E 119 [1]

Species	Density ^c (kg m^{-3})	Wood exposed to a constant heat flux ^o									
		Wood exposed to ASTM E 119 exposure ^a				Linear charring rate ^e (min mm^{-1})		Thermal penetration depth d^g (mm)		Average mass loss rate ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
		Char con- traction factor ^d	Linear charring rate ^e (min mm^{-1})	Non- linear charring rate ^f ($\text{min mm}^{-1,23}$)	Thermal penetra- tion depth ^g (mm)	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux	18- kW m^{-2} heat flux	55- kW m^{-2} heat flux
Softwoods											
Southern Pine	509	0.60	1.24	0.56	33	2.27	1.17	38	26.5	3.8	8.6
Western redcedar	310	0.83	1.22	0.56	33	—	—	—	—	—	—
Redwood	343	0.86	1.28	0.58	35	1.68	0.98	36.5	24.9	2.9	6.0
Engelmann spruce	425	0.82	1.56	0.70	34	—	—	—	—	—	—
Hardwoods											
Basswood	399	0.52	1.06	0.48	32	1.32	0.76	38.2	22.1	4.5	9.3
Maple, hard	691	0.59	1.46	0.66	31	—	—	—	—	—	—
Oak, red	664	0.70	1.59	0.72	32	2.56	1.38	27.7	27.0	4.1	9.6
Yellow-poplar	504	0.67	1.36	0.61	32	—	—	—	—	—	—

^aMoisture contents of 8% to 9%.^bCharring rate and average mass loss rate obtained using ASTM E 906 heat release apparatus. Test durations were 50 to 98 min for 18-kW m^{-2} heat flux and 30 to 53 min for 55-kW m^{-2} heat flux. Charring rate based on temperature criterion of 300 °C and linear model. Mass loss rate based on initial and final weight of sample, which includes moisture driven from the wood. Initial average moisture content of 8% to 9%.^cBased on weight and volume of oven-dried wood.^dThickness of char layer at end of fire exposure divided by original thickness of charred wood layer (char depth).^eBased on temperature criterion of 288 °C and linear model.^fBased on temperature criterion of 288 °C and nonlinear model of Equation (18–3).^gAs defined in Equation (18–6). Not sensitive to moisture content.

3.3.1.5 Nelineární model rychlosti odhořívání

Další možnost výpočtu hloubky zuhelnatělé vrstvy je pomocí nelineárního modelu rychlosti odhořívání. V nelineárním modelu pro výpočet hloubky zuhelnatění (rovnice 3.22) je zahrnut čas t a koeficient rychlosti zuhelnatění m . Hodnoty pro výpočet koeficientu rychlosti zuhelnatění se převezmou v Tab. 3.6, kde jsou hodnoty definovány pro 8 druhů dřeva.

$$t = mx_c^{1,23} \quad (3.22)$$

$$m = -0,147 + 0,000564\rho + 1,21\mu + 0,532f_c \quad (3.23)$$

kde:

 x_c je hloubka zuhelnatělé vrstvy [mm],

t	čas [min],
m	koeficient rychlosti zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1,23}$], viz (3.23),
μ	vlhkost dřeva,
ρ	hustota dřeva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
f_c	kontrakční faktor zuhelnatělé vrstvy, viz tabulka 2-2.

3.3.1.6 Metoda izotermie 300 °C pomocí analytického výpočtu

Teplota pod zuhelnatělou vrstvou je předpokládána 288–300 °C. Ve vzdálenosti 6–7 mm od této hranice je uvažována teplota 180 °C díky izolačním vlastnostem zuhelnatělé vrstvy. Rozložení teplot v průřezu je možné stanovit z obecné rovnice 3.24 [11]. Hranice zuhelnatělé vrstvy je možné stanovit pomocí metody izotermie 300 °C, za použití rovnice 3.25 [1].

$$T = T_i + (T_p - T_i)\left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 \quad (3.24)$$

$$T = T_i + (300 - T_i)\left(1 - \frac{x}{d}\right)^2 \quad (3.25)$$

kde:

T	je	teplota [°C],
T_i		počáteční teplota zkoumané vrstvy [°C],
T_p		teplota povrchu [°C],
x		vzdálenost od zuhelnatělé vrstvy [mm],
a		referenční hloubka zuhelnatělé vrstvy [mm],
d		hloubka tepelného průniku [mm].

3.3.2 Pokročilé metody stanovení rychlosti zuhelnatění

3.3.2.1 Metoda stanovení rychlosti zuhelnatění dle Mikkoly a Hietaniemi

Mikkola [19] definoval rovnice pro rychlost zuhelnatění, kterými lze zohlednit rozdílný tepelný tok, vlhkost, či měrnou tepelnou kapacitu dřeva. Výpočet rychlosti zuhelnatění (rovnice 3.26) lze využít na veškeré průběhy požáru, kdy je nutností pouze znalost tepelného toku.

$$\beta = \frac{q_e - q_L}{\rho \{c_o(T_p - T_0) + L_v + [(c_w - c_{o1})(T_v - T_0) + L_{v,w}]w\}} \quad (3.26)$$

kde:

β	je rychlost zuhelnatění [mm·min ⁻¹],
q_e	tepelný tok na jednotku plochy, složený z tepelného toku radiace a konvekce [kW·m ⁻²],
q_L	ztráta tepelného toku na povrchu zuhelnatělé vrstvy [kW·m ⁻²],
ρ	hustota dřeva [kg·m ⁻³],
c_o	měrná tepelná kapacita dřeva při teplotách mezi T_0 a T_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹],
c_w	měrná tepelná kapacita odpařování vody [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹],
$c_{o,1}$	měrná tepelná kapacita suchého dřeva při teplotách mezi T_0 a T_v [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹],
T_p	průměrná teplota vrstvy pyrolýzy [°C],
T_0	teplota počáteční [°C],
T_p	teplota odpařování vody [°C],
L_v	měrné teplo odpařování suchého dřeva [J·kg ⁻¹],
$L_{v,w}$	měrné teplo odpařování vody [J·kg ⁻¹],
ω	vlhkost dřeva [%].

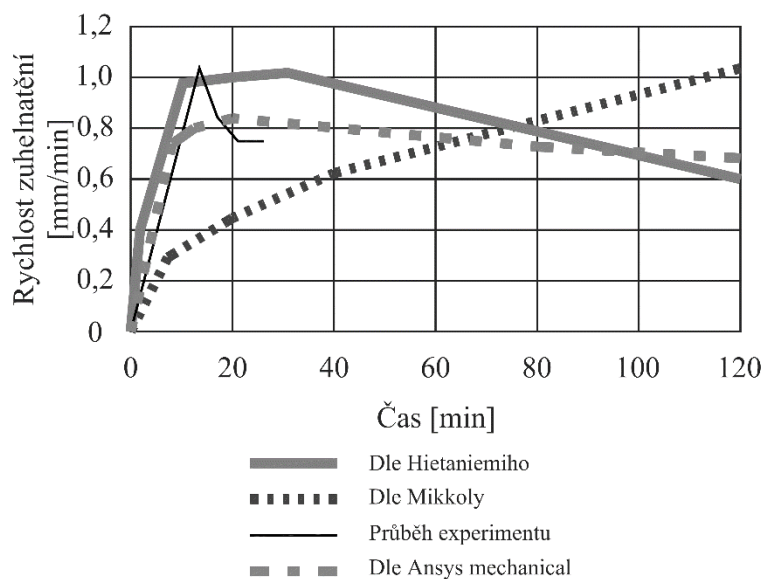
Hietaniemi [3], který vycházel z rovnic od Mikkoly, definoval rovnice pro rychlost zuhelnatění (rovnice 3.27), kterými lze zohlednit rozdílný tepelný tok, koncentraci kyslíku nebo také vlhkost pomocí pravděpodobnostních rozdělení. Lze tedy využít pravděpodobnostní přístup pro zohlednění heterogenních vlastností dřeva v závislosti na čase a teplotě. Výpočet definovaný dle [3] lze využít na veškeré průběhy požáru a nejsou omezené pouze na normový průběh požáru.

$$\beta = f(\chi_{O_2}, t) \cdot \frac{C \cdot \dot{q}_e^n(t)^p}{(\rho + \rho_0)(A + B \cdot \omega)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.27)$$

kde:

β	je rychlost zuhelnatění [mm·min ⁻¹],
$f(\chi_{O_2}, t)$	funkce charakterizující závislost rychlosti zuhelnatění dřeva na koncentraci kyslíku [-],
C	koeficient pro pravděpodobnostní přístup v rozmezí dle [3] [kW·m ⁻²],
$\dot{q}_e^n(t)^p$	tepelný tok dřevem funkcí času [kW·m ⁻²],
ρ	hustota dřeva [kg·m ⁻³],
ρ_0	hustota suchého dřeva v rozmezí dle [3] [kg·m ⁻³],
A	koeficient pro pravděpodobnostní přístup v rozmezí dle [3] [kJ·kg ⁻¹],
B	koeficient pro pravděpodobnostní přístup v rozmezí dle [3] [kJ·kg ⁻¹],
ω	vlhkost dřeva [%],
t	čas [min],
τ	časová konstanta v rozmezí dle [3] [min].

Tyto metody jsou popsány Kamenickou a kol. v [20]. V uvedeném článku jsou srovnány metody výpočtů dle Mikkoly, Hietaniemi a pomocí softwaru Ansys Workbench s rychlostí zuhelnatění z experimentu provedeného pro normovou teplotní křivku (viz Obr. 3.9). V metodě dle Mikkoly nejsou zavedeny žádné parametry, které by ovlivňovaly průběh podle toho, zda se jedná o požár v prvních minutách, či v pozdější fázi. Bylo by vhodné při použití této metody implementovat tyto parametry do výpočtů tak, aby byla metoda použitelná i pro průběh v prvních minutách. Metoda dle Mikkoly je nejvíce ovlivněna nárůstem teploty plynů během požáru. Metoda dle Hietaniemi v počáteční fázi roste obdobně jako při experimentu a lépe předpovídá počáteční fázi požáru.



Obr. 3.9: Srovnání rychlostí zuhelnatění v závislosti na čase pro různé metody [20]

3.3.2.2 Hloubka zuhelnatění pomocí pokročilých numerických modelů

Hloubka zuhelnatění pomocí pokročilých výpočetních modelů (např. modelů typu polí, tzv. CFD modelů či jiných pokročilých modelů) je často určována zjednodušeně pomocí výpočtu průběhu teplot po průřezu. Dle ČSN EN 1995-1-2 [6] a většiny publikací je doporučeno jako polohu čáry zuhelnatění uvažovat polohu izotermy 300 °C. Pro polohu izotermy jsou v některých publikacích uvedeny hodnoty od 260 do 350 °C [20]. Pečenko a Hozjan [21] upozorňují, že poloha izotermy 300 °C je však aplikovatelná v případě vystavení dřevěného prvku normovému požáru či požáru s podobným průběhem teplot a upozorňují na proměnnost izotermy v závislosti na teplotní křivce.

V předchozí kapitole byly popsány vlastnosti dřeva za zvýšených teplot. Pro správné modelování je třeba do modelu zadat vhodné kinetické parametry, tepelné vlastnosti dřeva a součinitele přestupu tepla. V ČSN EN 1995-1-2 [6] jsou uvedeny součinitele v závislosti na teplotě (kapitola 3.2). Tyto hodnoty jsou určeny pouze pro prvky z jehličnatých dřevin, které jsou vystaveny účinkům normového požáru. Jelikož nejsou v současné době známy přesnější data pro jiné typy dřevin a data pro účinky jiných než normových požárů, jsou hodnoty z normy využívány prakticky ve všech případech návrhu.

König [22] uvádí, že hodnoty v příloze B normy ČSN EN 1995-1-2 [6] jsou pro parametrický požár zavádějící a pro teploty nad 350 °C doporučuje modifikovat tepelné vlastnosti na stranu bezpečnou. Na toto doporučení reagují další vědci v článku Hopkin a kol. [16], kde navrhují výpočet modifikačního součinitele (rovnice 3.28) v závislosti na součiniteli Γ a hustotě požárního zatížení q_{td} . Modifikační součinitel je určen pro parametrický požár při teplotách nad 350 °C pomocí následujících rovnic.

$$k_{\lambda,mod} = k_{\Gamma,mod}k_{qtd,mod} \quad (3.28)$$

$$k_{\Gamma,mod} = 1,5\Gamma^{-0,48} \quad (3.29)$$

$$k_{qtd,mod} = \sqrt{\frac{q_{td}}{210}} \quad (3.30)$$

kde:

$k_{\lambda,mod}$ je modifikační faktor tepelné vodivosti,

$k_{\Gamma,mod}$ modifikační faktor vlivu součinitele Γ ,

$k_{qtd,mod}$ modifikační faktor vlivu hustoty požárního zatížení q_{td} .

3.3.2.3 Numerický model PYCIF

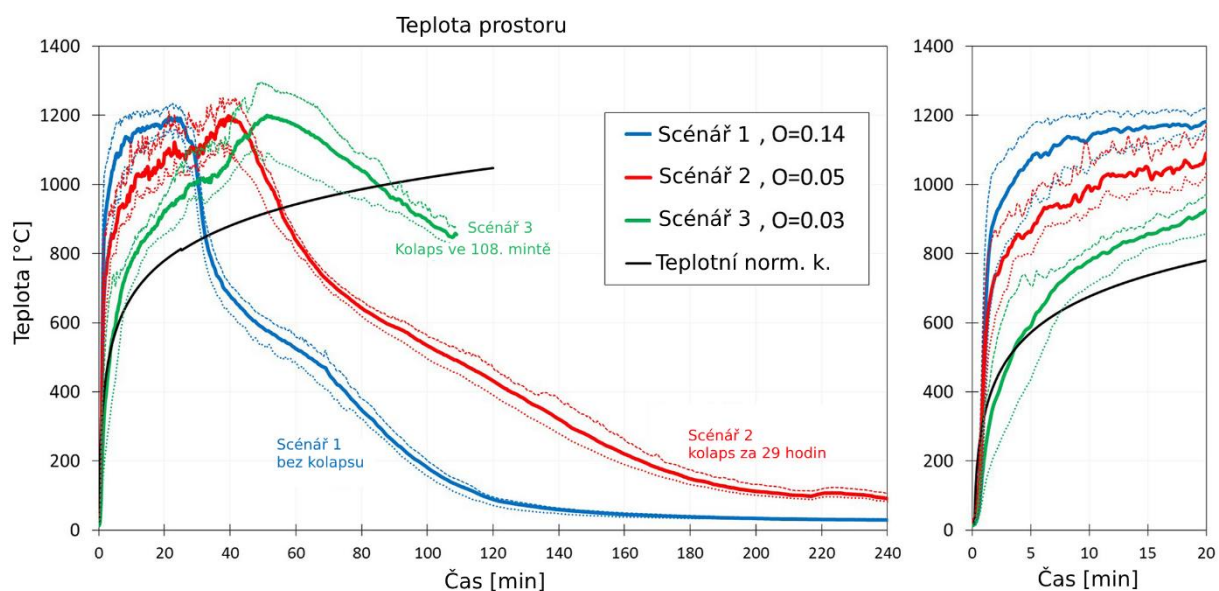
Pečenka a kol. [2] vyvíjí numerický model pro předpověď zuhelnatělé vrstvy (tzv. PYCIF model), který je řazen mezi pokročilé modely a je založen na pravděpodobnostním přístupu. Tento model vychází z experimentálních dat pro přirozené požáry. PYCIF model je založen na detailním popisu fyzikálních jevů při hoření dřeva a vychází především z pyrolýzy dřeva, pomocí které je následně možné zpřesnit hloubku zuhelnatění dřeva. Model PYCIF spojuje model pyrolýzy s tzv. „heat-mass“ modelem. Pyrolýza dřeva je v modelu popsána na základě pyrolýzy celulózy. „Heat-mass“ model vychází ze zákona zachování hmotnosti a zákona zachování energie. Model zohledňuje přenos vázané vody, vodní páry a směsi zbytkových plynů.

Model PYCIF je dle Pečenka a kol. [2] použitelný pro normový i přirozený požár. Pomocí modelu je možné stanovit hloubku zuhelnatění dřeva bez použití polohy izotermy 300 °C. Model PYCIF nabývá velké přesnosti výsledných hodnot hloubky zuhelnatění při validaci s experimentálními daty. Jedná se momentálně o nejkompexnější model, který popisuje hloubku zuhelnatění pro přirozený normový požár z dosud poznaných studií popisujících chování zuhelnatění dřeva. Z modelu je možné získat teplotu na hranici zuhelnatělé vrstvy.

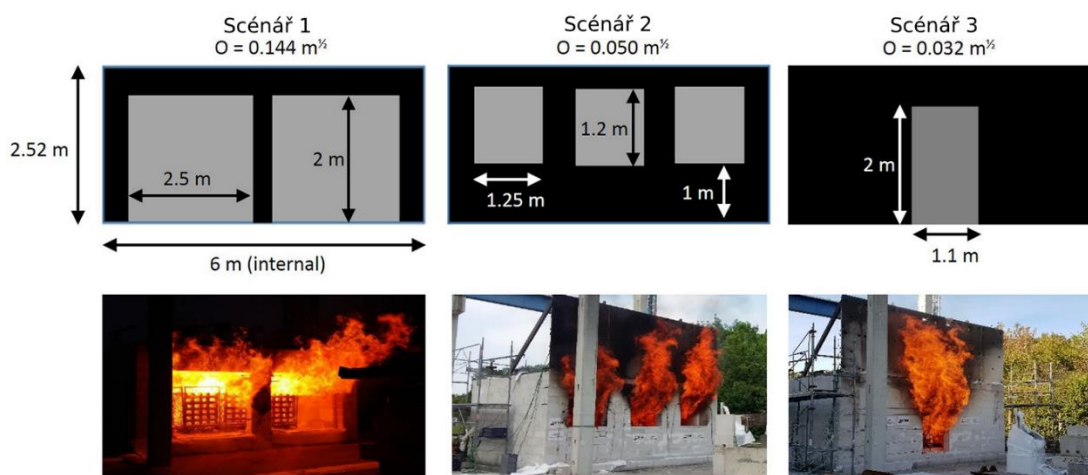
Model byl validován pomocí tří scénářů přirozených požárů. Požární scénáře byly převzaty od J.CH. Mindeguia a kol. [23], který poskytuje data z experimentů zohledňující vliv různých součinitelů otvorů, viz Obr. 3.10 a Obr. 3.11. Pečenka a kol. [2] provedli citlivostní analýzu, ze které je zřejmé, že některé parametry mají velký vliv na výslednou hloubku zuhelnatění. Velký vliv mají součinitele aktivní celulózy a zuhelnatělé vrstvy. Těkávé látky takový vliv nemají. Největší vliv na vývoj hloubky zuhelnatění má parametr E_1 (aktivní celulóza), kdy se při změně parametru E_1 o 15 % změnila finální hloubka zuhelnatění o 44 %. Výsledné hodnoty rychlosti zuhelnatění při porovnání s výsledky se liší o maximálně 14 % na stranu bezpečnou (viz Tab. 3.7).

Tab. 3.7: Porovnání rychlostí zuhelnatění pro různé scénáře [2]

Scénáře	Rychlost zuhelnatění [mm·mm ⁻¹]			
	Lamela 1		Lamela 2	
	Experiment	Výpočet	Experiment	Výpočet
Scénář 1	1,43	1,58	Neohořelo	Neohořelo
Scénář 2	1,19	1,39	0,8	0,72
Scénář 3	0,85	0,98	0,92	1,09



Obr. 3.10: Porovnání normové teplotní křivky a požárních scénářů 1-3 [23]



Obr. 3.11: Znázornění scénářů přirozeného požáru [23]

4 Experimentální studie

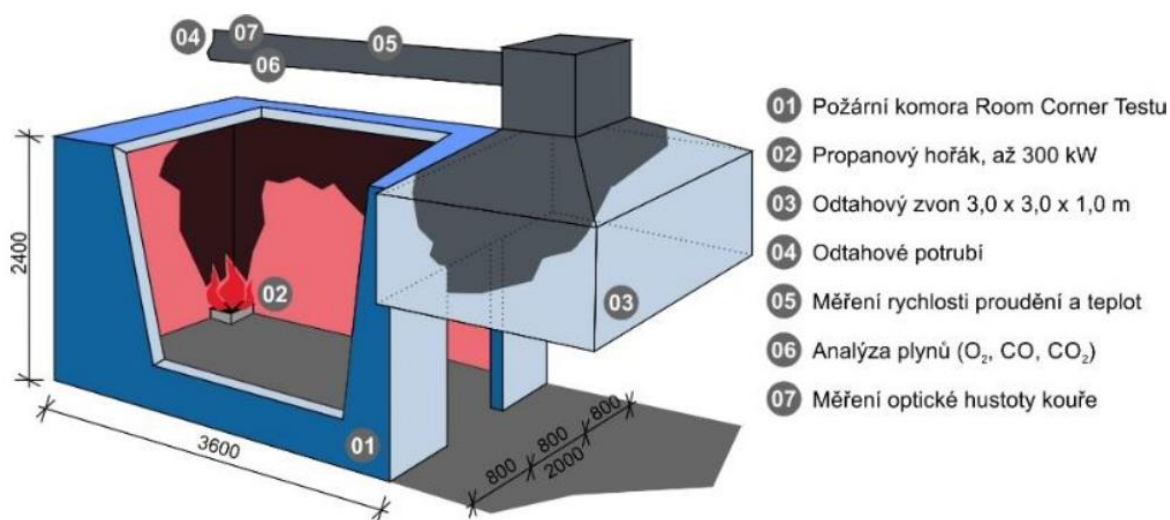
4.1 Popis experimentu

Součástí diplomové práce je požární experiment, jehož cílem je získání dat pro ověření a validaci vytvořeného výpočetního programu pro předpověď zuhelnatělé vrstvy dřeva v prostředí Python.

Požární experiment byl proveden v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB). Jednalo se o požární zkoušku v peci Room Corner Test. Experiment se uskutečnil 30. 3. 2023.

4.1.1 Room Corner Test

Room Corner Test v UCEEB odpovídá svými vlastnostmi normě ČSN EN 14390 [24]. Jedná se o zkoušku probíhající v reálném měřítku, které se provádí v místnosti s půdorysnými rozměry 3,6 m × 2,4 m a výškou 2,4 m. Místnost je zhotovena z pórobetonových tvárnic. V místnosti je dveřní otvor o velikosti 0,8 m × 2,0 m a nachází se v čelní stěně. Vedle místnosti na čelní straně se nachází odtahový zvon s rozměry 3 m × 3 m x 1 m, který slouží k odvodu spalin hoření. Kouř je dále odváděn pomocí odtahového potrubí, kde dochází k měření teplot a proudění, analýza plynů (O_2 , CO , CO_2) a měření optické hustoty kouře [24]. Zdrojem tepla je plynový hořák, který je umístěn v rohu místnosti. Dispozice místnosti je patrná z Obr. 4.1.

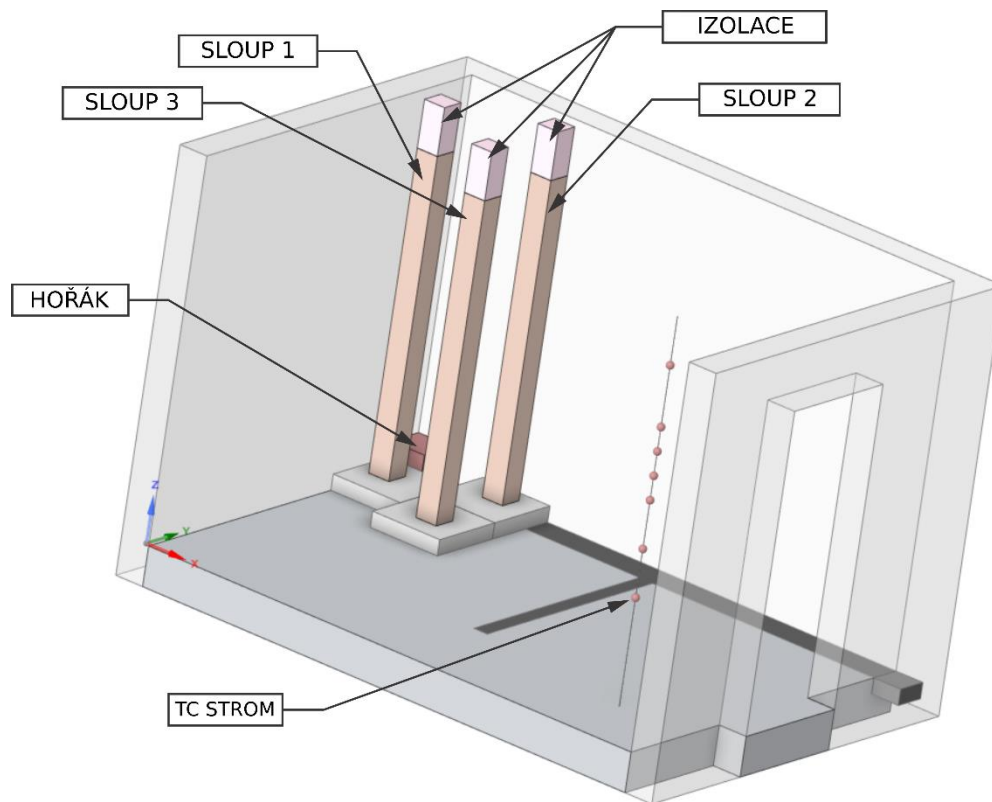


Obr. 4.1: Dispozice místnosti Room Corner Test [25]

4.1.2 Zkušební vzorky a rozmístění vzorků v peci

Uvnitř pece byly zkoušeny tři sloupy o rozměrech 150 × 150 mm a výšce 2000 mm (Obr. 4.2). Sloupy byly před zkouškou ohoblovány, aby se na průřezu nevyskytovaly nerovnosti, díky kterým

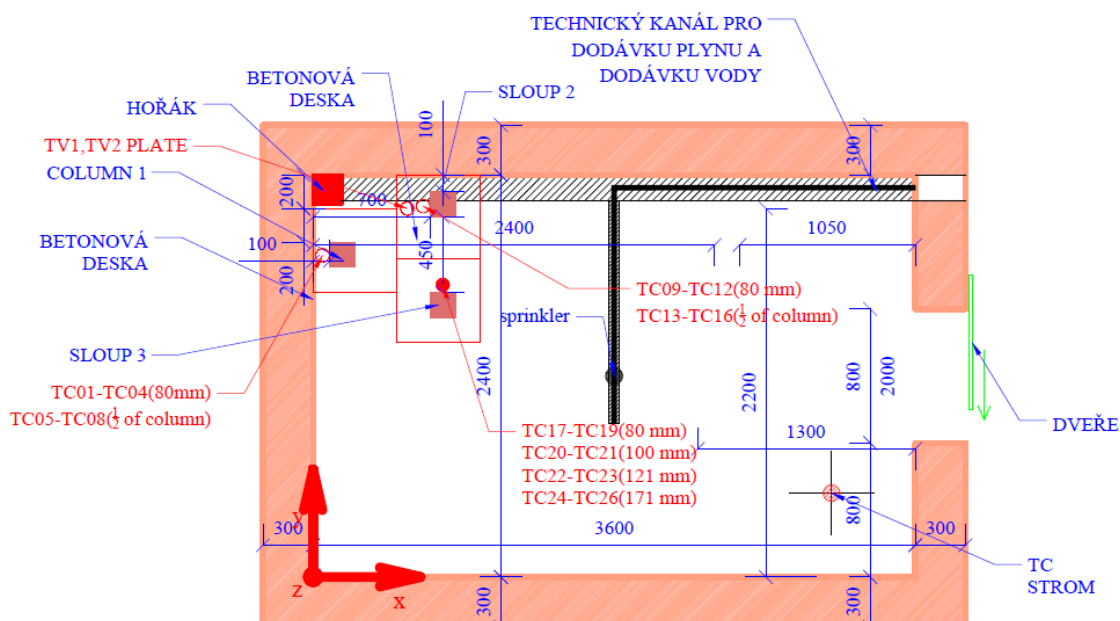
začne teplo lépe a rychleji prostupovat do průřezu, a osazeny termočlánky s deskovými snímači. Do jednoho sloupu byl zasazen ocelový T profil pro další zkoumání na jiné práci. Sloupy byly umístěny v rohu pece tak, aby se navzájem při hoření ovlivňovaly. Toto rozložení bylo zvoleno na základě předchozích experimentů. Umístění sloupů zobrazené na Obr. 4.2 bylo použito pro tuto diplomovou práci.



Obr. 4.2: Rozmístění prvků v Room Corner Testu

4.1.3 Měření teploty

Výsledné teploty byly měřeny pomocí termočlánků a deskových snímačů teploty. Termočlánky byly umístěny do výšky 1000 mm a 1920 mm a v hloubkách 10, 20, 30 a 50 mm ve sloupech 1 a 2. Ve sloupu 3 byly termočlánky umístěny ve výšce 1920 mm, 1900 mm, 1879 mm a 1829 mm a hloubkách viz Obr. 4.3. Na Obr. 4.3 je schéma rozmístění termočlánků. Teplota byla také měřena pomocí TC stromu a pomocí dvou deskových snímačů. TC strom měří teploty v sedmi úrovních pece v rozmezí 0,67 – 2,1 m. Deskové snímače jsou na Obr. 4.3 značené jako TV1, TV2 PLATE.



Obr. 4.3: Rozmístění termočlánků ve zkušební peci

Zavedení termočlánků probíhalo pomocí vyvrtaných děr do poloviny půdorysného rozměru sloupu, rovnoběžně s izotermou do daných výšek a hloubek a následně vedení termočlánku kolmo na patku sloupu. Rozmístění termočlánku je zobrazeno na Obr. 4.4.



(A)

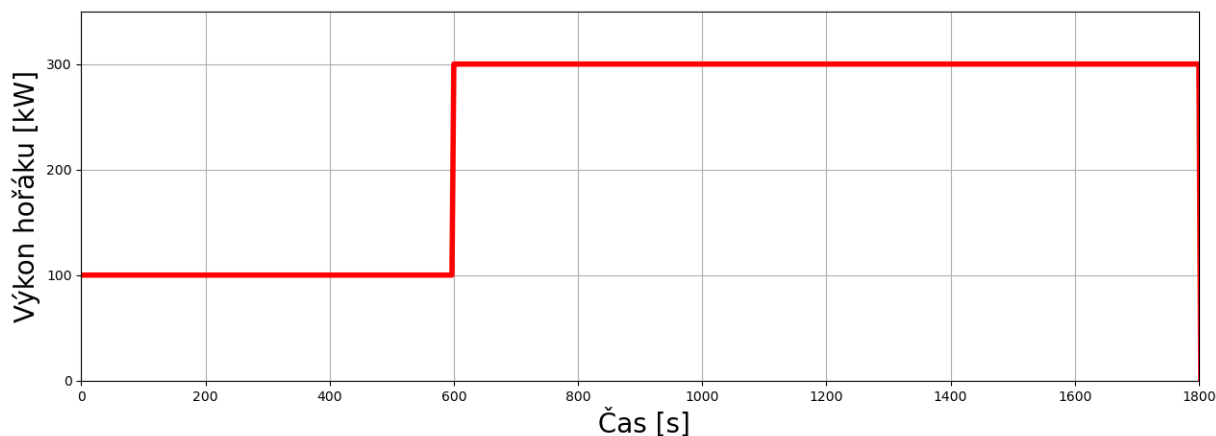


(B)

Obr. 4.4 (A) Rozmístění termočlánků v pracovním prostředí; (B) Umístění sloupů a termočlánků v RCT

4.1.4 Zatížení

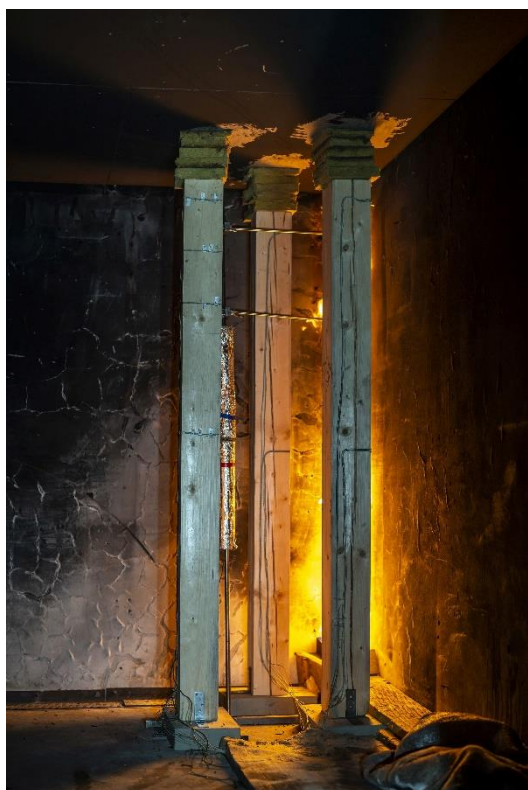
Vzorky nebyly v průběhu požární zkoušky zatěžovány mechanicky. Jednalo se pouze o teplotní zatížení. Byl použit pískový propanbutanový hořák, který byl umístěn v rohu pece, viz Obr. 4.2. Požární zkouška probíhala 30 minut. Výkon hořáku byl nastaven na 100 kW po dobu prvních 10 minut a následně byl zvýšen na 300 kW. Výkon hořáku během zkoušky je znázorněn na Obr. 4.5.



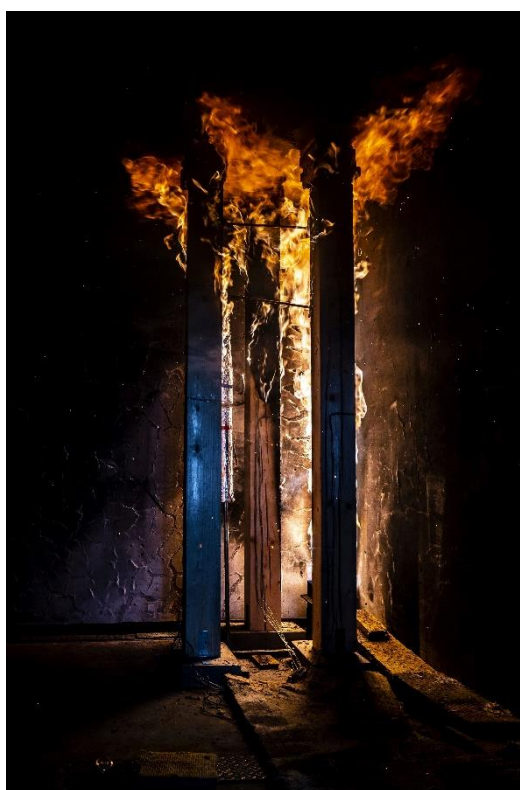
Obr. 4.5: Výkon hořáku v průběhu experimentu v závislosti na čase

4.2 Průběh požáru

Pomocí průběhu výkonu požáru byla simulována rostoucí fáze přirozeného požáru v Room Corner Testu. Ze snímků během experimentu a získaných výsledných dat lze vidět, jak požár probíhal. V první fázi při výkonu 100 kW požár nedosahuje stropu a ani jeden ze sloupů nehořel, viz Obr. 4.6(A). Při druhé fázi plameny stropu dosahovaly a všechny sloupky hořely a navzájem se ovlivňovaly z hlediska sálání tepla, viz Obr. 4.6(B). Během experimentu se požár více rozšiřoval, což způsobilo větší odhořívání sloupů.



(A)



(B)

Obr. 4.6: (A) Fotografie průběhu požáru při výkonu 100 kW; (B) Fotografie průběhu požáru při výkonu 300 kW
Největší teploty byly dosaženy na termočláncích v úrovni 1920 mm od paty sloupu. Nejvíce požárem ovlivněný byl sloup 1, který se vyskytoval nejbližší u hořáku. Tento sloup dosahoval teplot přibližně 820 °C. Z Obr. 4.7 je vidět, že sloup 1 během experimentu hořel celý. Sloup 2 začal hořet postupně od vrchu a ze strany od umístěného hořáku. Sloup 3 hořel postupně od vrchu, jelikož kužel požáru dosahoval míst, kde byl sloup umístěn. Následně sloup 3 zahořel také ze strany od sloupu 1, ze kterého se plameny na sloup přenesly.



(A)



(B)

Obr. 4.7: (A) Konec zkoušky a hoření sloupů; (B) Výsledné zuhelnatění sloupů po požáru

4.3 Sběr dat

4.3.1 Příprava prvků pro sběr dat

Sloupy po zkoušce byly uhašeny, a náhledně přeneseny do venkovního prostředí tak, aby se přirozeně vychladly a následně byly převezeny na fakultu stavební pro další zkoumání. Byla odstraněna zuhelnatělá vrstva pro možné sledování hranice mezi vrstvou pyrolýzy a zuhelnatělé vrstvy, viz Obr. 4.8, na kterém je vidět porovnání opracovaných a neopracovaných sloupů.



Obr. 4.8 (A) Sloupy se zuhelnatělou vrstvou; (B) Sloupy bez zuhelnatělé vrstvy

4.3.2 Sběr dat

V rámci diplomové práce byl zkoumán především sloup 1, ale zpracován byl i sloup 3. Sloupy byly nařezány kolmo na osu. Pro přesnost byl každý sloup nařezán po 50 mm. Při řezání probíhalo popisování sloupů a centrování středu sloupu pro následné měření. Hloubky zuhelnatění byly získány z fotografií jednotlivých průřezů zkoumaného sloupu. Pro fotodokumentaci jednotlivých prvků byl vytvořen stojan (viz Obr. 4.9), na který byl položen fotoaparát tak, aby fotografie byly vždy pořízeny ve stejné vzdálenosti od prvku a s tím i stejné měřítko fotografií. Toto řešení bylo vhodné z důvodu velkého množství průřezů a měřených prvků. Během fotografování byly nařezané prvky položeny na bílou patku stojanu pro snazší měření hloubky zuhelnatění. Jednotlivé prvky byly foceny vždy minimálně 3x. Jedna fotografie byla s číselným popisem, druhá fotografie bez číselného popisu a třetí fotografie byla s měřítkem. Používaly byly převážně fotografie s měřítkem tak, aby byly výsledky ověřeny. Fotografie s číselným popisem sloužila především pro rozklíčování daných prvků po výšce. Snahou tohoto měření bylo pořídit snímky průřezů tak, aby bylo možné co nejvíce porovnat jednotlivé průřezy. Problémem bylo to, že ohořelé průřezy nebyly pravoúhlé, tudíž nebylo možné zajistit vždy stejnou polohu vzorků.

Pro druhý měřený sloup byla označena i jedna stejná strana tak, aby bylo možné zajistit na fotografiích vždy stejnou stranu. Z průřezů bylo čitelné, které strany byly vystavené požáru, ale při takto velkém množství průřezů bylo ideální si označit stranu pro jednodušší porovnávání prvků, což vyplynulo z měření prvního sloupu, kdy bylo potřeba porovnávat a natáčet jednotlivé průřezy tak, aby na sebe seděly.



(A)



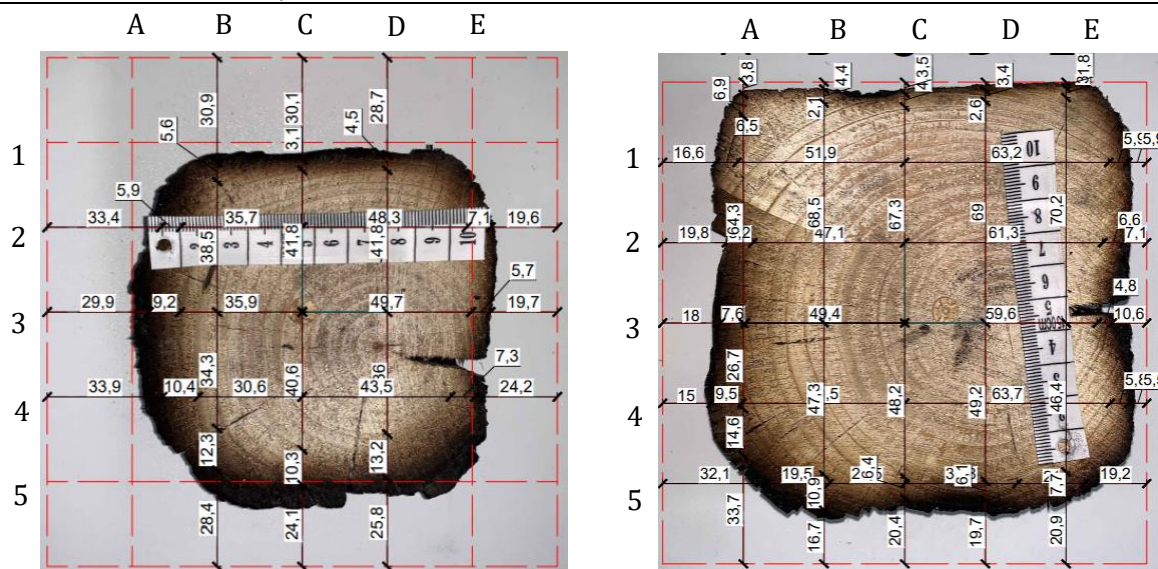
(B)

Obr. 4.9: (A) Stojan vytvořený pro fotodokumentaci prvků; (B) Ukázka měřeného prvku s měřítkem

Po fotodokumentaci byly fotografie nahrány do softwaru AutoCAD, kde byly převedeny do reálného měřítka pomocí měřítka na prvku a následně byly odměřovány hodnoty hloubek zuhelnatění, vrstvy pyrolýzy a rozměry redukovaného průřezu. Byl navržen rastr měřících kót po 25 mm. Rastr je na ose x značen pomocí písmen A až E a na ose y pomocí čísel 1 až 5. Pro každý rastr byl následně vytvořen graf, který značí hloubky zuhelnatění, vrstvu pyrolýzy a redukovaný průřez po celé naměřené výšce sloupu.

Určování hranic měřených hodnot hloubek zuhelnatění, vrstvy pyrolýzy a redukovaného průřezu probíhalo pouze na základě vizuálního posouzení v softwaru AutoCAD. Okótované řezy jsou zobrazeny na Obr. 4.10. Toto měření není jednoznačné, jelikož je subjektivní a každý jedinec by to rozlišil jinak. Hranici mezi pyrolýzou a surovým dřevem je komplikované rozlišit. Přejít mezi těmito dvěma vrstvami je pozvolný a není přesně určeno, při jaké barvě přesně dřevo přechází do fáze pyrolýzy. To znamená, že existuje určitá míra nejistoty při provádění těchto měření.

Pro přesnější měření by bylo možné použít jednu z metod doporučených J. Schmidem a kol. [26]. Ti doporučují metody založené na fotografování a skenování pro možnost vytvoření 3D modelu, který umožní automatickou analýzu. Při vytvoření 3D modelu je možnost zajistit objektivnější výsledky a rychlejší sběr dat oproti metodě, kterou bylo postupováno při sběru dat v této práci.

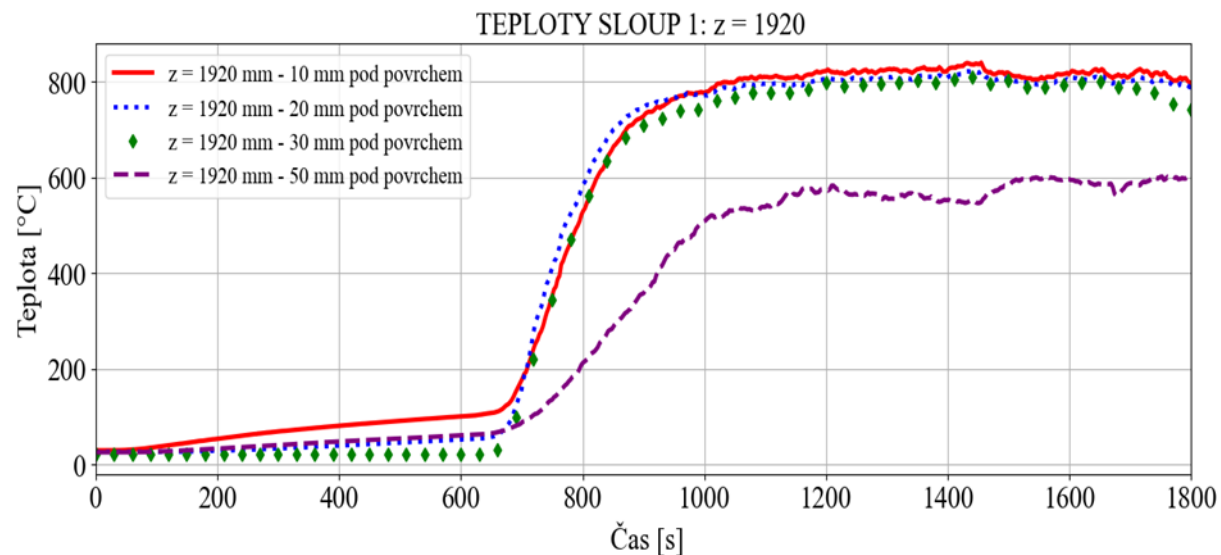


Obr. 4.10: (A) Fotografie měřeného řezu ve výšce 1920 mm (B) Fotografie měřeného řezu ve výšce 1250 mm

4.4 Analýza dat

4.4.1 Teploty

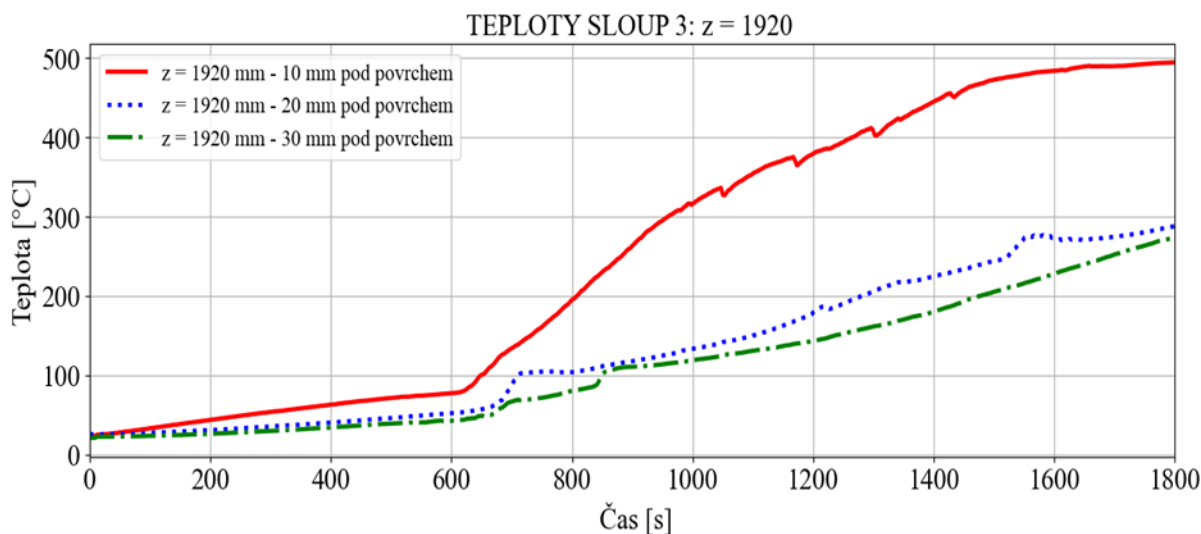
Na Obr. 4.11 je znázorněn průběh teplot sloupu 1, který byl nejbližší hořáku v úrovni 1920 mm. Rozvoj teplot během experimentu byl rozdělen na 3 fáze. V první fázi se jedná o nižší teploty, jelikož byl nastaven menší výkon hořáku. Po 10. minutě je vidět na Obr. 4.11 prudký nárůst teplot a následně ustálení teplot a průběh hoření. Teploty na tomto sloupu přesahují hodnotu 800 °C.



Obr. 4.11: Teploty v různých hloubkách sloupu 1 ve výšce 1920 mm

Na Obr. 4.12 je znázorněn průběh teplot sloupu 3, který byl od hořáku v největší vzdálenosti. Teploty na tomto sloupu dosahovaly nižších hodnot než u sloupu 1. Na grafu je vidět stagnace teplot

při 100 °C, která představuje fázi, při které probíhá odpařování vlhkosti ze dřeva. Tyto fáze jsou od sebe chronologicky vzdálené, což je způsobené postupným šířením tepla do hloubky průřezu.

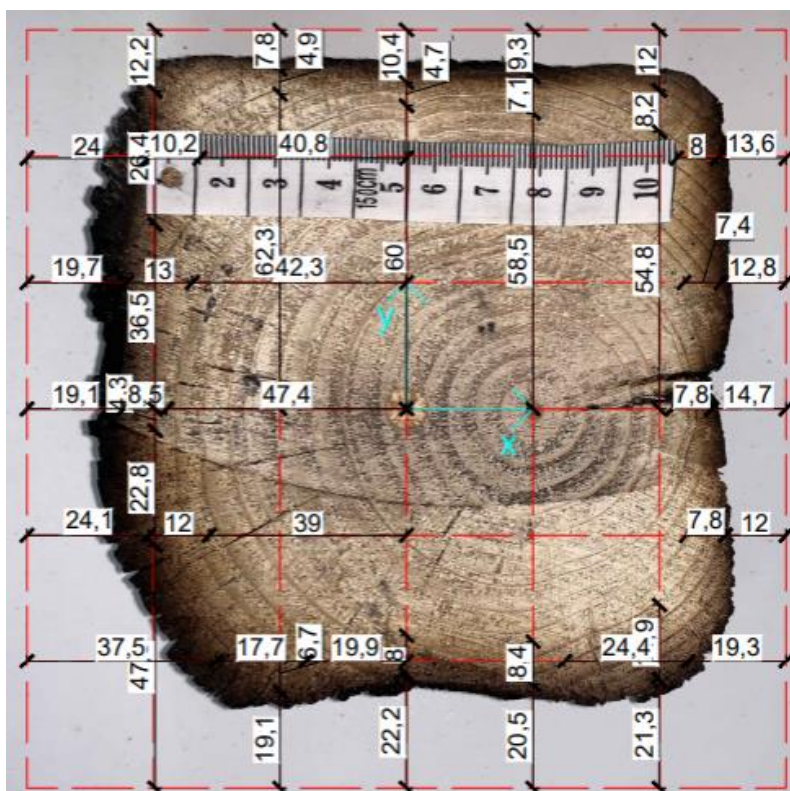


Obr. 4.12: Teploty v různých hloubkách sloupu 3 ve výšce 1920 mm

4.4.2 Hloubka zuhelnatění

Hloubku zuhelnatění není jednoduché přesně a bezchybně stanovit. V případě této experimentální studie hraje velkou roli vliv odpařování a odhořívání zuhelnatělé vrstvy, jelikož se jednalo o pokročilý rozvoj zuhelnatění dřevěných sloupů. Dalším faktorem, který zkresluje hodnoty hloubky zuhelnatění je zaoblení rohů, kdy je hloubka zuhelnatění měřena pouze v měřících osách. Dále v některých výškách průřez odhořel na tolik, že v dané ose nebylo možné ani změřit požadované hodnoty. Z toho důvodu jsou hodnoty naměřené v krajních osách A, F, 1 a 5 nesrovnatelné s ostatními osami, a proto je třeba tyto osy vyhodnocovat samostatně.

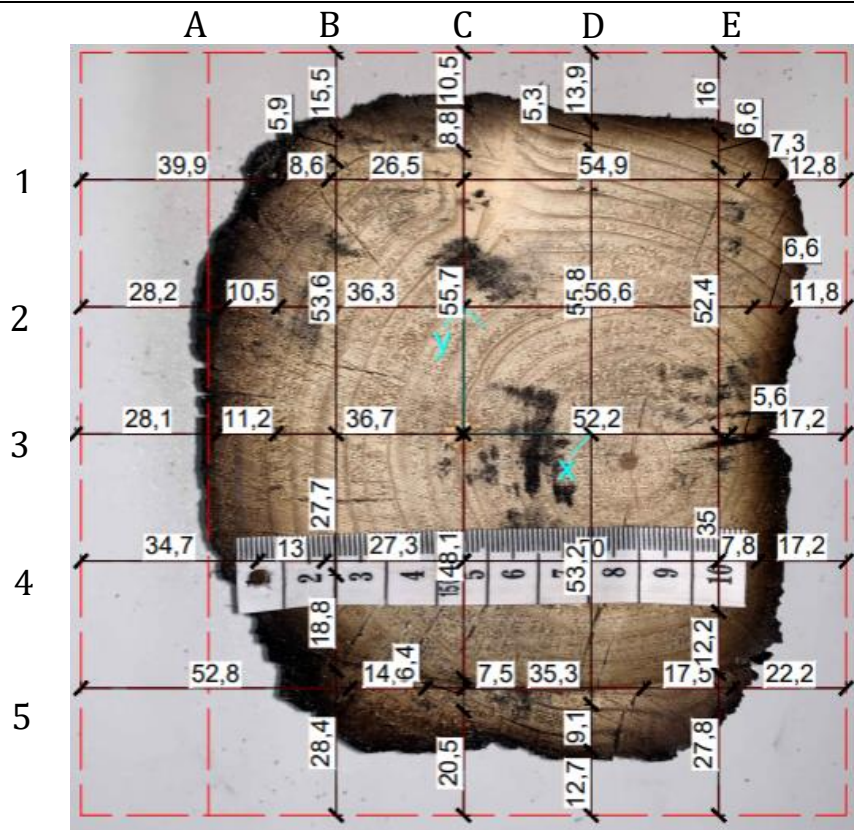
Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující hloubku zuhelnatění je orientace a vzdálenost dřevěného prvku od zdroje požáru. To, jak působí orientace dřevěného prvku vůči požáru, lze vidět na Obr. 4.13. Z Obr. 4.13 a Obr. 4.14 je zřejmé, že dvě strany, které jsou vystaveny přímému sálavému toku od hořících plynů hořáku, odhořely nejvíce a dosahují větších hodnot hloubky zuhelnatění. Na obrázku se jedná o strany vlevo a dole. U zbylých dvou stran, které byly odvráceny od zdroje požáru, převládalo po dobu zkoušky vystavení prvku tepelným tokem proudění.



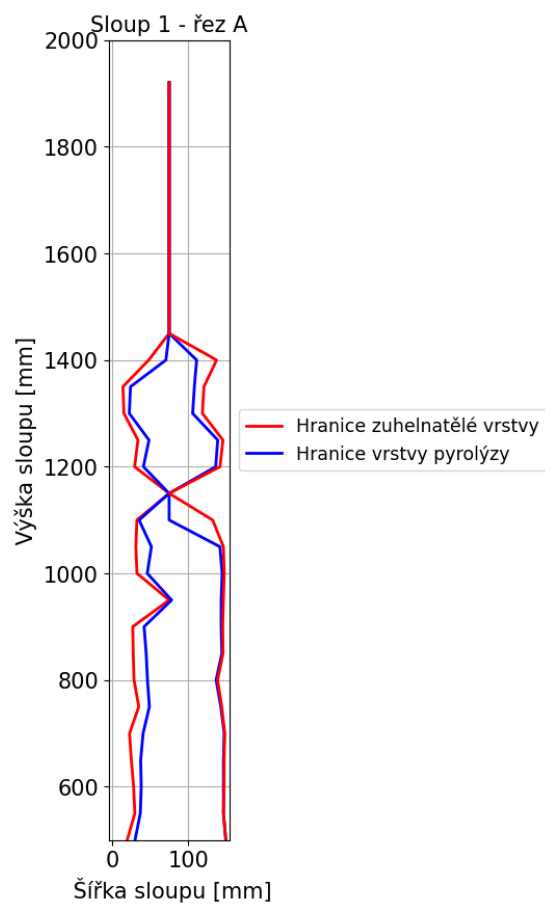
Obr. 4.13: Měřený průřez ve výšce 1400 mm pro znázornění orientace vůči požáru

Pro lepší přehlednost jsou naměřené hodnoty hloubek zuhelnatění zpracovány graficky pro jednotlivé průřezy. Jedná se o hloubky zuhelnatění, které představují finální stav po zkoušce, která trvala 30 minut. V grafickém zpracování sloupů je na ose x znázorněna původní šířka sloupu a na ose y je výška sloupu. Sloupy byly měřeny od výšky 500 mm do výšky 1920 mm. Spodní omezení je způsobeno vlivem nízké hloubky zuhelnatění a při porovnání s průřezy výše už bylo zbytečné tyto řezy měřit. Výška 1920 mm byla pro tento sloup uzpůsobena z toho důvodu, že hlava sloupu byla tolik ohořelá, že nebylo možné vybrat vyšší řez.

Obr. 4.15 znázorňuje hranici hloubky zuhelnatění a vrstvy pyrolýzy na ose A po výšce sloupu, kde je možné vidět, že průřez v daném místě odhořel natolik, že v některých průřezích není ani co měřit. Do výšky přibližně 1450 mm byla hloubka zuhelnatění v každém místě kolmém na měřený řez větší než 25 mm, proto je toto místo nesrovnatelné s ostatními. Hloubka zuhelnatění byla i ve výšce 1150 mm v místech kolmých na tento řez větší než 25 mm a bude to nejspíše způsobeno vlivem odpadnutí zuhelnatělé vrstvy. Z průřezu je možné rozpoznat exponovanou a neexponovanou stranu.

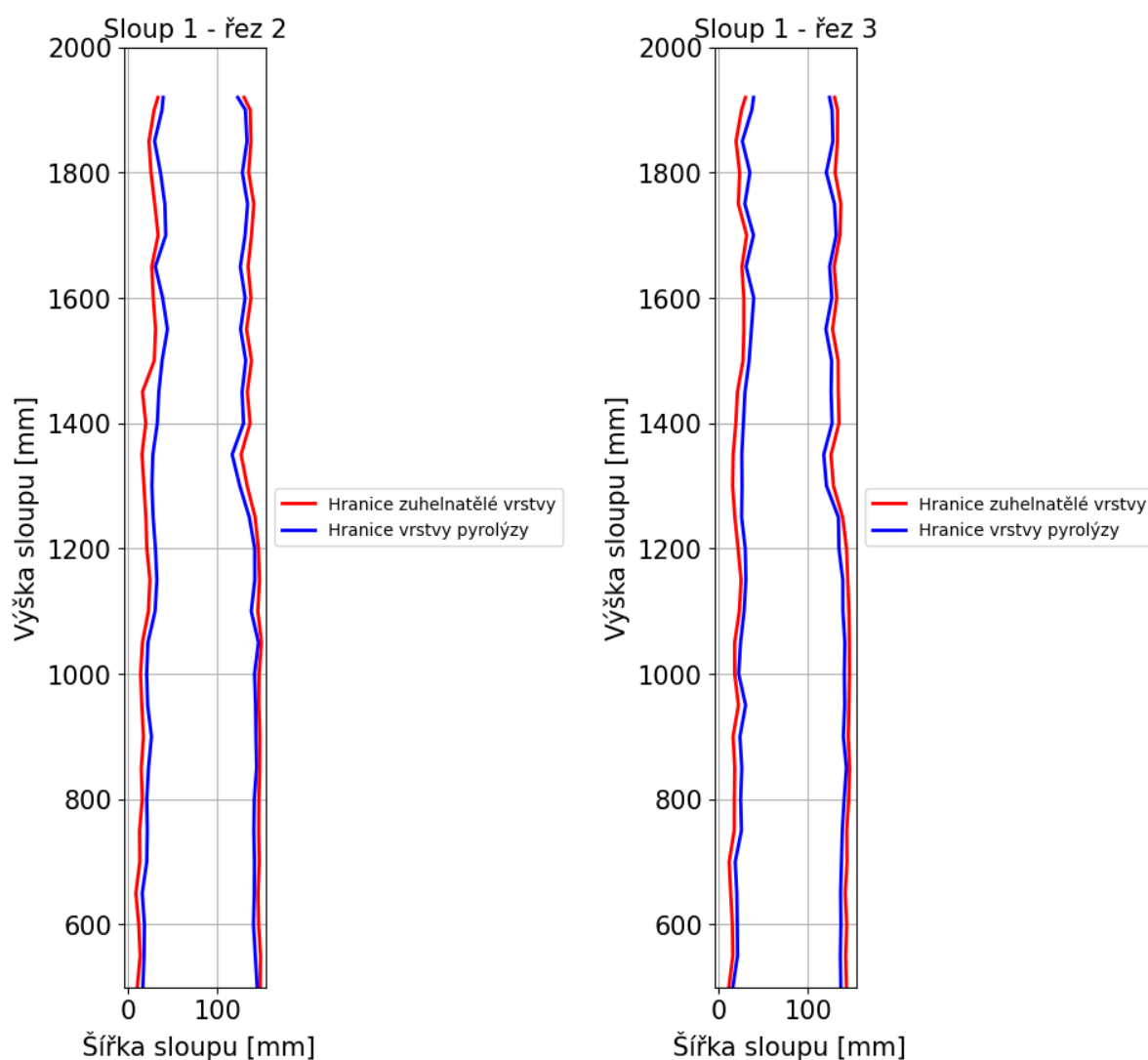


Obr. 4.14: Fotografie měřeného řezu ve výšce 1600 mm



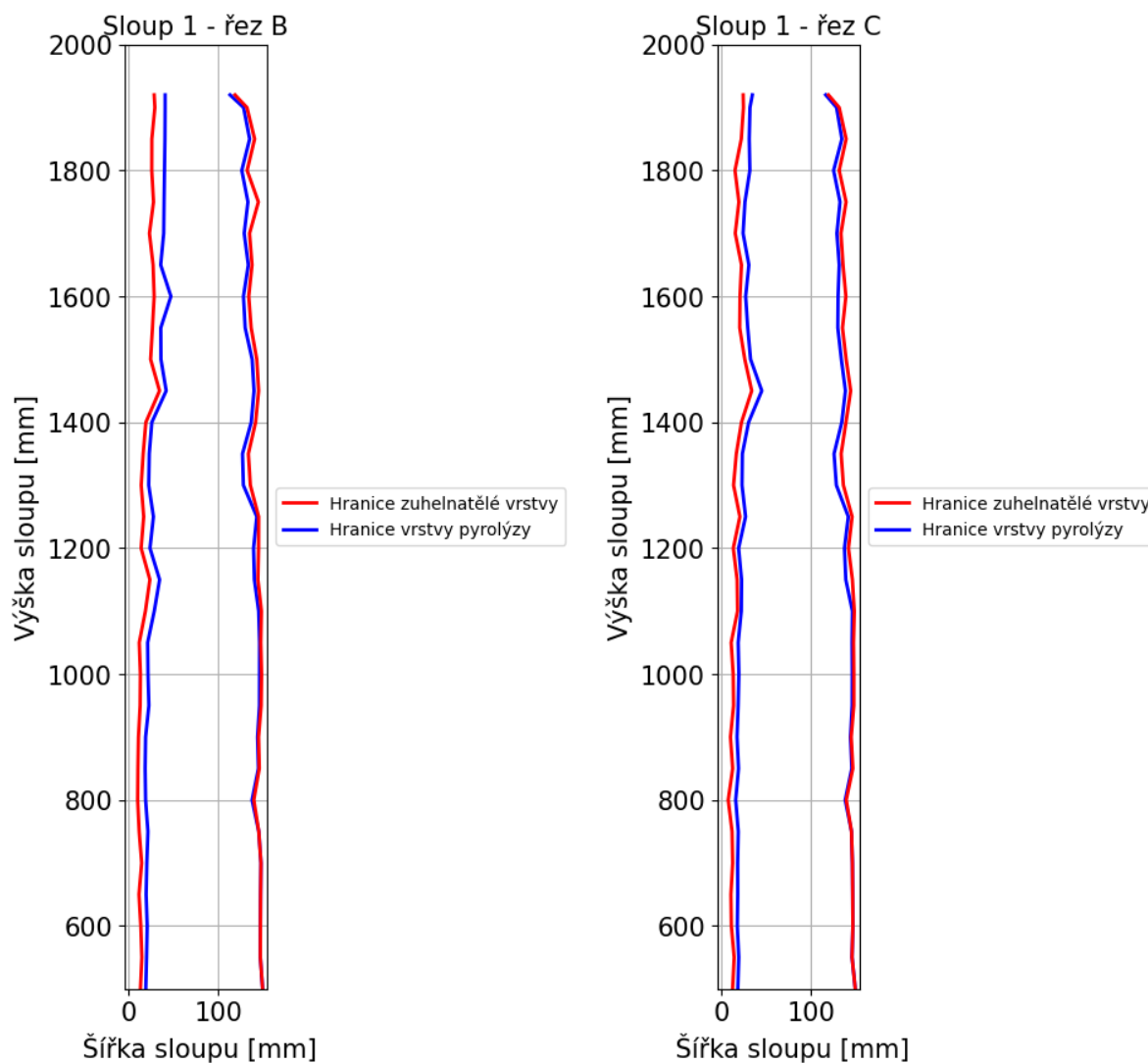
Obr. 4.15: Hloubky zuhelnatění a vrstva pyrolýzy po výšce sloupu 1 v řezu A

Obr. 4.16 znázorňuje hranici hloubky zuhelnatění a vrstvy pyrolýzy na osách 2 a na 3 po výšce sloupu. Na grafickém znázornění je vidět, že hloubka zuhelnatění má tendenci růst po výšce. Důvodem tohoto růstu jsou vyšší teploty v horních částí místnosti, což odpovídá i měřeným hodnotám z termočlánků při experimentu. Maximální hodnoty hloubky zuhelnatění v těchto řezech se pohybují okolo 30 mm. Tyto hodnoty jsou možné naměřit do výšky 1500 mm a poté postupně hloubka zuhelnatění začíná klesat.



Obr. 4.16: Hloubky zuhelnatění sloupu 1 po výšce (A) řez 2 (B) řez 3

Obr. 4.17 znázorňuje hranici hloubky zuhelnatění a vrstvy pyrolýzy na osách B a C po výšce sloupu, což je v kolmém směru na osy znázorněné na Obr. 4.16. Na grafickém znázornění lze vidět, že v nižších výškách dochází k nárůstu zuhelnatělé výšky u exponované strany prvku. Kdy exponovaná strana dosahuje hloubky zuhelnatění 12 mm a neexponovaná strana není vůbec ohořelá. Následně začíná sloup odhořívat po výšce, jak bylo zmíněno dříve.



Obr. 4.17: Hloubky zuhelnatění sloupu 1 po výšce (A) řez B (B) řez C

4.4.3 Rychlost zuhelnatění

Z maximálních hloubek zuhelnatění u sloupu 1 byla vypočítána rychlost zuhelnatění. Pro výpočet byla vybrána maximální hodnota na průřezu a byly posuzovány pouze osy 2, 3, 4, B, C, D. Z těchto hodnot, které jsou vypsány v Tab. 4.1, lze potvrdit, že je rychlost zuhelnatění po výšce rozdílná. Přestože se jedná pouze o orientační odhad, jelikož není při průběhu přirozeného požáru uvažováno s konstantní rychlostí zuhelnatění, tak je možné dojít k závěru, že je maximální hodnota rychlostí zuhelnatění při experimentu větší než hodnota predikovaná normou. Hodnota rychlosti zuhelnatění při zahrnutí vlivu vedení v rozích je $0,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Hloubka zuhelnatění dle normového postupu při vystavení požáru po dobu 30 minut se tedy rovná 24 mm.

Tab. 4.1: Výpočet průměrné rychlosti zuhelnatění pro experiment trvající 30 minut

Výška řezu [mm]	Hloubka zuhelnatění [mm]	Rychlost zuhelnatění [$\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$]
1920	33,9	1,13
1500	30,6	1,02
1000	17,8	0,59

4.4.4 Trhliny

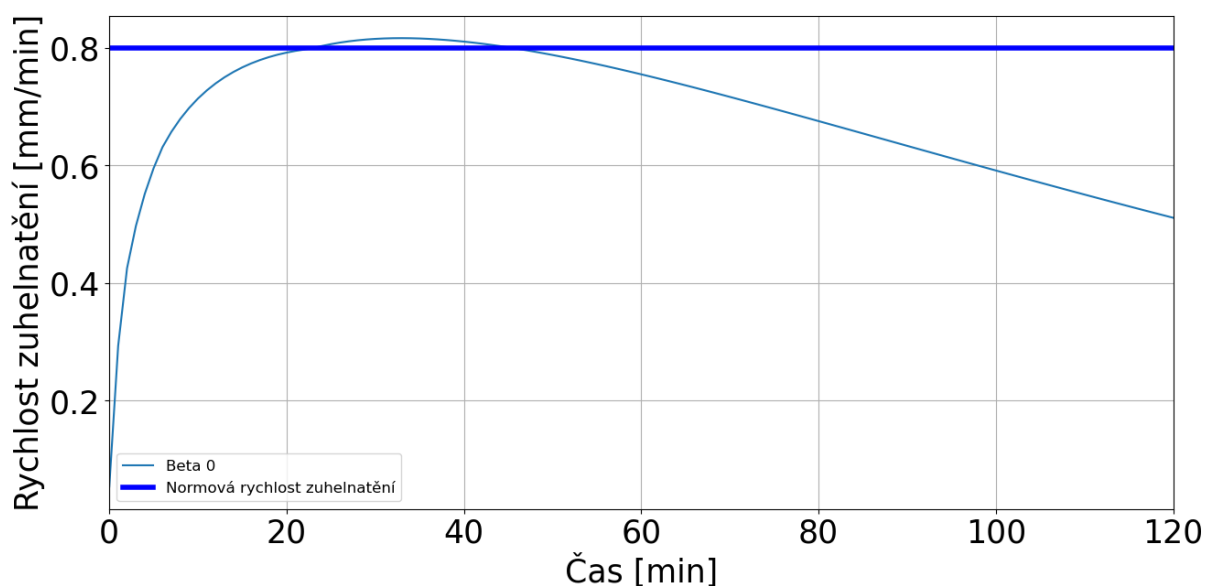
Experimenty ovlivňuje mnoho faktorů, které byly zmíněny v předešlých kapitolách. Dalším faktorem, který má vliv na hloubku zuhelnatění dřevěného prvku, je například výskyt suků a trhlin. Jejich výskyt není jednoduché zohlednit, ale vlivem výskytu trhlin je následně umožněn přístup kyslíku do větší hloubky dřevěného prvku a tím větší rychlost zuhelnatění dřeva, což je možné vidět na Obr. 4.18.



Obr. 4.18: Průřez ve výšce 1850 mm

5 Pravděpodobnostní výpočetní model

Součástí této diplomové práce je vytvoření numerického modelu, jehož základem je rovnice 3.27, kterou definoval Hietaniemi [3]. Důvod zvolení tohoto přístupu, je takový, že Hietaniemi definoval vstupy pro pravděpodobnostní přístup pomocí různých součinitelů. Dle rovnice 3.27 rychlost zuhelnatění nejdříve narůstá a následně díky izolačním vlastnostem zuhelnatělé vrstvy klesá, viz Obr. 5.1. Výpočet byl nejdříve proveden pouze pro požár dle normové teplotní křivky (ISO 834).



Obr. 5.1: Porovnání normové rychlosti zuhelnatění a rychlostí zuhelnatění vypočtené pomocí rovnice 3.27

5.1 Tvorba výpočetního modelu

Pro výpočet numerického modelu byl využit programovací jazyk Python 3.10. Tento způsob výpočtu byl zvolen vzhledem k rychlosti výpočtu a velikosti souboru. Ve finální podobě numerického modelu trval v prostředí Python 100 000 výpočtů cca 51 minut. Tento průběh výpočtů byl spouštěn opakovaně pro získání výsledků. Další výhodou Pythonu jsou graficky kvalitní grafy a tabulky, které není potřeba dále upravovat. Většina grafů zobrazených v této práci pochází z prostředí Python, vytvořené pomocí knihovny Matplotlib. Na Obr. 5.2 je zobrazen kód z části výpočetního modelu napsaný jazykem Python.

Postup tvorby numerického modelu (dále pouze „model“) byl následující. Nejdříve bylo nutné do modelu nadefinovat knihovny, které byly používány a základní definice jako je např. čas výpočtu, které tabulky se mají tvořit atd. Dále bylo potřeba do modelu přidat rovnici 3.27 pro výpočet rychlosti zuhelnatění definované dle Hietaniemiho [3]. Aby byla rovnice pro výpočet rychlosti zuhelnatění kompletní, bylo potřebné vložit do modelu všechny pravděpodobnostní hodnoty popsané Hietaniemim [3], které jsou také součástí výpočtu.

```

# Generování výsledků pro každý výpočet
for j in np.arange(0, RUN_NUM, 1):
    A = np.random.uniform(505, 1095)
    B = np.random.uniform(2430, 2550)
    p = np.random.normal(0.50, 0.040)
    rho_0 = 398
    k = np.random.triangular(3.10, 3.55, 4.0)
    eta = np.random.triangular(0.7, 0.82, 0.9)

    C = np.random.triangular(2.75, 3.93, 5.45)

    tau = np.random.triangular(90, 100, 110)
    zeta = np.random.uniform(0.5, 0.65)

    Xi_o2_0 = 21
    delta_Xi = np.random.normal(5.5, 0.4)

    Xi_o2_t2 = delta_Xi + (21 - delta_Xi) ** (-TIME_SIM / 4)
    Xi_o2_t = np.where(TIME_SIM < 20, Xi_o2_t2, delta_Xi)

    fce_Xi_o2_t = zeta + (1 - zeta) * ((1) ** 0.737)

    T_f = excel_data['28-Tv2:'].values[1:560]

    stan_heat_flux = eta * 5.67 * 10 ** (-8) * (T_f + 273.15) ** 4

    rho_value = [rho_0 * (1.0 + omega_d), rho_0 * (1.0 + omega_d), rho_0 * 1.0, rho_0 * 0.93, rho_0 * 0.76, rho_0 * 0.52, rho_0 * 0.38, rho_0 * 0.28, rho_0 * 0.26, rho_0 * 0]
    rho_temp = [0, 120, 200, 250, 300, 350, 400, 600, 800, 1200]
    rho_inter = scipy.interpolate.interp1d(rho_temp, rho_value)
    omega_d = np.random.triangular(0.081, 0.084, 0.088)

    df = pd.DataFrame()
    df_o = pd.DataFrame(index=range(121))
    df_o[f'omega_{j}'] = omega_d * 100

    e = np.exp(-TIME_SIM / tau)
    beta_proba = fce_Xi_o2_t * (((C * (stan_heat_flux) ** p) / ((rho_inter(T_f) + rho_0) * (A + B * omega_d))) * e) * 1000
    integrovane_beta_proba = [0] * len(TIME_SIM)

```

Obr. 5.2: Ukázka kódu z prostředí Python

Tab. 5.1 popisuje pravděpodobnostní rozdělení používaných hodnot. Toto pravděpodobnostní rozdělení každého parametru definoval Hietaniemi v [3]. Pro každý parametr je použito jiné pravděpodobnostní rozdělení. Jsou použity normální, rovnoměrné a trojúhelníkové rozdělení. Význam jednotlivých parametrů je popsán v kapitole 3.3.2.1.

Tab. 5.1: Pravděpodobnostní rozdělení používaných hodnot [3]

Parametry modelu	Pravděpodobnostní rozdělení daného parametru modelu
A	$U(505;1095)$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ $AV=800$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,
B	$U(2430;2550)$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ $AV=2490$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,
C	$\Delta(2,72;5,45;3,93)$ $\text{kW}\cdot\text{m}^2$,
ρ_0	$N(465;93)$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
p	$N(0,5;0,65)$,
$\varepsilon_{eff,avg}$	$\Delta(0,70;0,82;0,90)$,
k	$\Delta(3,10;3,55;4,00)$ $\text{kW}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^2$,
τ	$\Delta(90;100;110)$ min,
ξ	$U(0,50;0,65)$ $AV=0,575$,
$\Delta\chi$	$N(5,5;4,1)$ %,
ω	$U(0,10;0,25)$ $AV=0,175$.
Pozn.: $N(x;y)$ – normální rozdělení $U(x;y)$ – rovnoměrné rozdělení $\Delta(x;y;z)$ – trojúhelníkové rozdělení	

Dále byl do modelu nadefinovaný průběh hustoty v závislosti na teplotě dle ČSN EN 1995-1-2 [6]. Průběh hustoty v závislosti na teplotě je znázorněn v Tab. 5.2.

Tab. 5.2 Vztah teploty a poměru hustoty pro dřevo jehličnatých dřevin

Teplota °C	Poměr hustoty
20	(1 + ω)
99	(1 + ω)
120	(1 + ω)
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

Výpočet rychlosti zuhelnatění dřevěného prvku použitý v modelu je uveden v rovnici 5.1. Pro získání výsledné hloubky zuhelnatění byla provedena integrace rychlosti zuhelnatění v závislosti na čase, viz rovnice 5.1. Zbytek kódu v modelu je tvořen příkazy pro tvorbu grafů, tabulek, výpočet středních hodnot a odchylek, pro následný sběr dat a vyhodnocování řešeného příkladu.

$$\beta = \frac{dx_{char}}{dt} \quad (5.1)$$

5.2 Obecný výpočetní model

Takto vytvořený výpočetní model byl pro úplný obecný stav, se všemi možnými faktory, které mohou při požáru nastat. Před provedením experimentu proběhly výpočty s teplotní normovou křivkou (ISO 834), u které je průběh definován jako:

$$T_f = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (5.2)$$

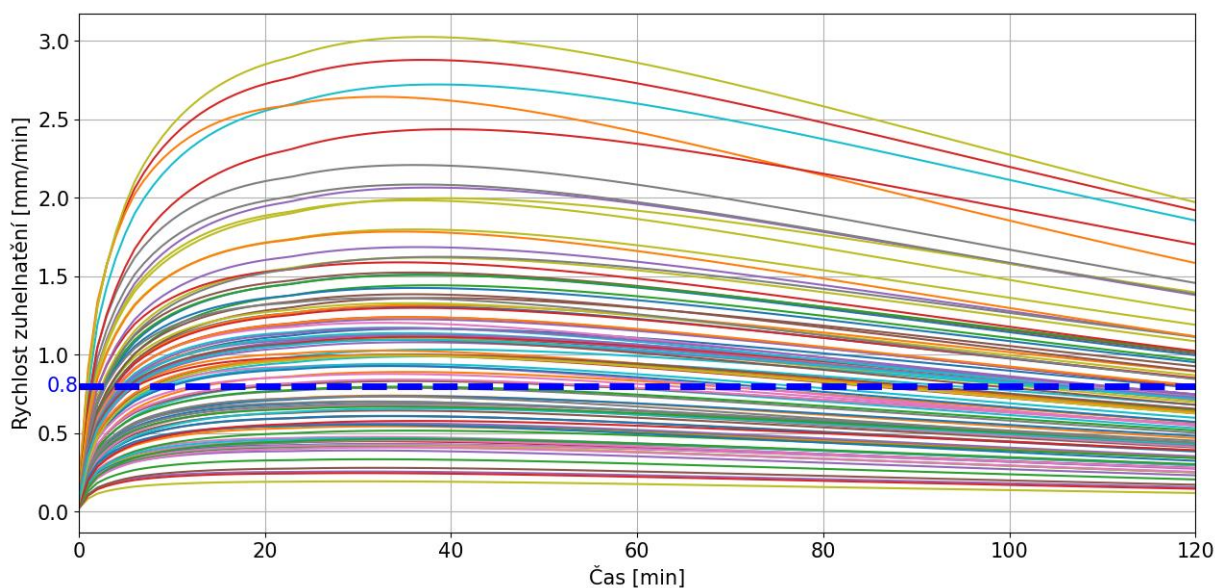
kde:

T_f je teplota plynů [°C],

t čas [min].

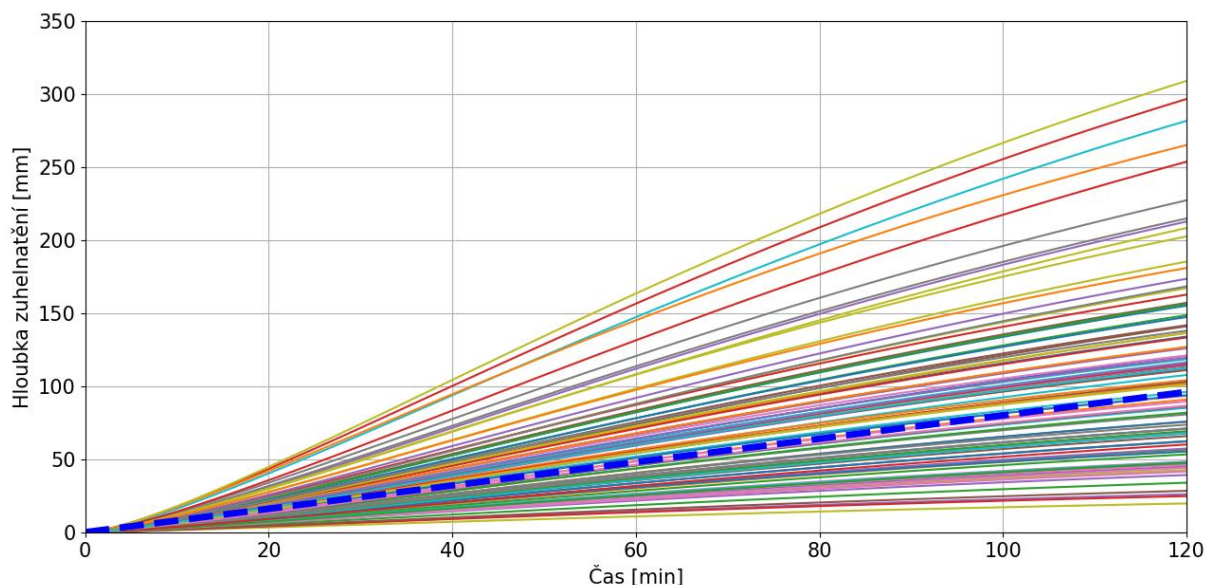
Pro tento průběh teplot bylo možné ověřit to, zda je model nastaven dobře, jelikož průběh rychlosti zuhelnatění je pro normovou teplotní křivku popsán. Rychlost zuhelnatění nejdříve prudce stoupá, ale následně díky izolačním vlastnostem zuhelnatělé vrstvy rychlost zuhelnatění začíná klesat, jelikož se požár dostává hůře k surovému dřevu. Kamenická a kol. [20] popsali různé metody jak určit rychlost zuhelnatění a mezi těmito metodami je také metoda dle Hietaniemi [3], tudíž je možné si grafický průběh rychlosti zuhelnatění také ověřit v této práci.

Pro výpočet byly ponechány veškeré parametry včetně jejich pravděpodobnostního rozptylu hodnot, tak jak je definoval Hietaniemi [3]. Na Obr. 5.3 lze vidět 100 výpočtů vyřešených pomocí výpočetní metody v Pythonu popsané výše v porovnání s normovou rychlostí zuhelnatění definovanou ČSN EN 1995-1-2 [6], která je na obrázku znázorněna modrou tlustou čárkovanou čarou. Z obrázku je vidět, že rychlost zuhelnatění definovaná dle Hietaniemiho je z počátku narůstající, jelikož začíná odhořívát přímo surové dřevo a následně se vlivem zuhelnatělé vrstvy, která surové dřevo chrání od přístupu požáru, rychlost zuhelnatění zpomaluje. Rychlost zuhelnatění je ale také ovlivněna odpadáváním zuhelnatělé vrstvy. Pokud odpadne v některé části prvku zuhelnatělá vrstva, tak nebude surové dřevo izolováno a tím pádem bude rychlost zuhelnatění opět narůstat.

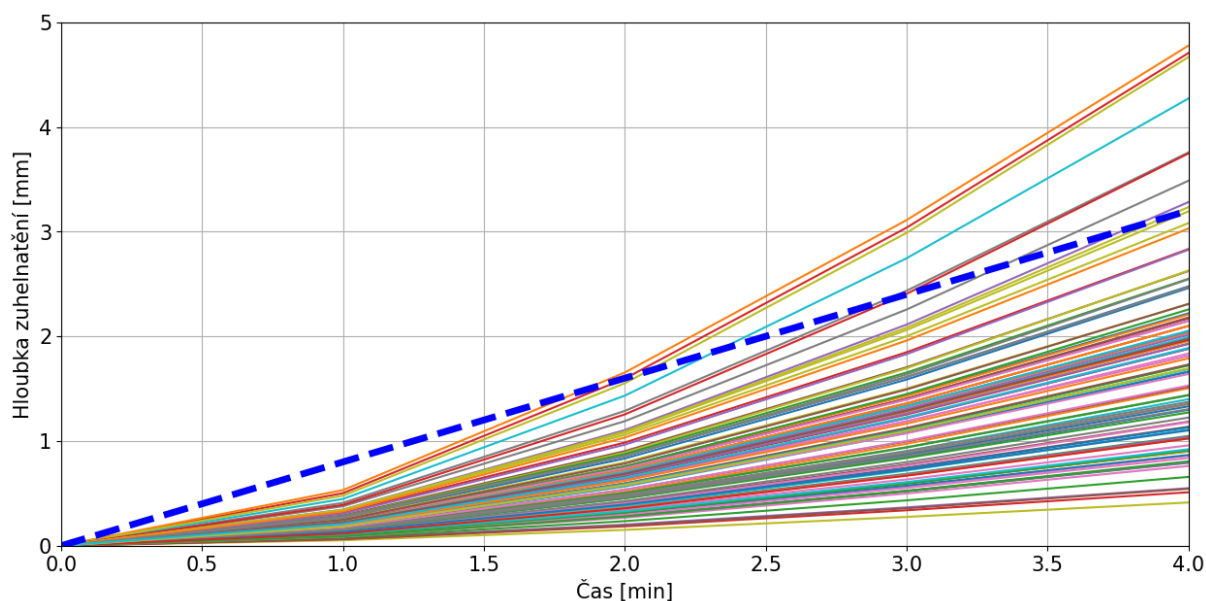


Obr. 5.3: Graf zobrazující 100 výpočtů rychlosti zuhelnatění dle rovnice 3.27 pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovou rychlostí zuhelnatění [3, 6]

Z tohoto výpočtu vychází také průběh hloubky zuhelnatění, který je znázorněn na Obr. 5.4. Hloubka zuhelnatění narůstá exponenciálně, což je vidět na Obr. 5.5, kde je počáteční průběh hloubky zuhelnatění. Jak lze vidět, tak v některých případech nebylo dosaženo hodnot definovaných normou. Zároveň však některé hodnoty byly přesaženy. Pro tento výpočet se 100 průběhy byla stanovena střední hodnota hloubky zuhelnatění rovná 110 mm.



Obr. 5.4: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6]



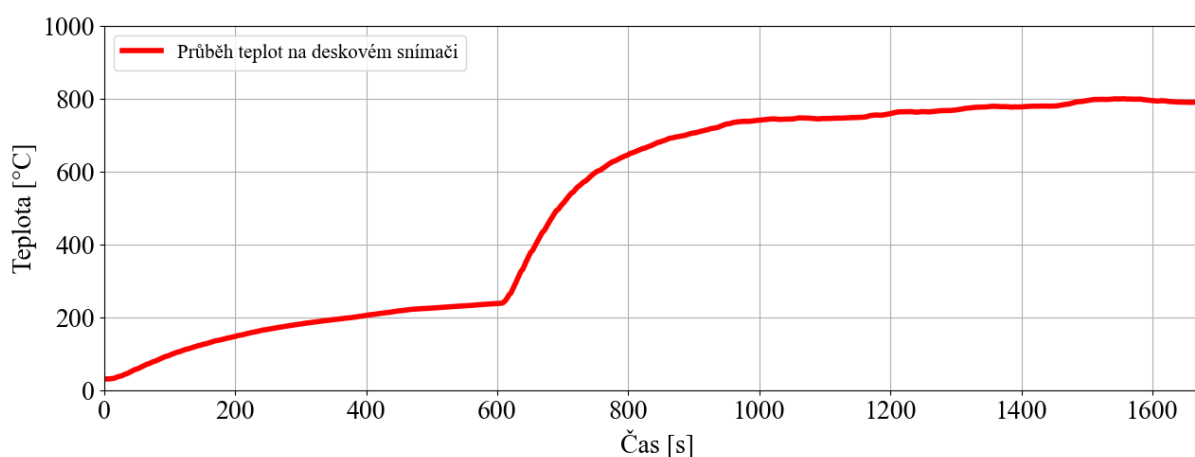
Obr. 5.5 Přibližný průběh hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro normovou teplotní křivku v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6]

5.3 Validace modelu

Numerický výpočet je validován pomocí naměřených hodnot z experimentu. Vypočtené hodnoty hloubky zuhelnatění byly porovnány s hloubkami zuhelnatění, které byly naměřeny v experimentu. Při porovnání výsledných hloubek zuhelnatění z experimentu a numerického modelu vyplyne, pro jaké části sloupu je model použitelný a s jakou přesností. Zkoumanými parametry v numerickém modelu jsou především střední hodnoty a odchylky hloubky zuhelnatění.

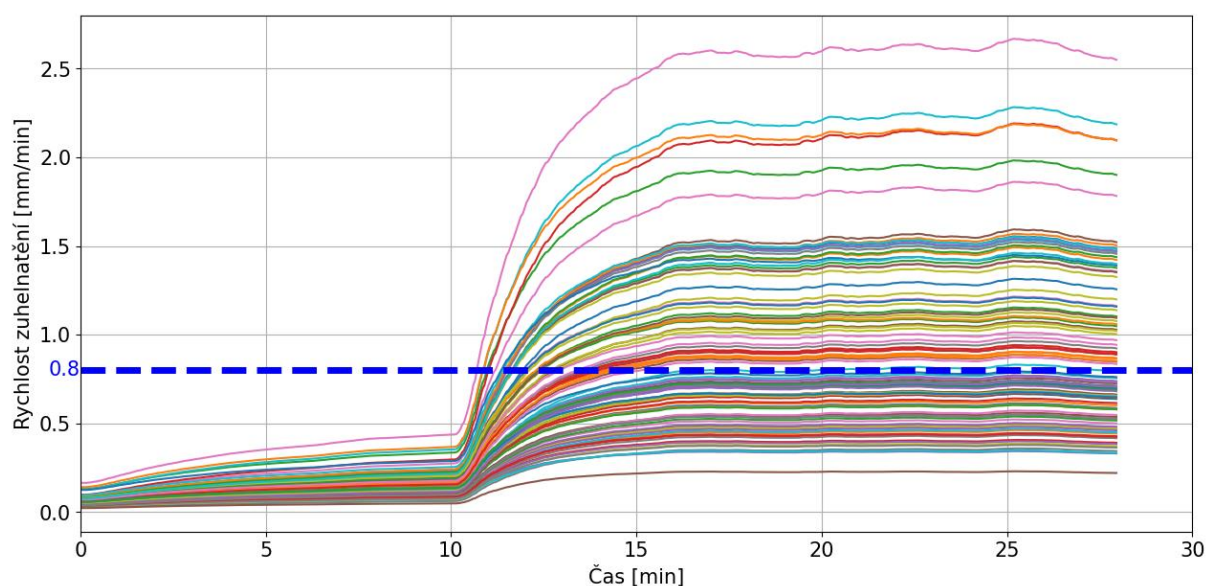
5.3.1 Úprava teplot výpočetního modelu

Výpočetní model byl upraven tak, aby reflektoval experiment. Do modelu byl vložen přesný průběh teplot naměřených na deskových snímačích teploty během experimentu. V modelu byl rovněž zohledněn fakt, že deskový snímač teploty přestal ve 28. minutě fungovat. Průběh teplot zadaný do výpočtu je zobrazen na Obr. 5.6. Na Obr. 5.6 je patrný nárůst teplot po 10. minutě, což je způsobené zvýšením výkonu hořáku.



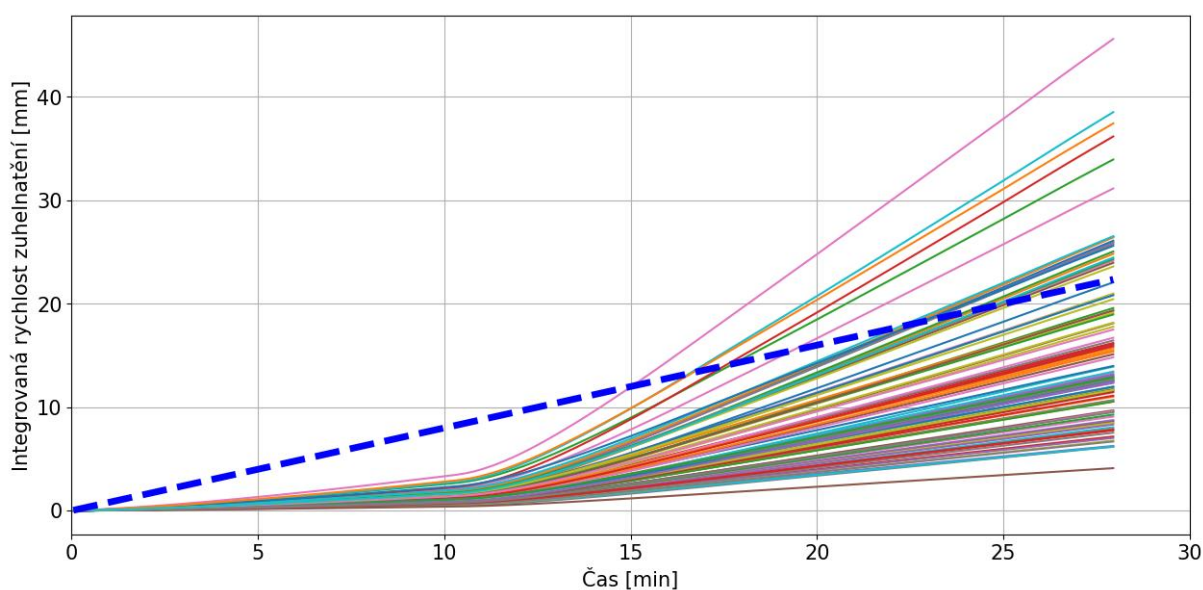
Obr. 5.6: Průběh teplot na deskovém snímači v průběhu experimentu

Po vložení přesných průběhů teplot přirozeného požáru z experimentu do výpočetního modelu je průběh rychlosti a tím i hloubek zuhelnatění odlišný od obecného modelu zohledňující pouze vliv normové teplotní křivky. Při prvních 10 minutách dosahuje normová teplotní křivka cca 680 °C a při experimentu s přirozeným požárem bylo dosaženo cca 240 °C. Na Obr. 5.7 je zobrazen vypočtený průběh rychlosti zuhelnatění pomocí numerického modelu při vložení teplot z experimentu. Rychlost zuhelnatění v prvních 10 minutách nedosahuje ani v největších hodnotách normové hodnoty rychlosti zuhelnatění. Střední hodnota v 10. minutě je pro 100 000 výpočtů 0,15 mm·min⁻¹ a směrodatnou odchylkou 0,07 mm·min⁻¹. Ve 28. minutě je střední hodnota 0,88 mm·min⁻¹ a směrodatná odchylka 0,52 mm·min⁻¹.



Obr. 5.7: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylu hodnot definovaných Hietaniemim pro průběh teplot z experimentu v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění

Hloubky zuhelnatění jsou v první fázi minimální, avšak jejich prudký rozvoj nastává ve 2. fázi, což je způsobeno zvýšením výkonu a tím i teplot uvnitř pece. Na Obr. 5.8 je zobrazen vypočtený průběh hloubek zuhelnatění pomocí numerického modelu při vložení teplot z experimentu. Střední hodnota hloubky zuhelnatění je v 10. minutě pro 100 000 výpočtů 1,17 mm a směrodatnou odchylkou 0,54 mm. Ve 28. minutě je střední hodnota hloubky zuhelnatění 15,76 mm a směrodatná odchylka 8,93 mm.



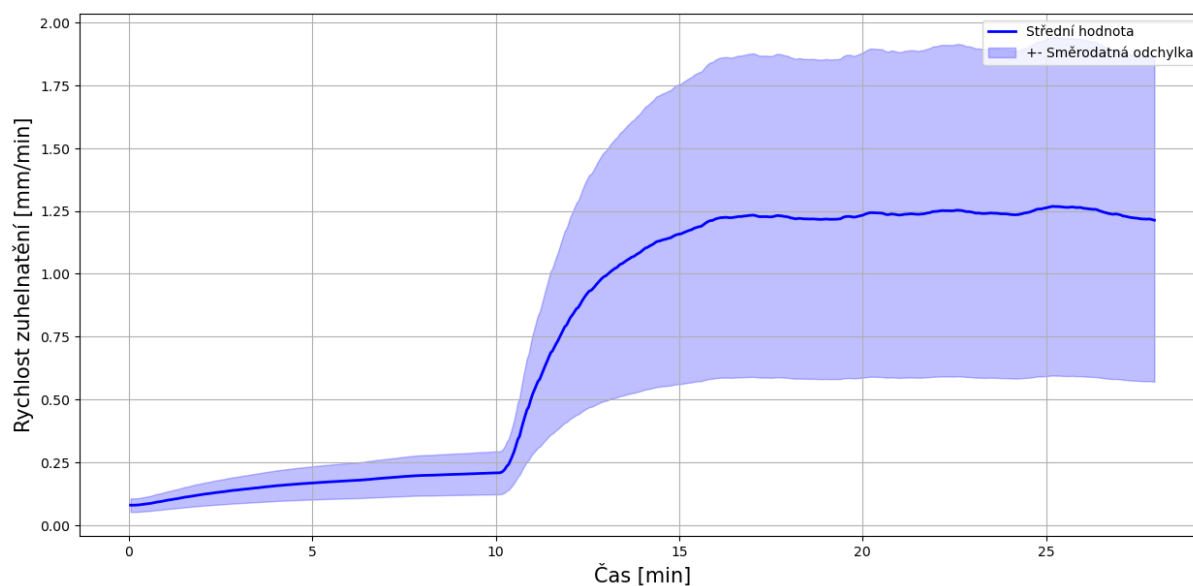
Obr. 5.8: Graf zobrazující 100 výpočtů hloubky zuhelnatění dle rozptylů hodnot definovaných Hietaniemim pro průběh teplot z experimentu v porovnání s normovým průběhem hloubky zuhelnatění [3, 6]

5.3.2 Zpřesnění materiálových charakteristik výpočetního modelu

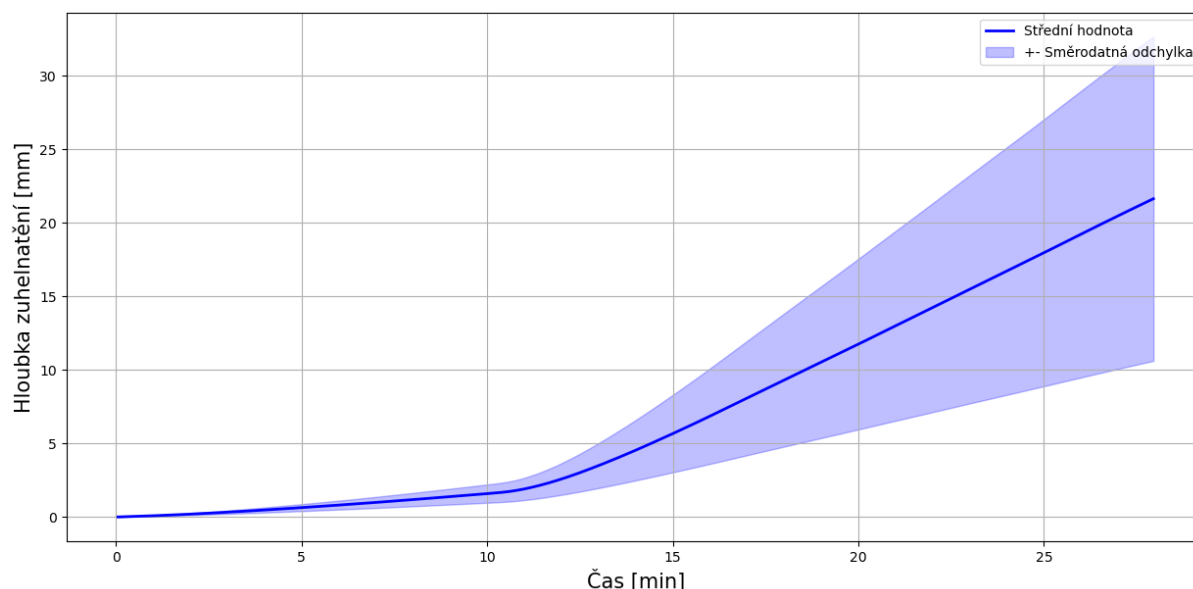
Z interpretovaných výsledků je patrné, že ve výsledcích z výpočtu pomocí pravděpodobnostního rozdělení definovaných dle Hietaniemiho v [3, 6], je velká odchylka, proto byla potřeba výpočty zpřesnit pomocí známých charakteristik dřeva. Známými proměnnými v modelu pro dřevěný sloup, který byl zkoušený v experimentální části, jsou materiálové vlastnosti. Naměřené materiálové vlastnosti jsou objemová hmotnost a vlhkost. Objemová hmotnost dřevěného sloupu byla změřena na $398 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tato hodnota byla vložena do numerického modelu. Naměřená vlhkost se rovnala hodnotě 8,4 %, ale vlhkost oscilovala v rozmezí 8,1 – 8,8 %, z toho důvodu bylo do numerického modelu vloženo toto rozmezí pomocí pravděpodobnostního rozdělení.

Následná řešení byla provedena pro 100 tis. výpočtů, kdy se u výpočtů směrodatná odchylka a střední hodnota ustálila a neliší se pro různé výpočty. Při výpočtu rychlosti zuhelnatění je na Obr. 5.9 vidět stále velká směrodatná odchylka, která narůstá s postupně narůstající teplotou, což je způsobeno narůstajícím čitatelem v rovnici 3.27 a tím i větší funkcí pravděpodobnostních parametrů ve jmenovateli. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění v 10. minutě je pro 100 000 výpočtů $0,21 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatnou odchylkou $0,09 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Ve 28. minutě je střední hodnota $1,21 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka $0,63 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na Obr. 5.10 lze pozorovat průběh hloubek zuhelnatění v závislosti na čase. S narůstající odchylkou rychlosti zuhelnatění narůstá postupně i odchylka střední hodnoty hloubky zuhelnatění. Střední hodnota hloubky zuhelnatění je v 10. minutě pro 100 000 výpočtů 1,61 mm a směrodatnou odchylkou 0,63 mm. Ve 28. minutě je střední hodnota hloubky zuhelnatění 21,53 mm a směrodatná odchylka 10,90 mm. Stále se jedná o velkou odchylku, která při přičtení nebo odečtení směrodatné odchylky od střední hodnoty tvoří rozptyl od 10,63 do 32,43 mm. Tento rozptyl pokrývá naměřené hodnoty pro celý sloup. Hodnoty hloubky zuhelnatění nebyly v žádném naměřeném bodě větší než vypočtené hloubky zuhelnatění.



Obr. 5.9: Zobrazení střední hodnoty a odchylek rychlosti zuhelnatění v závislosti na čase



Obr. 5.10: Zobrazení střední hodnoty a odchylek hloubky zuhelnatění v závislosti na čase

5.3.3 Zpřesnění obsahu kyslíku ve výpočetním modelu

Stále je možné zpřesnit výpočet další známou proměnou, kterou je kyslík. Při experimentu byl po celou dobu zapnut ventilátor, tudíž v potrubí byla neustále hodnota kyslíku 21 %. Tento parametr byl zahrnut do výpočtu upravením původní funkce charakterizující závislost rychlosti zuhelnatění dřeva na koncentraci kyslíku (viz rovnice 5.3), kdy byl podíl kyslíku před začátkem experimentu a podíl kyslíku během experimentu roven nule a tím pádem bylo možné tento zlomek z původní funkce vynechat.

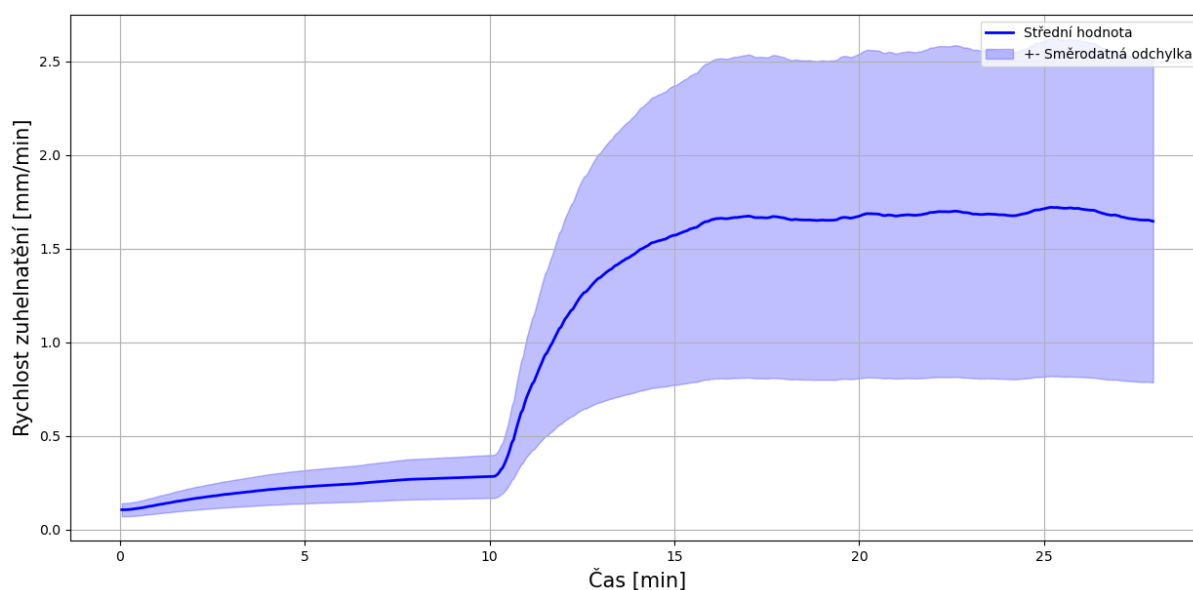
$$f(\chi_{O_2}, t) = \xi + (1 - \xi) \cdot \left(\frac{\chi_{O_2}}{\chi_{O_2}^{(0)}}\right)^{0,737} = \xi + (1 - \xi) \quad (5.3)$$

$f(\chi_{O_2}, t)$ je funkce charakterizující závislost rychlosti zuhelnatění dřeva na koncentraci kyslíku [-],

χ_{O_2} obsah kyslíku v závislosti na čase,

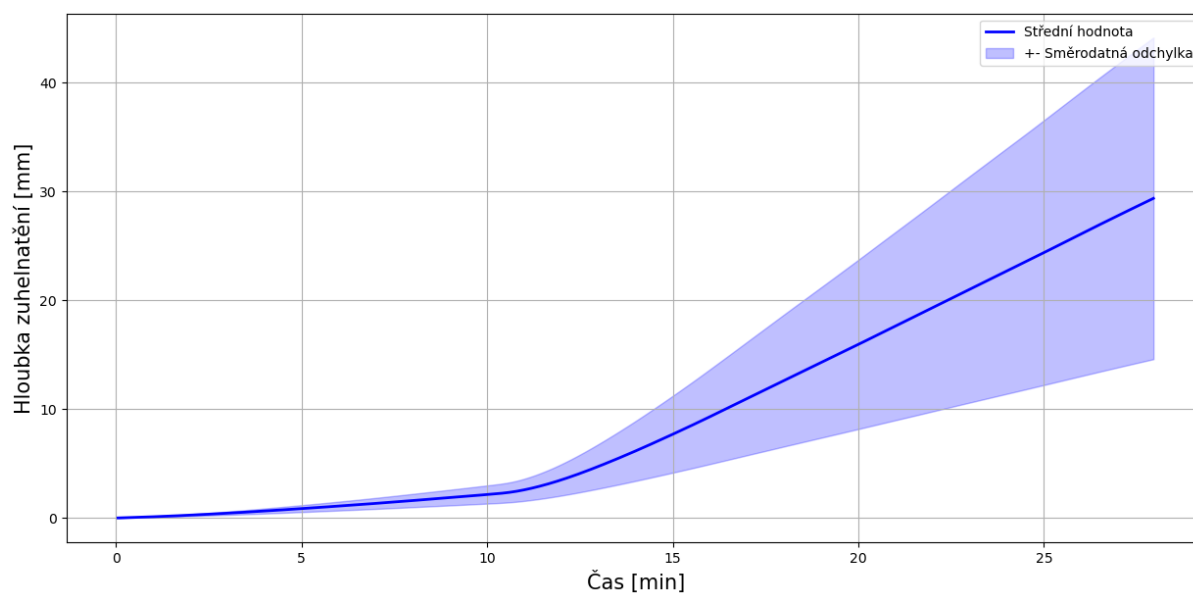
$\chi_{O_2}^{(0)}$ obsah kyslíku na začátku experimentu.

Rychlost zuhelnatění se při zafixování poměru obsahu kyslíku v závislosti na čase a na začátku experimentu na hodnotu 1 zvýšila a na konci experimentu dosahuje hodnot až $2,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zvýšila se střední hodnota rychlosti zuhelnatění, která je v tomto případě na konci výpočtu $1,65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je rovna $0,86 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, viz Obr. 5.11. Střední hodnota se zvýšila, jelikož je ve výpočtu zafixovaná hodnota kyslíku na 21 % a oproti předešlým výpočtům, kdy se mohlo stát, že bylo v místnosti i 16 % kyslíku, je to znatelný rozdíl.



Obr. 5.11: Zobrazení střední hodnoty a odchylek rychlosti zuhelnatění v závislosti na čase při zafixování kyslíku v průběhu experimentu

S rostoucí rychlostí zuhelnatění byla zvýšena i hloubka zuhelnatění, kdy střední hodnota dosahuje hodnot $29,36 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka činí $14,77 \text{ mm}$. Hodnoty hloubky zuhelnatění se tedy pohybují v rozmezí $14,59 - 44,13 \text{ mm}$, viz Obr. 5.12. V tomto rozmezí se nachází celý sloup od hlavy až do výšky 1000 mm . Hodnota hloubky zuhelnatění $29,4 \text{ mm}$ (střední hodnota) byla naměřena v některých řezech a přesažena pouze v hlavě sloupu o $4,5 \text{ mm}$.



Obr. 5.12: Zobrazení střední hodnoty a odchylek hloubky zuhelnatění v závislosti na čase při zafixování kyslíku v průběhu experimentu

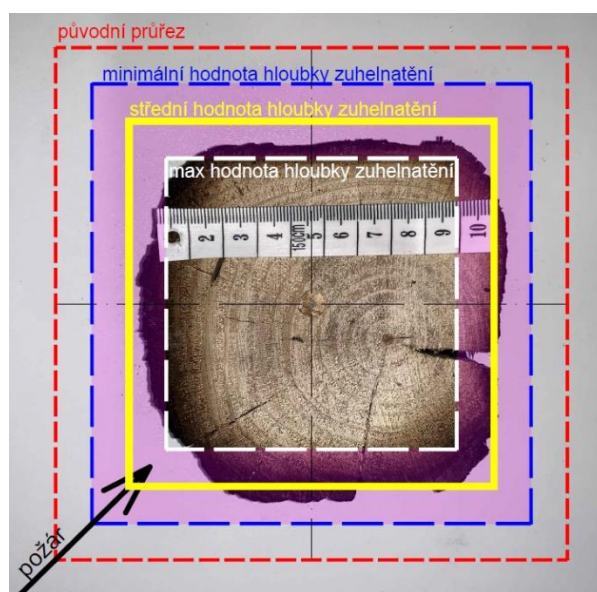
5.3.4 Vyhodnocení získaných výsledků

Při vyhodnocování výsledků z numerického modelu s průřezy v experimentu bylo nejvyšší shody dosaženo ve výpočetním modelu se zpřesněním materiálových charakteristik (viz 5.3.2). Pomocí tohoto zpřesnění se výsledné hodnoty hloubek zuhelnatění vypočtené na základě teploty na deskovém snímači nelišily od výsledků naměřených experimentálně ve většině průřezech. Data získaná z experimentu se v některých místech lišila oproti vypočteným hodnotám, ale jednalo se o průřezy pod výškou 1000 mm a na stranách nevystavených požáru. Pokud bychom měli teploty ze stran nevystavených požáru, bylo by vhodné vypočítat hodnoty i pro strany nevystavené požáru a tím ověřit správnost výpočtů. Na Obr. 5.13 jsou znázorněny průřezy ve výškách 1920, 1800, 1700 a 1600 mm, na kterých je vidět, že průřezy ve všech místech vychází ve vypočteném rozmezí hloubek zuhelnatění.

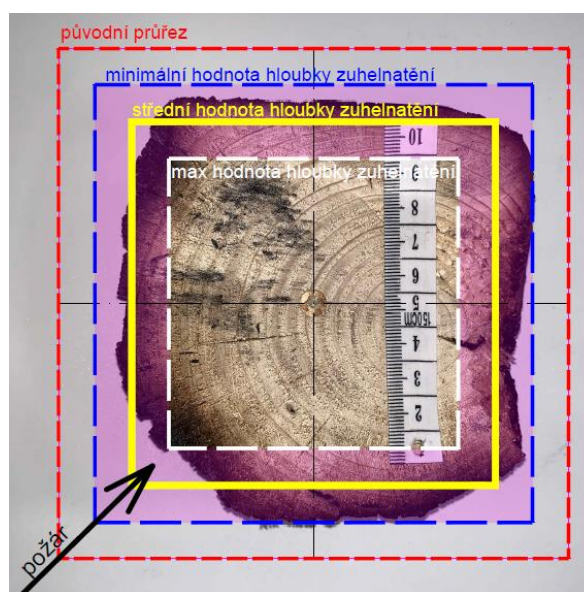
Hodnoty získané úpravou teplot výpočetního modelu (viz 5.3.1) se pohybovaly v menších hodnotách, jelikož zde byly zahrnuty všechny možné hodnoty pro vlhkost a objemovou hmotnost, kterých mohlo dřevo dosáhnout. Z tohoto výpočtu je zřejmé, jak objemová hmotnost a vlhkost ovlivní výslednou hodnotu hloubky zuhelnatění. Tyto dvě hodnoty by měly být známy i při návrhu. KVH hranoly se na stavbu dodávají s vlhkostí 15 %, s odchylkou ± 3 % (jedná se o zvýšený požadavek oproti normě ČSN 73 0824-1 [27]). Tyto hodnoty by se daly do výpočtu zahrnout pomocí stejného pravděpodobnostního výpočtu, který byl nastavený ve zpřesnění materiálových charakteristik, jen s jinými hodnotami. Objemová hmotnost KVH hranolů se liší podle výrobce, ale pohybuje se v rozmezí $400\text{--}450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Hodnoty získané zpřesněním obsahu kyslíku ve výpočetním modelu se dostávaly do vyšších hodnot, což bylo způsobeno neustálou hodnotou kyslíku nastavenou na 21 %. Jednalo se o hodnotu v potrubí a nevíme, jaká přesná hodnota byla v požární místnosti. Z toho důvodu byla ve výpočtech nakonec ponechána funkce charakterizující závislost rychlosti zuhelnatění dřeva na koncentraci kyslíku dle Hietaniemi [3].

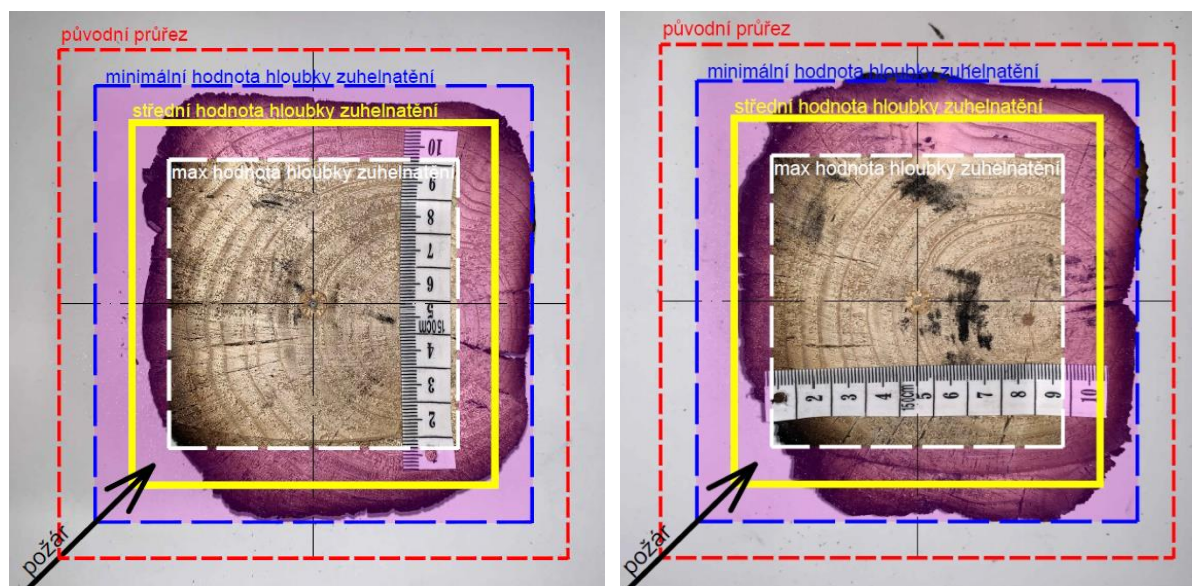
Při porovnání všech třech zpřesněných výpočtů je patrné, jak použité proměnné mají vliv na výslednou hloubku zuhelnatění. Z toho vyplývá, že rychlost zuhelnatění je závislá na více faktorech. U vlhkosti se prokázal předvídatelný fakt, že čím je menší vlhkost, tím větší bude rychlost zuhelnatění. To samé platí pro objemovou hmotnost, která byla zafixovaná pro menší hodnotu, než byla střední hodnota pravděpodobnostní rozdělení definované dle Hietaniemi [3]. Pro kyslík platí, že čím je větší procentuální zastoupení kyslíku ve vzduchu, tím větší je rychlost zuhelnatění. Je to způsobeno tím, že kyslík podporuje hoření a umožňuje, aby všechny materiály zápalné na vzduchu hořely intenzivněji. To samé platí pro výkon hořáku a tím dosažených teplot u prvků. Výsledky rychlostí zuhelnatění pro různé průběhy výkonů a teplot jsou popsány v kapitole 6, která představuje citlivostní analýzu a zkoumání výpočetního modelu.



a) Řez sloupu ve výšce 1920 mm



b) Řez sloupu ve výšce 1800 mm

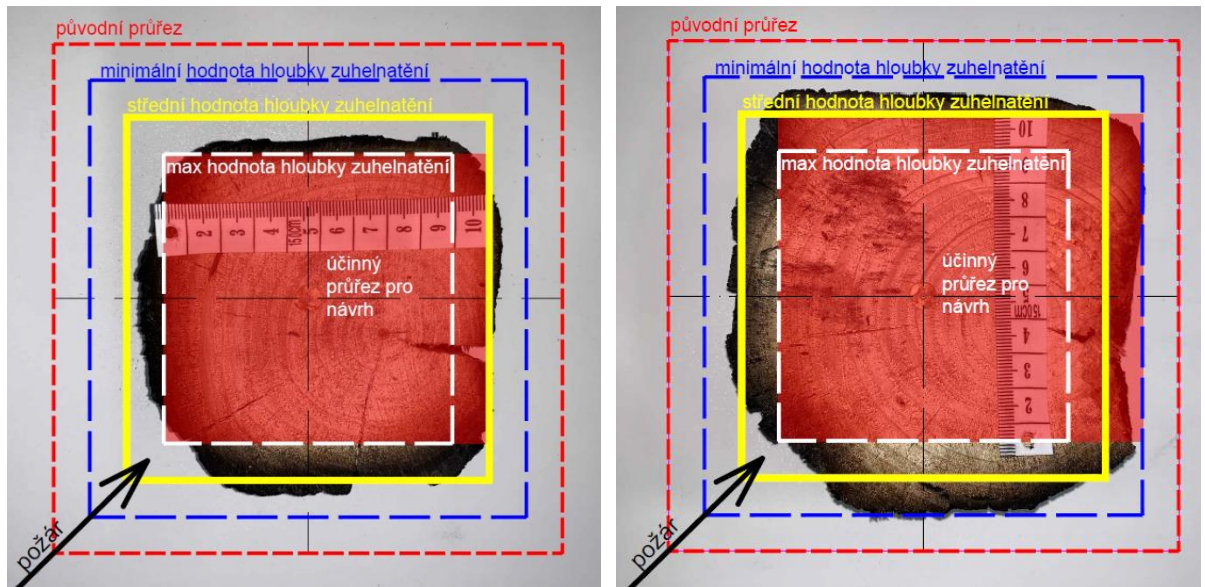


c) Řez sloupu ve výšce 1700 mm

d) Řez sloupu ve výšce 1600 mm

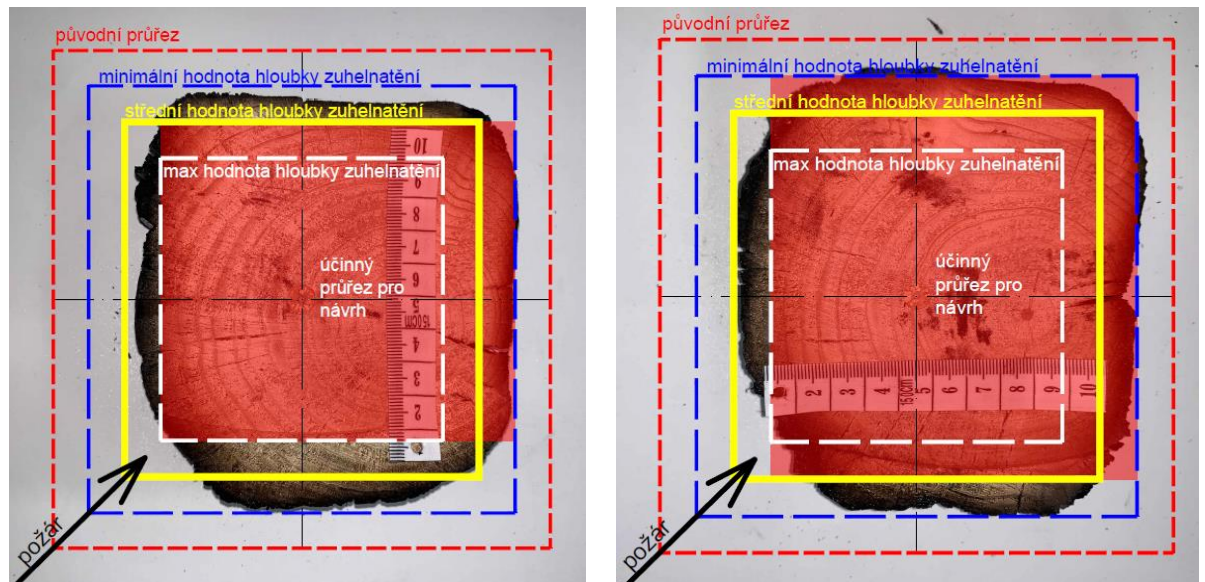
Obr. 5.13: Obrázek s čtyřmi dílčími řezy v porovnání s vypočtenými hodnotami

Na zkoumaných řezech je vizuálně vidět zbytkový průřez prvku, který je možné použít při návrhu. Na Obr. 5.14 jsou popsány jednotlivé průřezy, u kterých je znázorněn jejich účinný průřez, který je možné použít pro výpočet. Výhodné u této varianty je, že je možné odečíst její plochu, jelikož se jedná o pravoúhlý průřez. Ve výšce 1920 mm je účinný průřez tvořen převážně z maximální hodnoty hloubky zuhelnatění, a na pravé straně střední hodnotou hloubky zuhelnatění. Pravá strana na obrázcích je strana, která není ovlivňována hořením od okolních sloupů. Ve výšce 1800 mm dosahují strany průřezu, které byly vystavené požáru, stále maximálních hodnot hloubky zuhelnatění. Rozdílné jsou ale zbylé dvě strany, kdy pravá strana, která není ovlivněna okolními sloupy dosahuje minimálních hodnot hloubky zuhelnatění a vrchní strana, u které hořely sloupy 2 a 3, dosahuje středních hodnot hloubky zuhelnatění. Ve výšce 1700 mm je to obdobné jako pro výšku 1800 mm. S klesající výškou se zvětšuje i účinný průřez, kdy je možné pro výšku 1600 mm určit účinný průřez pro levou stranu z maximální hodnoty, pro spodní stranu ze střední hodnoty a pro pravou a vrchní stranu je účinný průřez tvořen minimální hodnotou.



a) Řez sloupu ve výšce 1920 mm

b) Řez sloupu ve výšce 1800 mm



c) Řez sloupu ve výšce 1700 mm

d) Řez sloupu ve výšce 1600 mm

Obr. 5.14: Účinné průřezy pro návrh v různých průřezech

Takto navržený účinný průřez nám může pomoci při návrhu zmenšit náklady na stavbu, jelikož při návrhu pomocí normového postupu dle ČSN EN 1995-1-2 [6] by byla hloubka zuhelnatění ze všech stran stejná a tím pádem by byl účinný průřez menší, než by ve skutečnosti vyšel. Nebo

v opačném případě zlepšit požární bezpečnost stavby, jelikož jak již bylo zmíněno, hloubka zuhelnatění dle normového postupu při vystavení požáru po dobu 30 minut je 24 mm při zahrnutí vlivu vedení v rozích, což pro daný prvek vychází jen v některých místech.

Nejlepším řešením, pro výpočet každé strany průřezu, je výpočet dopadajícího tepelného toku na každou stranu a tím i výpočet výsledné hloubky zuhelnatění pro různé strany, což je možné zohlednit ve výpočtu, kde by byl pozměněn výpočet tepelného toku. Další z možností by bylo naměřit dopadající teploty na každou stranu prvku a tyto hodnoty teplot následně zadat do výpočetního modelu a tím i napočítat výsledné hloubky zuhelnatění pro každý prvek.

6 Parametrická studie

V této kapitole je hlouběji zkoumán výpočetní model vytvořený pomocí programovacího jazyku Python. Pomocí tohoto výpočetního modelu lze zkoumat vstupní hodnoty, které lze libovolně měnit a zkoumat tak, jak ovlivní hodnoty výsledné. Parametrická studie v této kapitole má za cíl prozkoumat vliv požárního scénáře, tedy požárů s různou intenzitou či různou dobou trvání na výsledné hloubky zuhelnatění. Pro výpočty v této části je použit model, který byl definován v modelu zpřesněném o materiálové vlastnosti (viz 5.3.2). Tento model byl nejpřesnější a výsledné hodnoty jsou považovány za validované.

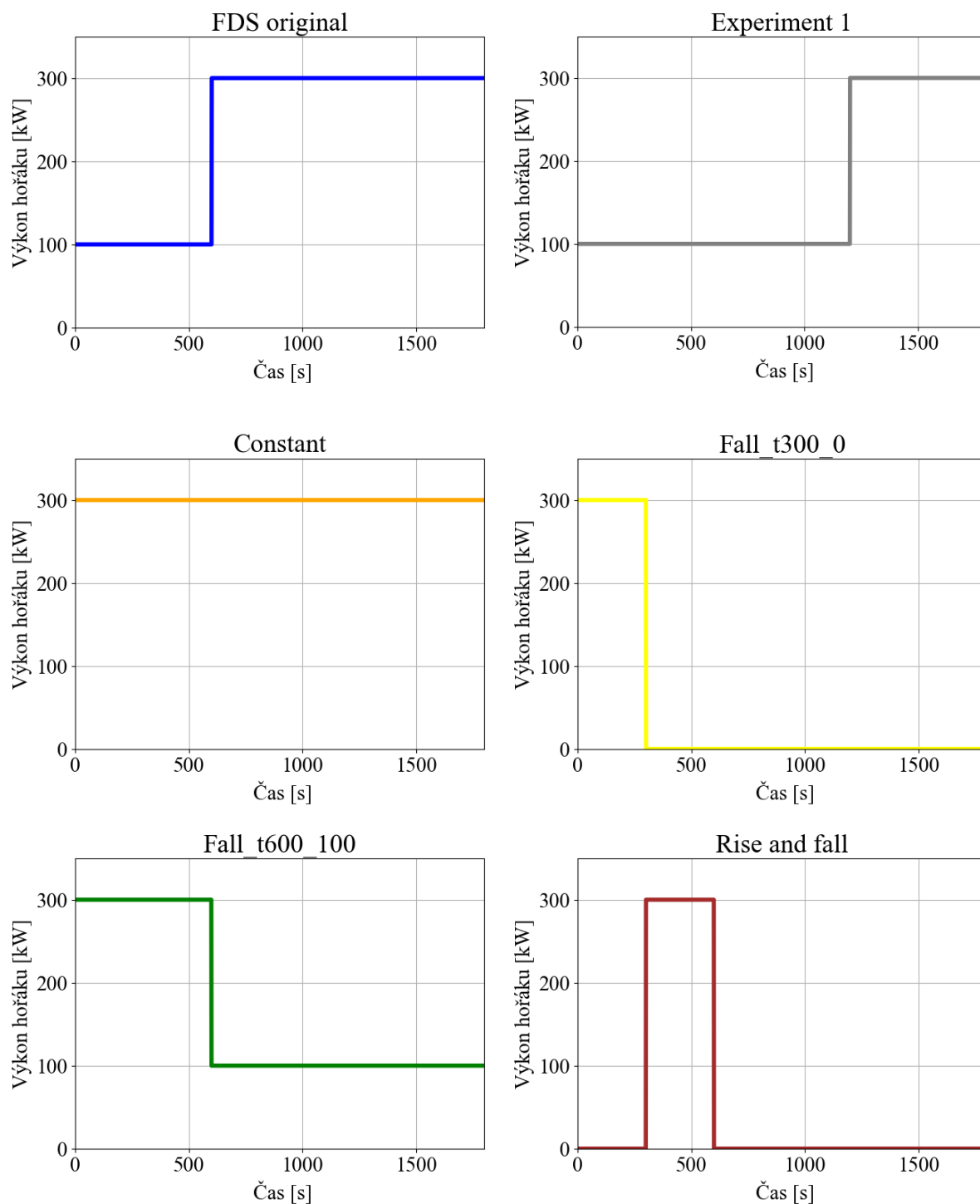
6.1 Parametrická studie výkonu hořáku

6.1.1 Parametr studie

Pro parametrickou studii zkoumající vliv požárního scénáře byly použity výkony hořáku a průběhy teplot dle Křišťanové [28]. Křišťanová [28] si kladla za cíl vyvolat různé typy požárů, které by se lišily v průběhu času. Její záměrem bylo dosáhnout požárních scénářů s různou rychlostí rozvoje, odlišnou délkou klesající fáze a dalšími charakteristikami.

Křišťanová [28] pro simulaci různých požárních scénářů navrhla 6 scénářů výkonů hořáku. Ve všech simulacích byl použit stejný maximální výkon hořáku a to 300 kW, který je stejný jako u řešeného experimentu. Díky stejným maximálním výkonům je zajištěna určitá porovnatelnost výsledků.

První simulace (FDS original) je stejná jako u řešeného experimentu, tedy prvních 10 minut výkon 100 kW a po zbylých 30 minut je výkon 300 kW. Druhá simulace (Experiment 1) se liší pouze v době počáteční fáze, kdy je výkon 100 kW nastaven po dobu 20 minut a po zbylých 10 minut je výkon 300 kW. Tyto simulace představují požáry pouze s rostoucí fází. Třetí simulace (Constant) je model s výkonem 300 kW. Čtvrtá a pátá simulace (Fall_t300_0 a Fall_t600_100) simuluje požár včetně jeho klesající fáze, kde z původních 300 kW klesá výkon hořáku na 0 nebo 100 kW v různých časech. Šestá simulace (Rise and fall) simuluje požár s rostoucí i klesající fází. Výkony hořáku všech simulací jsou uvedeny na Obr. 6.1.

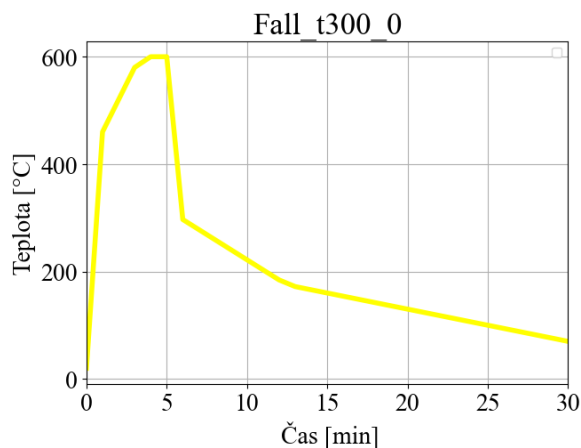
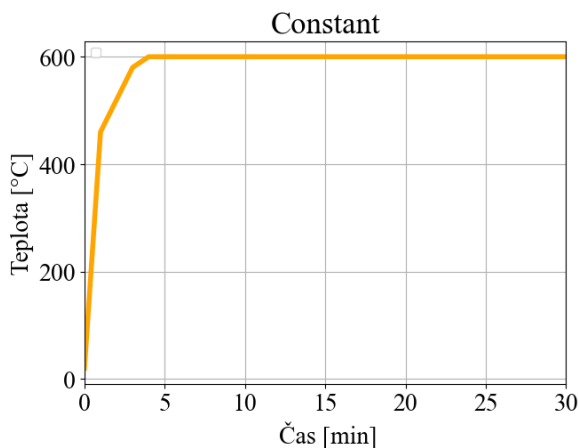
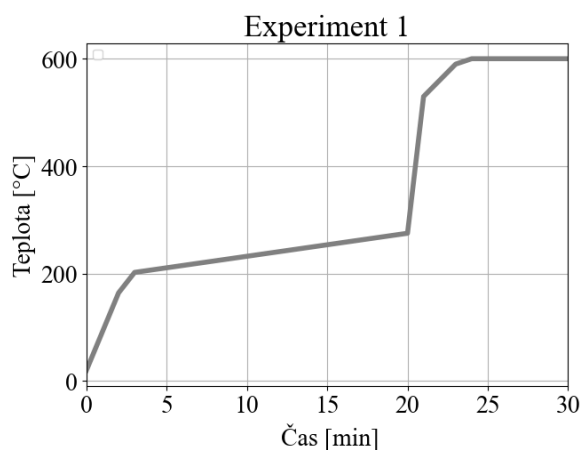
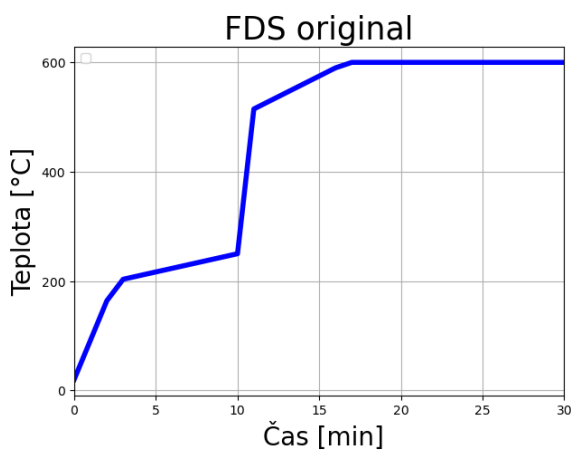


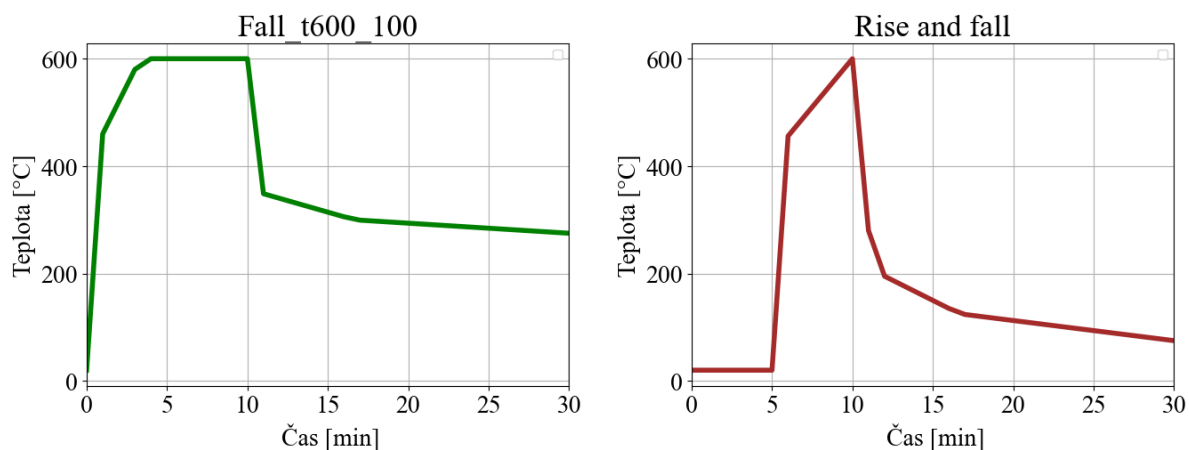
Obr. 6.1: Průběhy výkonů

Křišťanová [28] měla jiné rozmístění sloupů v peci, proto jsou její maximální teploty jiné než při experimentu popsáném v této práci. Také se jedná o teploty přímo nad hořákem a nejedná se o teploty z deskového snímače, které byly dodávány do řešeného výpočetního modelu. Jedná se o parametrickou studii, která porovnává, jaký vliv má výkon hořáku na hloubku zuhelnatění, a proto bylo možné data z předchozího výzkumu použít. Na Obr. 6.2 lze vidět průběhy teplot, které kopírují průběh teplot vypočtené Křišťanovou. Nejedná se o přesné hodnoty naměřené při jejich

výpočtech, ale o zjednodušený průběh definovaný lineárním průběhem jí naměřených teplot. Průběh teplot kopíruje průběh teplot vypočtený pomocí programu FDS, kdy jsou ponechány maximální teploty v různých časech a tyto vrcholy jsou pospojovány pomocí lineárních rovnic. Tento postup je pro citlivostní analýzu postačující, jelikož by ve výsledku měl být vidět vliv výkonu hořáku na výsledné hloubce zuhelnatění.

Do výpočetního modelu byly postupně zadávány jednotlivé zjednodušené průběhy teplot, pro které byly následně vypočteny střední hodnoty a směrodatné odchylky. Tyto hodnoty poté sloužily k vyhodnocení parametrické studie





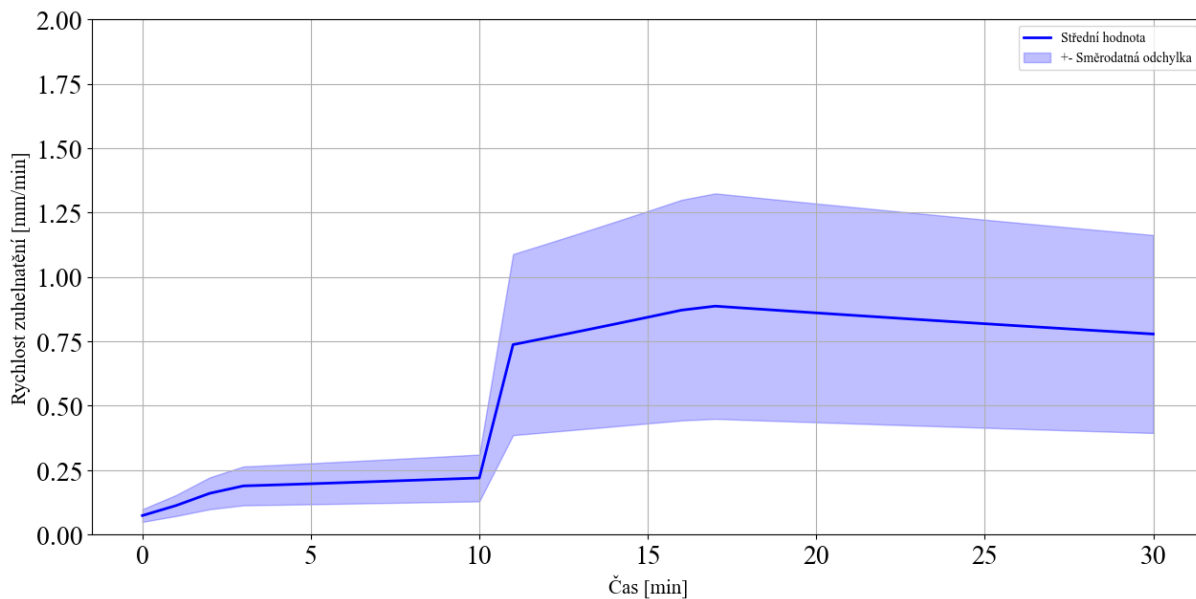
Obr. 6.2: Průběhy teplot pro různé výkony hořáků

6.1.2 Výsledky parametrické studie

6.1.2.1 Simulace FDS original

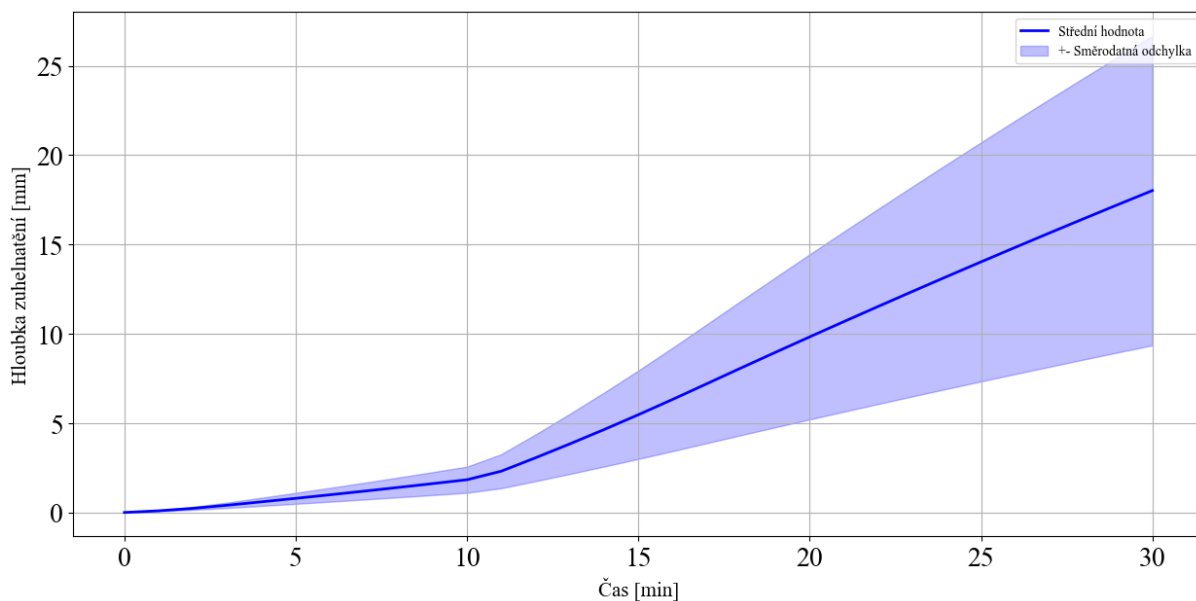
V první simulaci je výkon hořáku nastavený stejně jako v řešeném experimentu. Teploty pomalu narůstají do 10. minuty, kde dosahují teplot cca 250 °C, následně se teploty rapidně zvýší, což je způsobeno přidáním výkonu. Teploty dosahují v této fázi 600 °C.

Rychlost zuhelnatění (viz Obr. 6.3) má podobný průběh jako průběh teplot. Kdy z počátku téměř neodhořívá, ale při změně výkonu se rychlost zuhelnatění zvýší. Nejvyšší rychlost zuhelnatění je cca v 17. minutě a poté začne rychlost zuhelnatění klesat, díky vrstvě zuhelnatění, který začne původní prvek izolovat. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění v 17. minutě je $0,89 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,44 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 30. minutě je $0,77 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,38 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 6.3: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci FDS original

Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.4) má obdobný průběh jako při řešeném experimentu. Rozdíl je pouze v menším nárůstu zuhelnatělé vrstvy, což je způsobeno menšími dosaženými teplotami oproti experimentu. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 18,02 mm a odchylka je 8,66 mm.

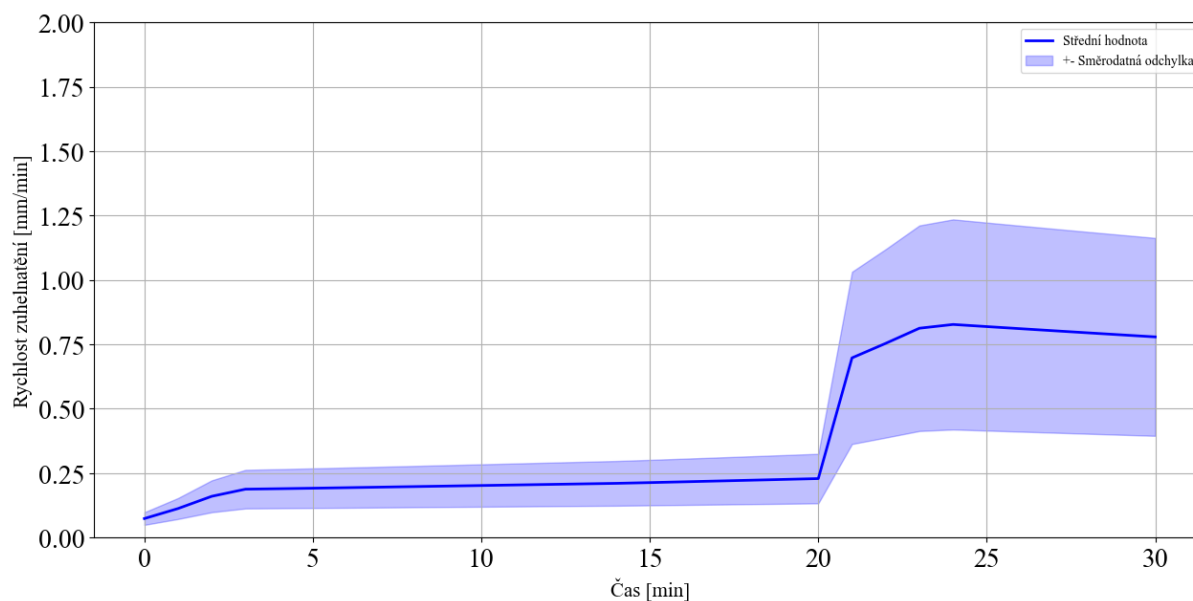


Obr. 6.4 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci FDS original

6.1.2.2 Simulace Experiment 1

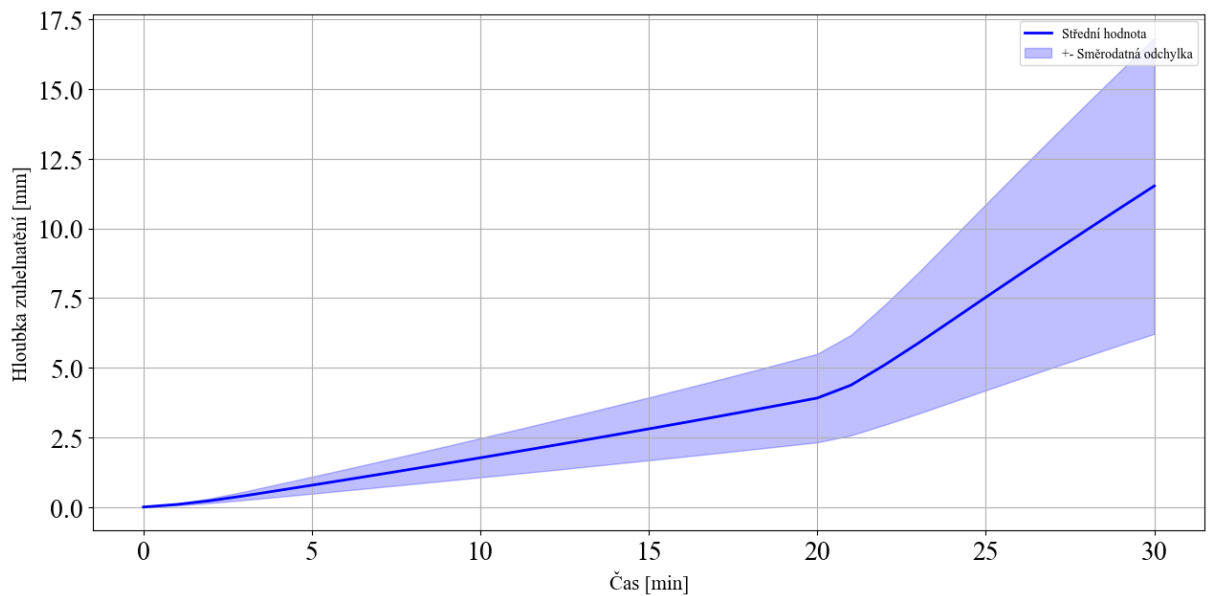
Druhá simulace je výkon hořáku nastavený do 20. minuty na 100 kW a následně skok na 300 kW. Teploty pomalu narůstají do 20. minuty, kde dosahují teplot cca 275 °C, následně se teploty rapidně zvýší, což je způsobeno přidáním výkonu. Teploty dosahují v této fázi 600 °C.

Stejně jako v první simulaci má rychlost zuhelnatění podobný průběh jako průběh teplot. Kdy z počátku téměř neodhořívá, ale při změně výkonu se rychlost zuhelnatění zvýší. Na Obr. 6.5 je zobrazen celý průběh rychlostí zuhelnatění během výpočtu. Nejvyšší rychlost zuhelnatění je cca v 23. minutě a poté začne rychlost zuhelnatění klesat. Průběh rychlosti zuhelnatění se podobá 1. simulaci (FDS Original), akorát se zpožděním 10 minut. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění v 23. minutě je $0,81 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,40 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 30. minutě je $0,78 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,38 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 6.5: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Experiment 1

Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.6) do 20. minuty téměř nenarůstá, ale poté díky zvýšení výkonu na 300 kW začne narůstat, což odpovídá průběhu rychlostí zuhelnatění zobrazeném na Obr. 6.5. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 11,52 mm a odchylka je 5,31 mm.

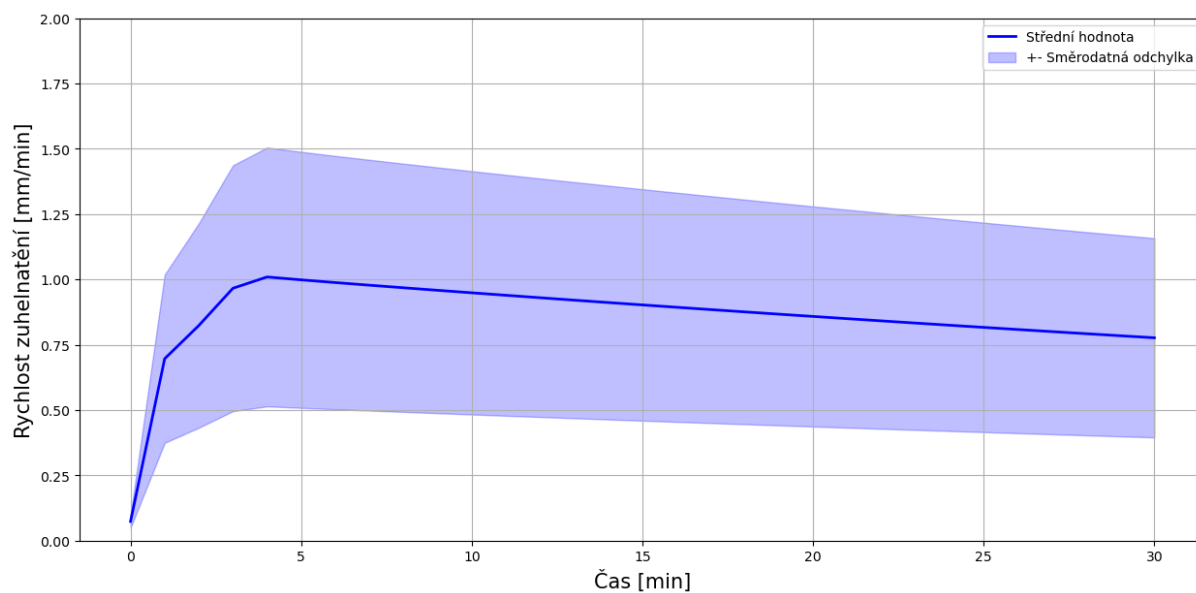


Obr. 6.6 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Experiment 1

6.1.2.3 Simulace Constant

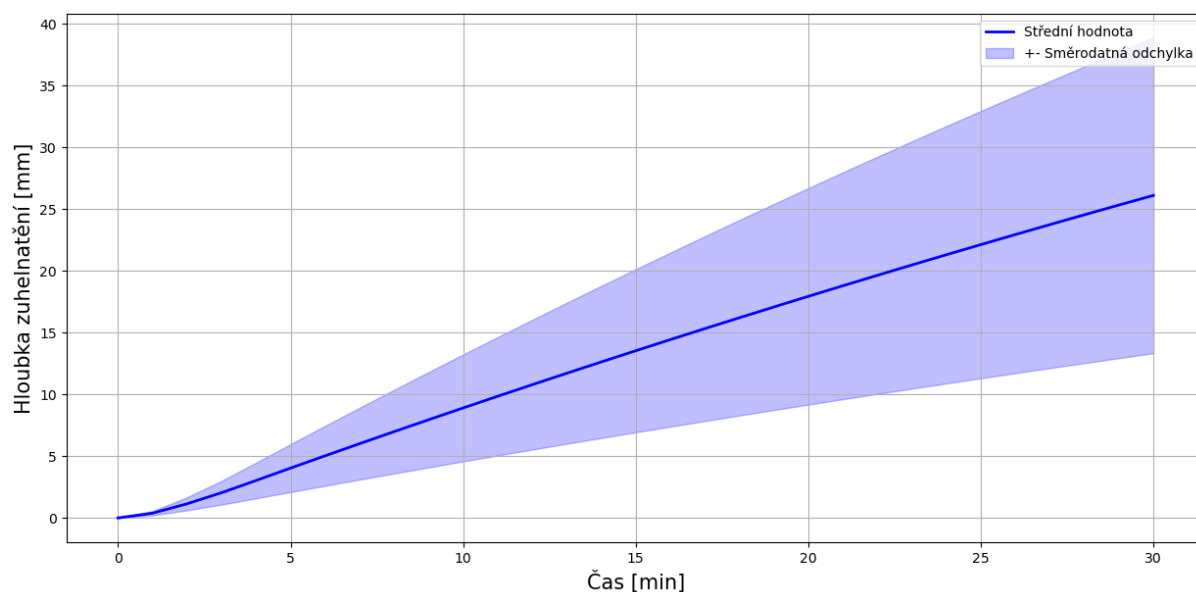
Třetí simulace odpovídá výkonu hořáku nastaveného po celou dobu na 300 kW. Průběh teplot má vizuálně podobný nárůst jako normová teplotní křivka, s rozdílem že jsou dosaženy maximálně teploty 600 °C, což je způsobeno výkonem.

Průběh rychlosti zuhelnatění (viz Obr. 6.7) narůstá v podobné tendenci jako normová teplotní křivka a při dosažení maximální teploty začne rychlost zuhelnatění pomalu klesat. Nejvyšší rychlost zuhelnatění je dosažena ve 3. minutě. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění v 3. minutě je 1,00 mm·min⁻¹ a směrodatná odchylka je 0,50 mm·min⁻¹. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 30. minutě je 0,78 mm·min⁻¹ a směrodatná odchylka je 0,38 mm·min⁻¹.



Obr. 6.7: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Constant

Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 26,09 mm a odchylka je 12,77 mm. Hloubka zuhelnatění v tomto případě dosahuje nejvyšších hodnot, což je způsobeno nejvyšším průměrem teplot v průběhu experimentu. Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.8) narůstá po celou dobu řešeného výpočtu.

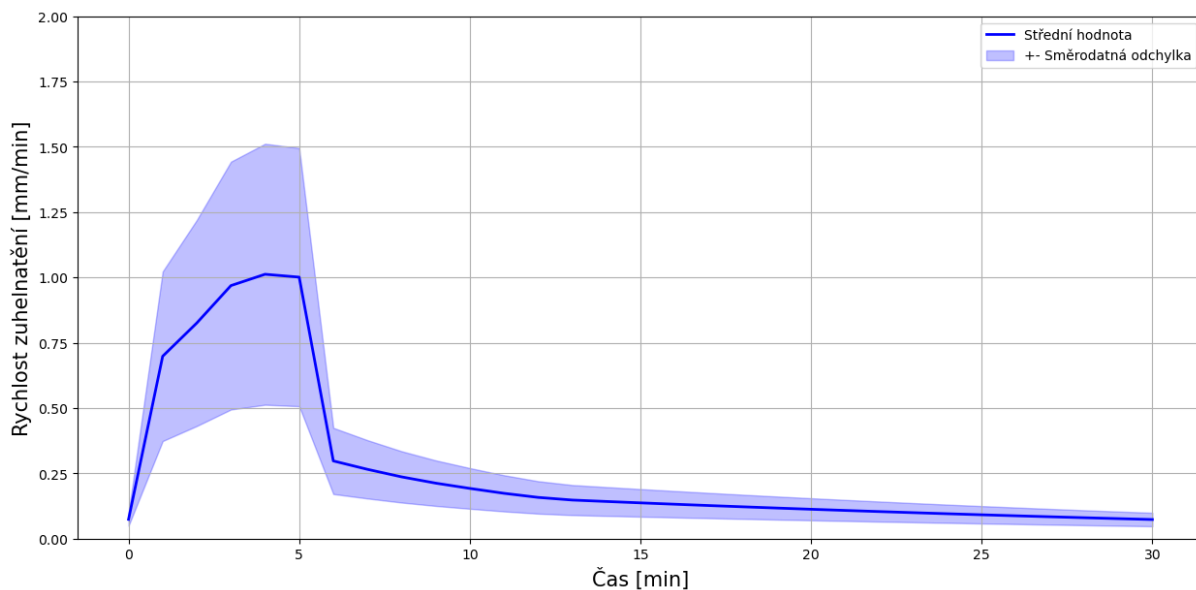


Obr. 6.8 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Constant

6.1.2.4 Simulace Fall_t300_0

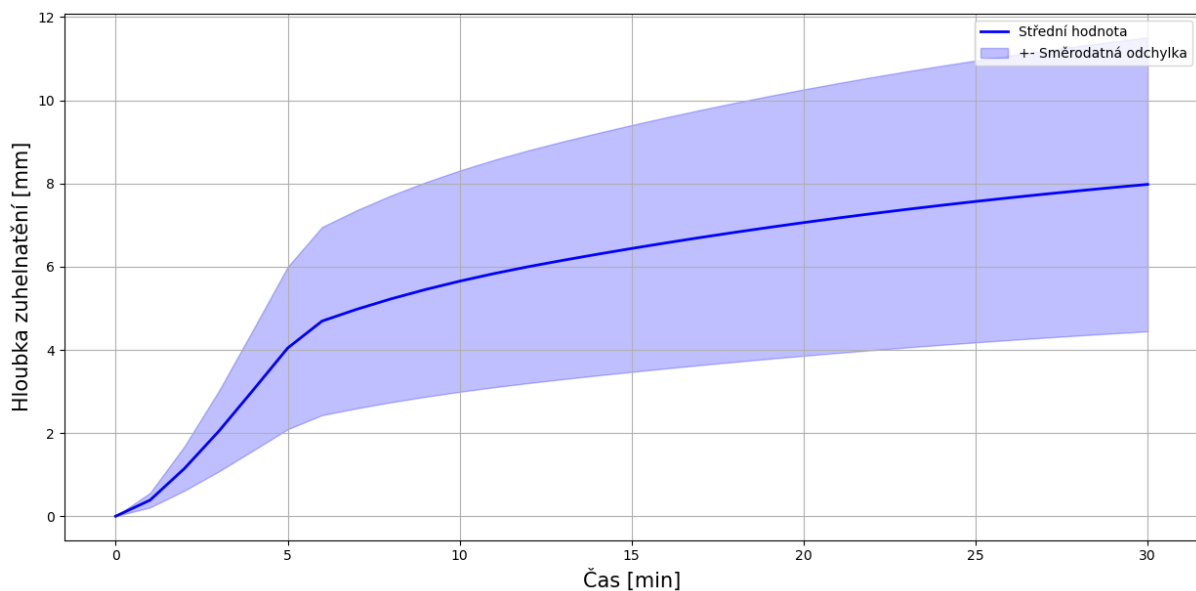
Čtvrtá simulace je výkon hořáku nastavený do 5. minuty na 300 kW a následně vypnutí hořáku. Teploty narůstají do 5. minuty jako při 3. simulaci (Constant) a poté začnou klesat.

Rychlost zuhelnatění (viz Obr. 6.9) naroste stejně jako ve třetí simulaci (Constant) a dosahuje nejvyšší rychlosti zuhelnatění $1,00 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Poté začne rychlost zuhelnatění klesat a v závěru dřevo neodhořívá.



Obr. 6.9: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Fall_t300_0

Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 7,98 mm a směrodatná odchylka je 3,53 mm. Střední hodnota hloubky zuhelnatění v 5. minutě je 4,05 mm se směrodatnou odchylkou 1,95 mm. Následně vypnutím hořáku dřevo pouze dohořívá, což je z Obr. 6.10 čitelné.

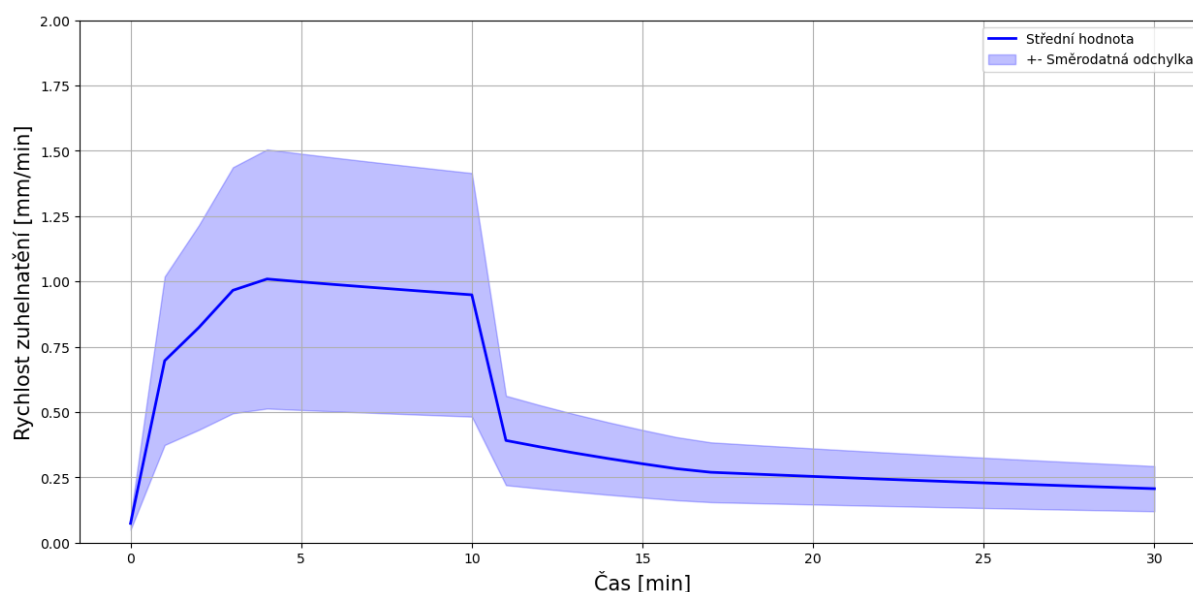


Obr. 6.10 Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Fall_t300_0

6.1.2.5 Simulace Fall_t600_100

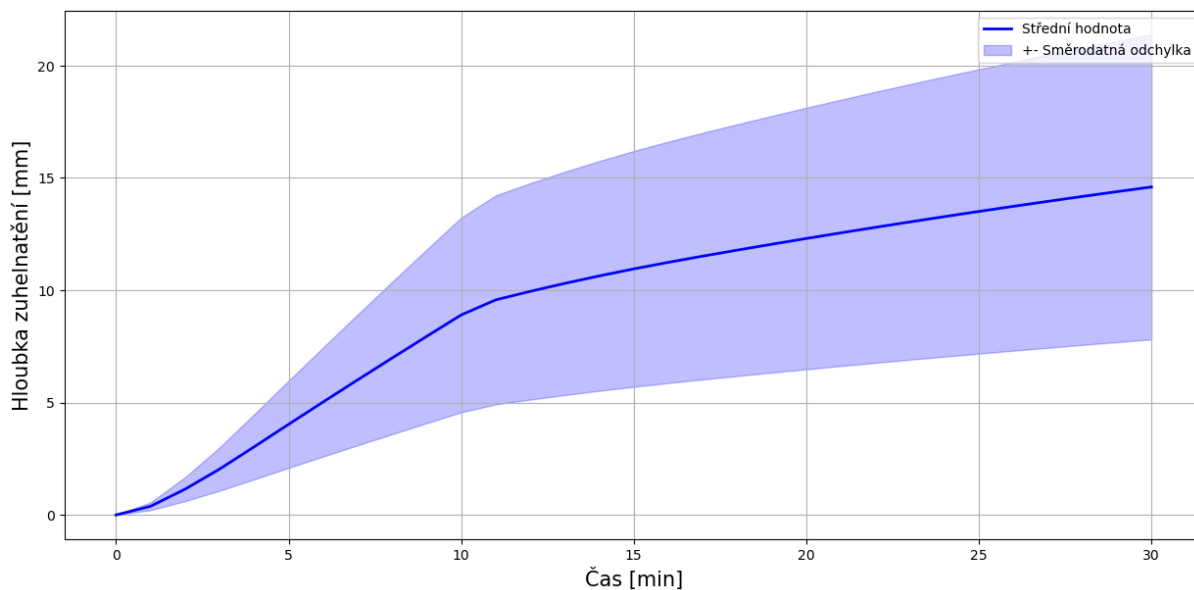
Pátá simulace je výkon hořáku nastavený do 10. minuty na 300 kW a následně skok na 100 kW. Jedná se o opačný průběh oproti 2. simulaci (Experiment 1). Teploty narůstají stejně jako v předchozích dvou simulacích.

Rychlost zuhelnatění (viz Obr. 6.11) naroste stejně jako v předchozích dvou simulacích a dosahuje nejvyšší rychlosti zuhelnatění $1,00 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění v 10. minutě je $0,95 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,47 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 30. minutě je $0,21 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,09 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 6.11: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Fall_t600_100

Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 14,59 mm a odchylka je 6,78 mm. Tento průběh hloubky zuhelnatění (viz Obr. 6.12) se liší oproti 2. simulaci (Experiment 1), jelikož dřevo ve 2. simulaci (Experiment 1) nejdříve trochu ohoří a tím pádem při zvýšení výkonu dřevo neodhořívá takovou rychlostí.

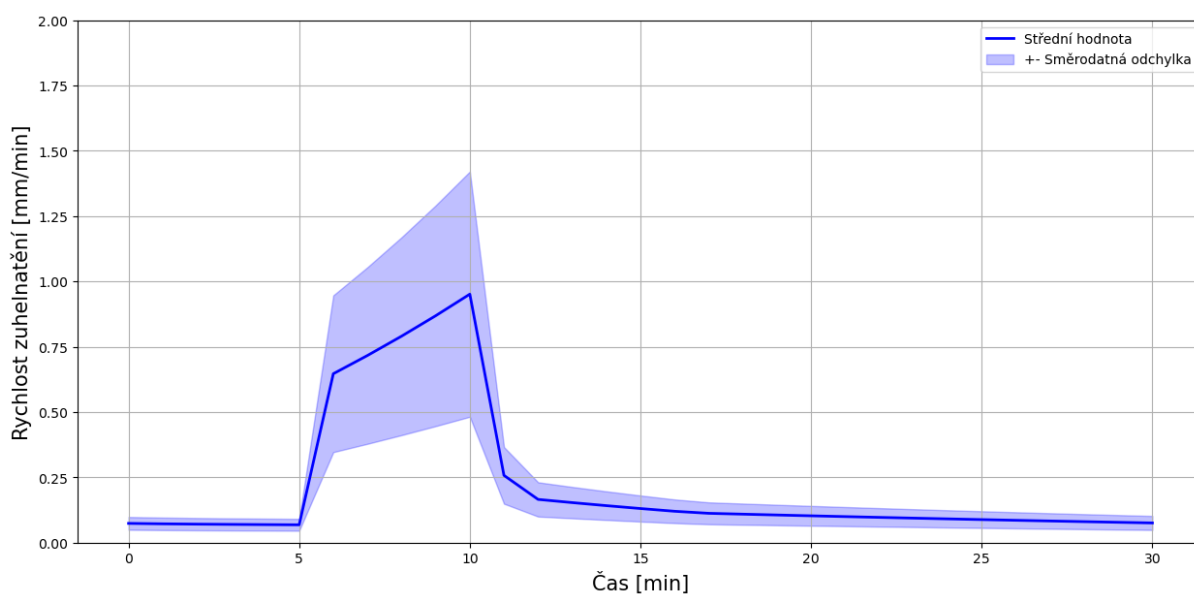


Obr. 6.12: Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Fall_t600_100

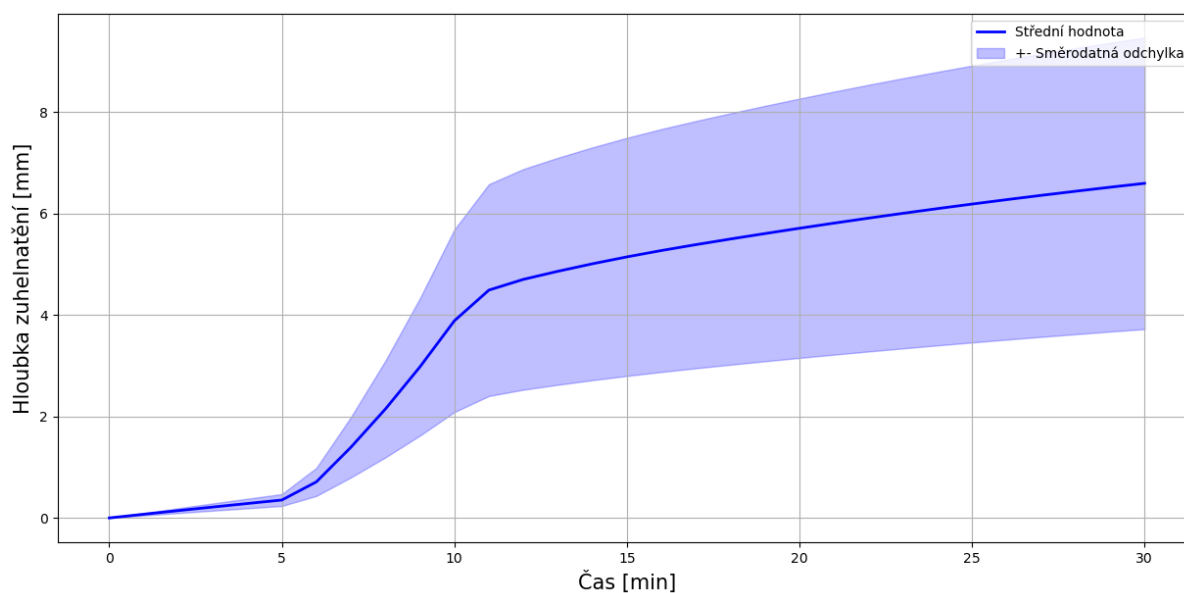
6.1.2.6 Simulace Rise and fall

Šestá simulace je výkon hořáku do 5. minuty nulový poté naroste na 300 kW a po 5 minutách se hořák zase vypne. V původní fázi je teplota 20 °C, následně naroste na teplotu 600 °C a poté od 10. minuty klesá a ve 30. minutě je teplota nad hořákem 75 °C.

Průběh rychlosti zuhelnatění (viz Obr. 6.13) odpovídá průběhu naměřených teplot. Nejvyšší rychlost zuhelnatění je dosažena v 10. minutě. Střední hodnota v 10. minutě je $0,95 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je v 10. minutě $0,47 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 6,59 mm a odchylka je 2,87 mm (viz Obr. 6.14).



Obr. 6.13: Průběh rychlosti zuhelnatění pro simulaci Rise and fall



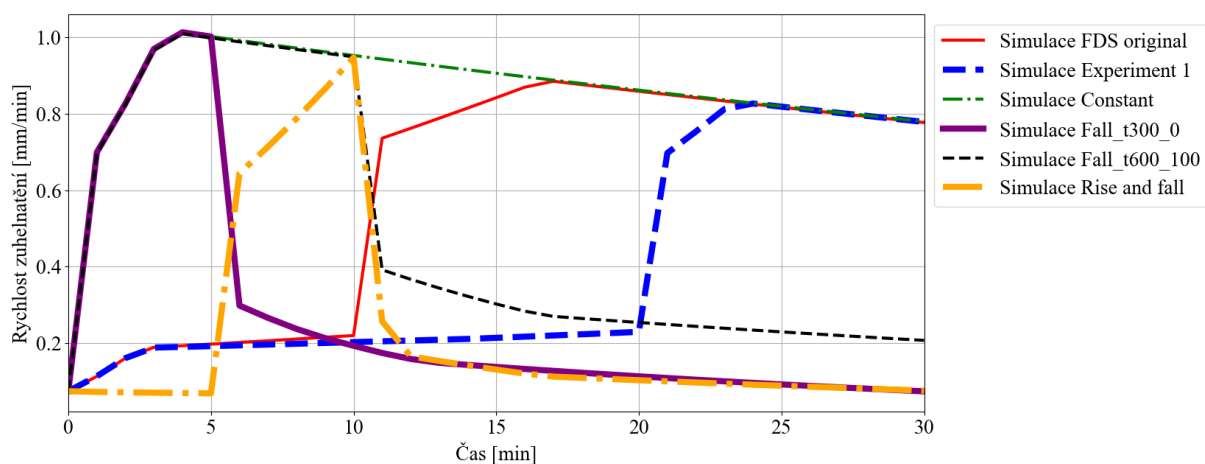
Obr. 6.14: Průběh hloubky zuhelnatění pro simulaci Rise and fall

6.1.3 Vyhodnocení hloubek zuhelnatění

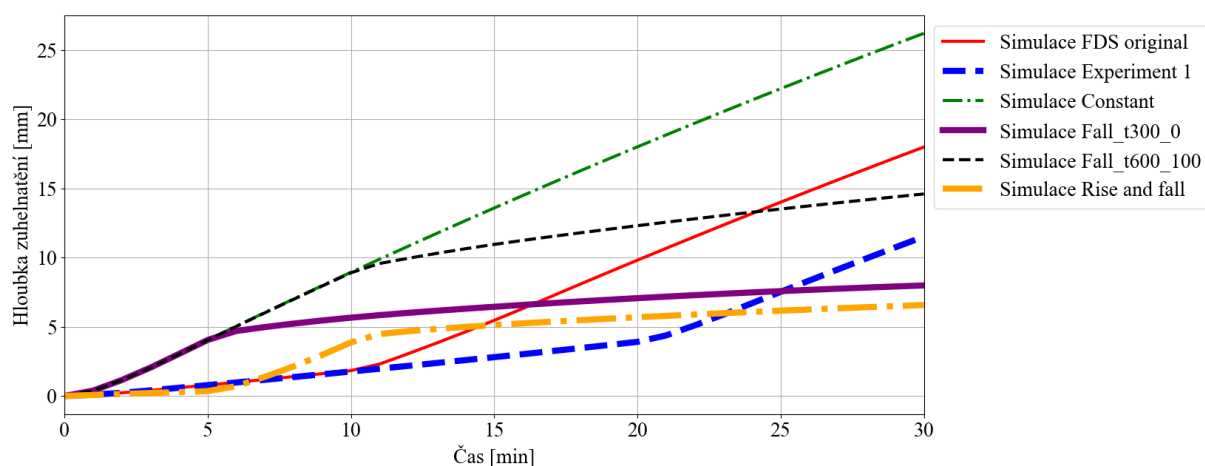
Nejedná se o reálné teploty, které při těchto výkonech budou působit na prvky, ale z výsledků je zřejmé, že záleží na tepelném toku, potažmo průběhu teplot, které na dřevo působí. Nezáleží pouze na maximálním výkonu hořáku, ale především na průběhu výkonu hořáku, jelikož ve všech simulacích byl maximální výkon hořáku totožný. Dále závisí také na tom, jak dlouho je daný výkon nastavený. V Tab. 6.1 jsou vypsány střední hodnoty hloubky zuhelnatění v 30. minutě a k tomu jsou vypsány maximální a minimální hodnoty hloubek zuhelnatění. Na Obr. 6.15 je zobrazeno srovnání středních hodnot pro simulace vypočtené v této diplomové práci. Průběh rychlosti zuhelnatění je závislý na teplotách, které se vyskytují u prvku.

Tab. 6.1: Výsledné hloubky zuhelnatění pro dané simulace

Simulace	Výsledná hloubka zuhelnatění v čase t = 30 minut [mm]		
	Minimální hodnota	Střední hodnota	Maximální hodnota
FDS original	9,36	18,02	26,68
Experiment 1	6,21	11,52	16,83
Constant	13,32	26,09	38,86
Fall_t300_0	4,45	7,98	11,51
Fall_t600_100	7,81	14,59	21,37
Rise and fall	3,72	6,59	9,46



Obr. 6.15: Srovnání středních hodnot rychlosti zuhelnatění pro popsané simulace



Obr. 6.16: Srovnání středních hodnot hloubky zuhelnatění pro popsané simulace

Z výsledných hodnot zobrazených na Obr. 6.16 je možné vidět, že závislost výkonu hořáku a výsledné hloubky zuhelnatění je zjevná. Křivky rychlosti zuhelnatění částečně kopírují průběhy teplot u dřevěných prvků. I když je nastaven všude stejný maximální výkon, tak velmi záleží i na jeho průběhu a délce trvání maximálního výkonu, jelikož se výsledné hodnoty hloubek zuhelnatění liší ve všech případech.

Nejvyšších hodnot dosahuje 3. simulace (Constant), kde je výkon hořáku nastaven po celou dobu na 300 kW. Hloubky zuhelnatění se pohybují v rozmezí od 13,32 do 38,86 mm. Simulace 2 (Experiment 1) a simulace 5 (Fall_t600_100) jsou výkony s opačným průběhem a z výsledných hodnot je zřejmé, že záleží také na tom, kdy probíhá maximální výkon. Při druhé simulaci nejdříve dřevo odhořívá menším výkonem a byla na dřevě vytvořena zuhelnatělá vrstva, proto následně maximální výkon neměl na dřevo takový vliv, jako při 5. simulaci, kde na nehořelé dřevo začaly působit teploty od maximálního výkonu hořáku.

6.2 Parametrická studie vlhkosti

6.2.1 Parametr studie

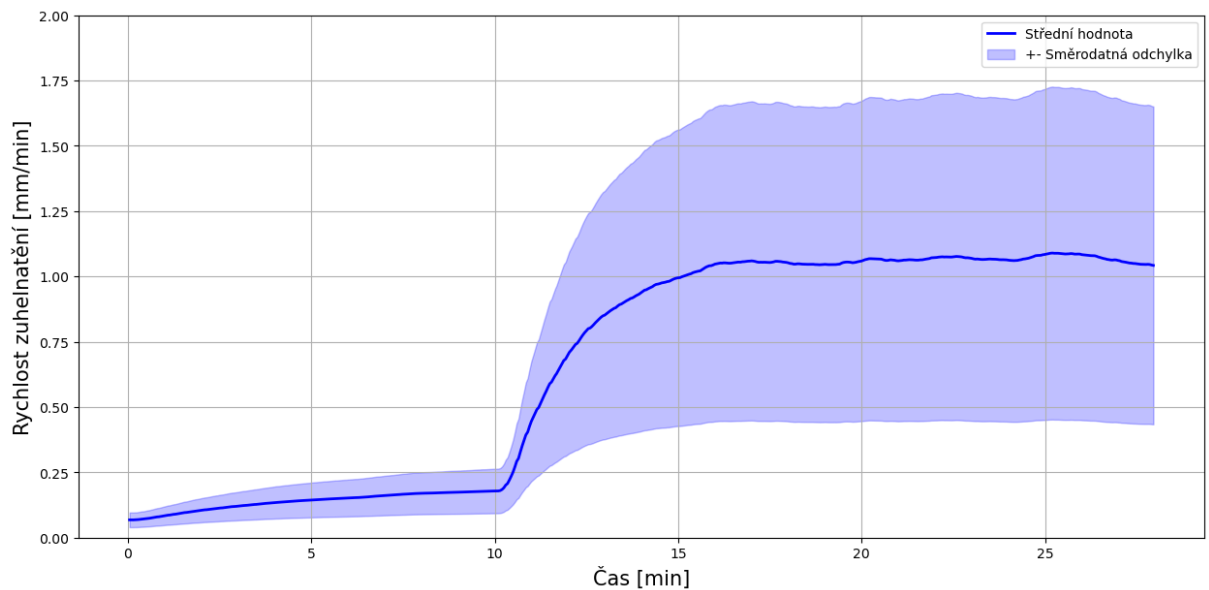
Součástí práce je rovněž analýza vlhkosti. Parametr vlhkosti je na výpočetním modelu zkoumán za účelem zjištění, jak velký vliv na hloubku zuhelnatění má vlhkost dřeva. Také zda je skutečná hloubka zuhelnatění ovlivněna více parametry. Teploty byly použity z deskového snímače z experimentu tak, aby bylo měněno co nejméně proměnných oproti použitému výpočtu. Hustota v této studii byla nastavena na původní hodnotu definovanou dle Hietaniemiho [3].

KVH hranoly se na stavbu dodávají s vlhkostí 15 %, s odchylkou ± 3 %. Pro viditelnost vlivu vlhkosti byly použity do výpočtu vlhkosti 10, 15 a 20 %, což je střední hodnota vlhkosti pro KVH hranoly s větší odchylkou.

6.2.2 Výsledky parametrické studie vlhkosti

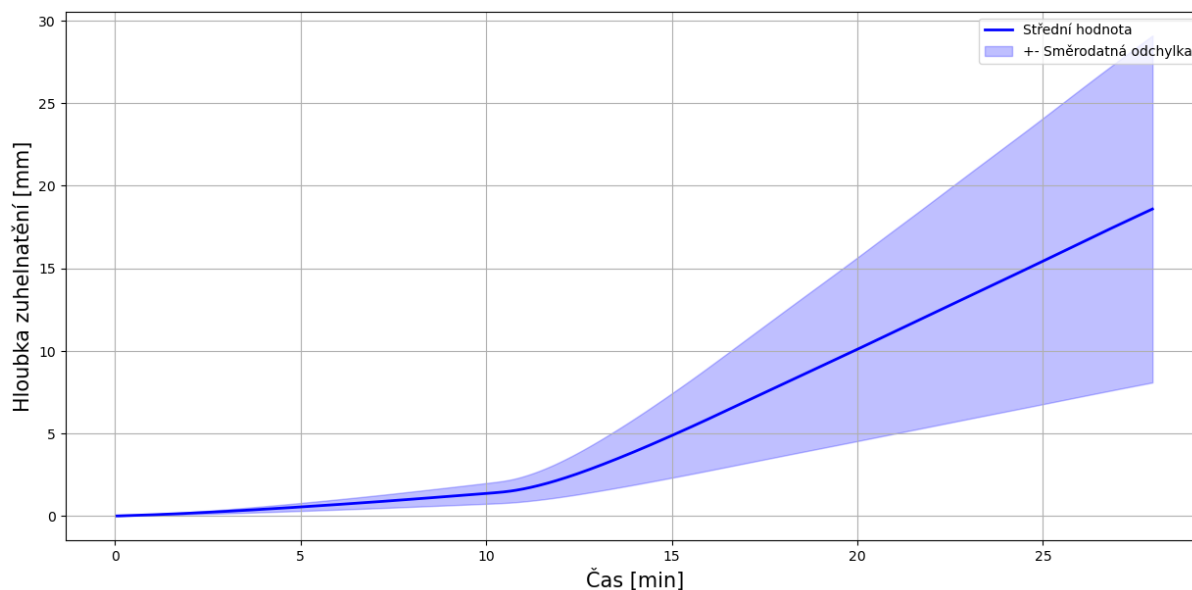
6.2.2.1 Vlhkost 10 %

Rychlost zuhelnatění má podobný průběh jako průběh teplot získaných v experimentu. Liší se ale v dosažených hodnotách, což je způsobeno rozdílnou objemovou hmotností a také vyšší vlhkostí. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 28. minutě je $1,04 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,61 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Na Obr. 6.17 je zobrazen průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost 10 %.



Obr. 6.17: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 10 %

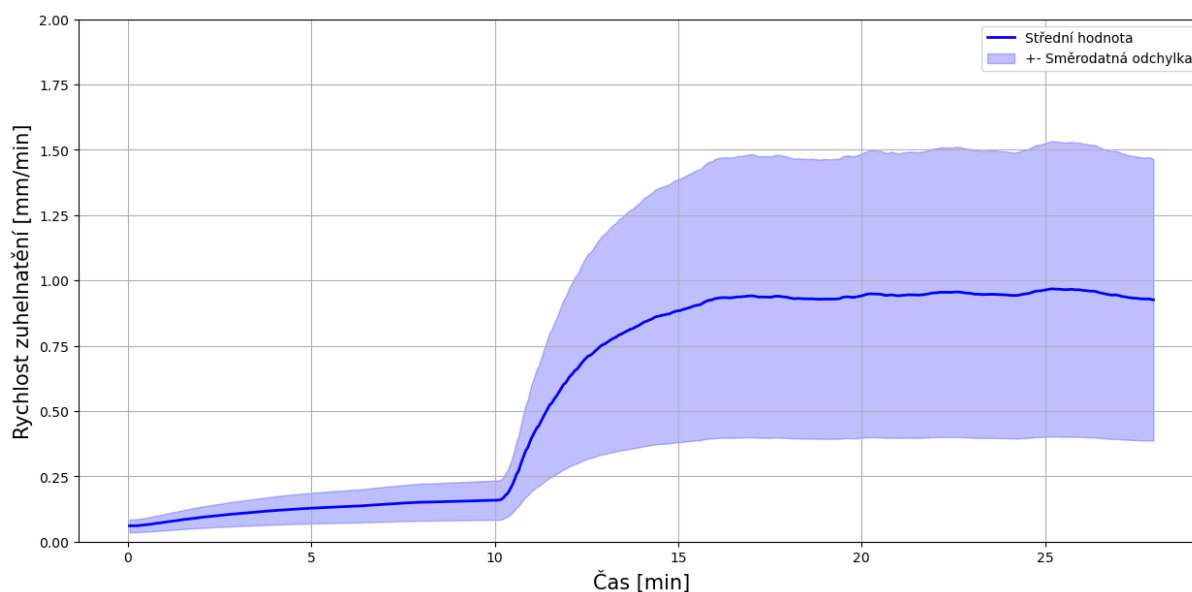
Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.18) má obdobný průběh jako při řešeném experimentu. Její nárůst je ale menší, jelikož jsou menší výsledné rychlosti zuhelnatění. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 18,59 mm a odchylka je 10,51 mm.



Obr. 6.18 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 10 %

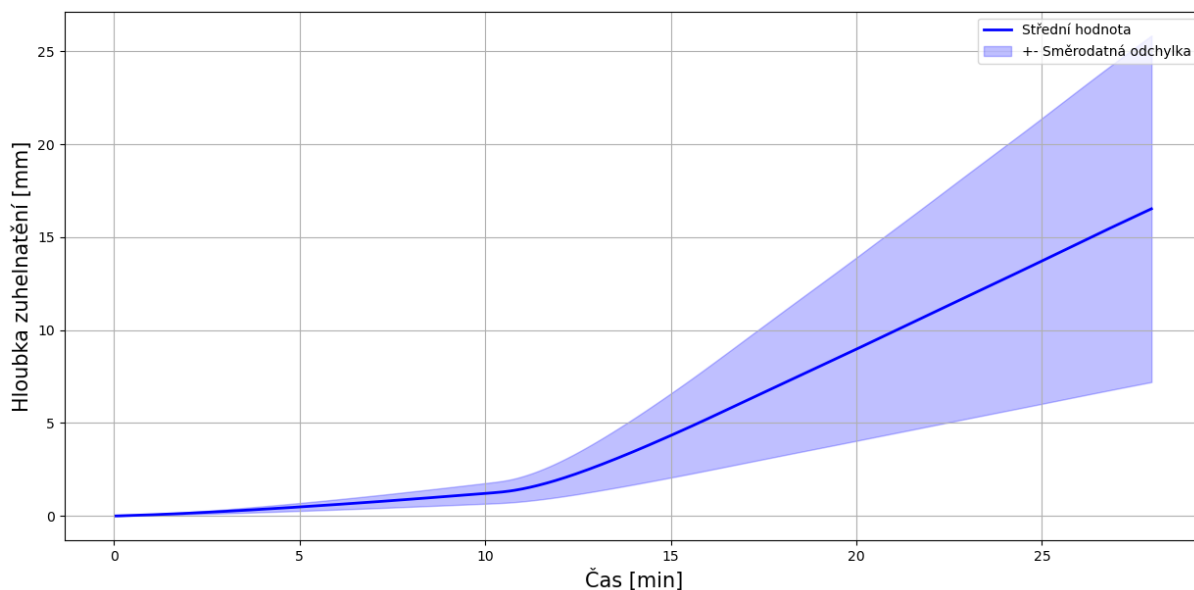
6.2.2.2 Vlhkost 15 %

Rychlost zuhelnatění pro vlhkost 15 % je zobrazena na Obr. 6.19. Průběh rychlosti zuhelnatění odpovídá dosaženým teplotám při experimentu. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 28. minutě je $0,93 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,54 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 6.19: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 15 %

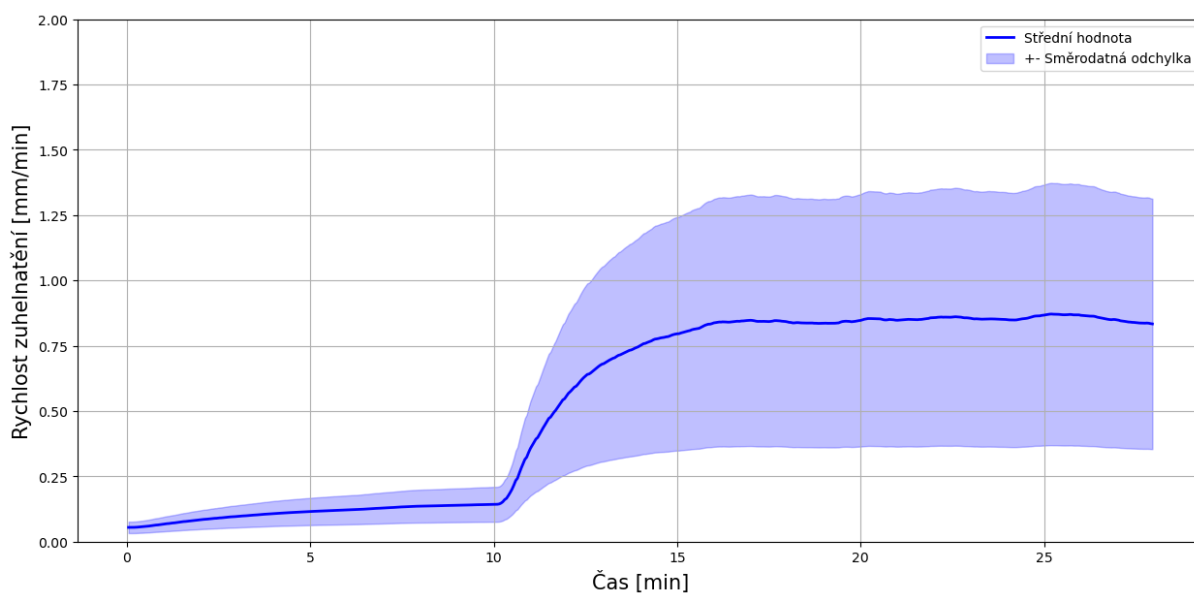
Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.20) má obdobný průběh jako pro vlhkost 10 %, akorát nedosahuje takových hodnot. Její nárůst je ale menší, jelikož jsou menší výsledné rychlosti zuhelnatění. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 16,51 mm a odchylka je 9,32 mm.



Obr. 6.20 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 15 %

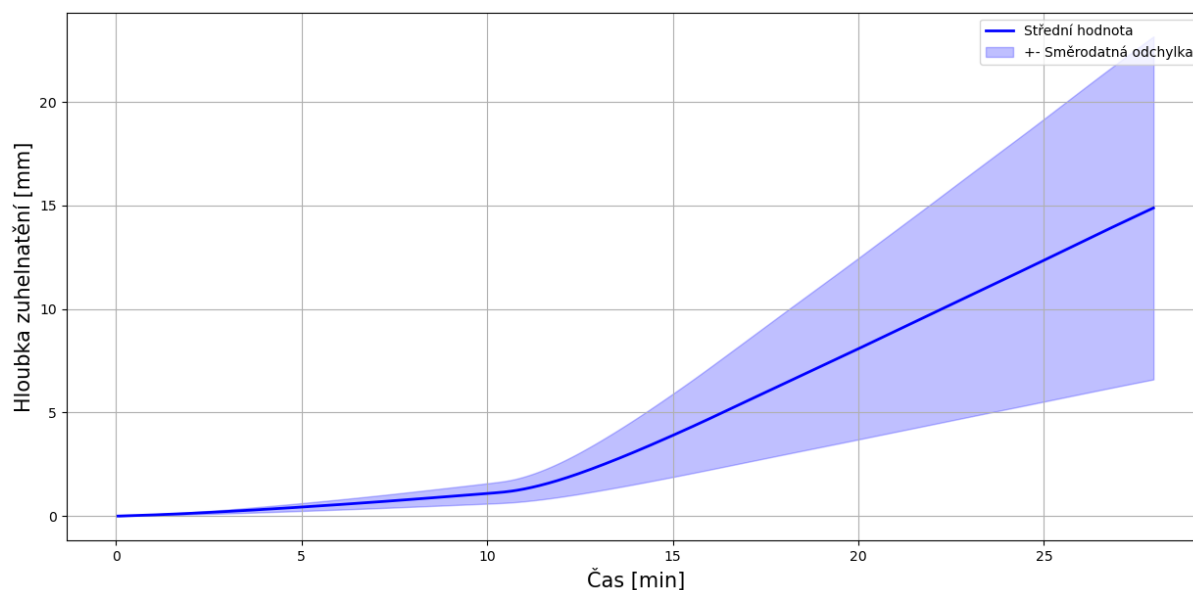
6.2.2.3 Vlhkost 20 %

Rychlost zuhelnatění pro vlhkost 20 % je zobrazena na Obr. 6.21. Průběh rychlosti zuhelnatění odpovídá dosaženým teplotám při experimentu. Střední hodnota rychlosti zuhelnatění ve 28. minutě je $0,82 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a směrodatná odchylka je $0,49 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 6.21: Průběh rychlosti zuhelnatění pro vlhkost dřeva 20 %

Hloubka zuhelnatění (viz Obr. 6.22) dosahuje nejmenších hodnot ze všech vlhkostí. Střední hodnota hloubky zuhelnatění na konci výpočtu je 14,87 mm a odchylka je 8,28 mm.



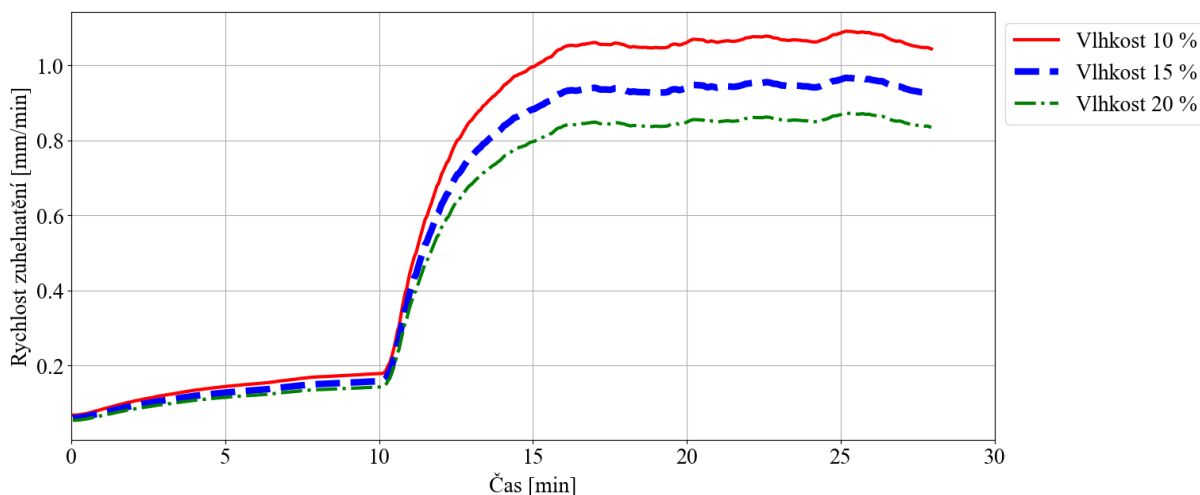
Obr. 6.22 Průběh hloubky zuhelnatění pro vlhkost dřeva 20 %

6.2.3 Výsledky parametrické studie vlhkosti

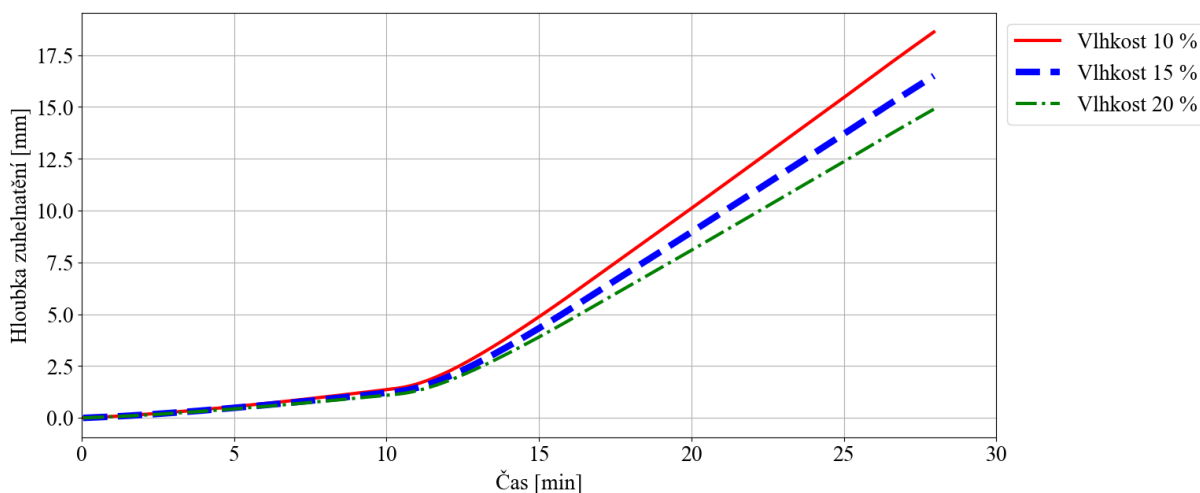
V Tab. 6.2 jsou vypsány střední hodnoty hloubky zuhelnatění v 28. minutě a k tomu jsou vypsány maximální a minimální hodnoty hloubek zuhelnatění pro dané vlhkosti. Na Obr. 6.23 jsou graficky srovnané střední hodnoty rychlostí zuhelnatění pro všechny řešené vlhkosti. Na Obr. 6.24 jsou graficky porovnané střední hodnoty hloubek pro různé vlhkosti dřeva řešené v této části.

Tab. 6.2: Výsledné hloubky zuhelnatění pro dané vlhkosti

Vlhkost [%]	Výsledná hloubka zuhelnatění v čase $t = 28$ minut [mm]		
	Minimální hodnota	Střední hodnota	Maximální hodnota
10	8,08	18,59	29,10
15	7,19	16,51	25,83
20	6,56	14,87	23,12



Obr. 6.23: Srovnání středních hodnot rychlostí zuhelnatění pro různé vlhkosti dřeva



Obr. 6.24: Srovnání středních hodnot hloubek zuhelnatění pro různé vlhkosti dřeva

Výsledné hodnoty hloubky zuhelnatění pro dřevo s vlhkostí 10 % byly nejvyšší, jelikož je to dřevo s nejnižším obsahem vody. S vyšší vlhkostí dřeva se hloubka zuhelnatění zmenšuje. Z této parametrické studie je tedy zřejmé, že vlhkost má stejně tak jako výkon hořáku vliv na hloubku zuhelnatění a pokud by ve stavbě bylo použito jiného dřeva než certifikovaného KVH, tak by to mohlo mít za následek rozdílnou požární odolnost daného prvku.

7 Závěr

Diplomová práce shrnuje známé výpočetní postupy, pomocí kterých lze určit hloubku zuhelnatění. Z provedené rešerše lze vidět, že těchto modelů existuje mnoho, ale žádná nedokáže vývoj hloubky zuhelnatění definovat přesně s ohledem na proměnné vlastnosti dřeva a proměnné vlastnosti požáru, který na dřevo působí. Momentálně nejkompexnější model je model PYCIF navržený Pečenkem a kol. [2], který je založen na pravděpodobnostním přístupu. Z publikované literatury lze vyčíst, že je hloubka zuhelnatění závislá na mnoha proměnných. Většina výpočetních postupů je definována pro normový požár a vliv odlišných okolních podmínek např. při přirozeném požáru není možné do výpočtu zanešt. Hloubka zuhelnatění je ale také závislá na vlastnostech dřeva, jako je vlhkost apod.

Experiment, který proběhl v rámci výzkumného projektu GAČR LA 21-30949K a byl využit v této diplomové práci, poskytl cenné informace, které sloužily pro zhodnocení výpočetního modelu v porovnání s experimentálními hodnotami. Z experimentálních výsledků je čitelné, že záleží na umístění prvku, výkonu hořáku, orientaci prvku vzhledem k hořáku, tepelném toku ovlivněným okolními prvky. Výsledná hloubka zuhelnatění je také ovlivněna trhlinami a vadami dřeva, např. suky.

Při porovnání hodnot získaných z experimentálního měření a z výpočetního modelu lze přijmout závěr, že výpočetní model, vycházející z rovnice 3.27 definovanou Hietaniemi [3], je dostatečně přesný a veškeré naměřené průřezy odpovídaly v rozmezí vypočteném pro známé charakteristiky dřeva, které byly ve výpočetním modelu zahrnuty. Pomocí tohoto přístupu je možné redukovat, či zvětšovat zbytkový průřez dřevěného prvku na základě průběhu teplot v prostoru, či jednotlivých stran dřevěného prvku. Pomocí zbytkového průřezu je dále možné určit požární odolnost prvku.

Při porovnání výsledků parametrické studie je evidentní vliv intenzity požáru na výsledné hloubky zuhelnatění dřevěného prvku. Nezáleží pouze na maximálních dosažených teplotách, ale také na průběhu těchto teplot. Pokud by bylo postupováno dle normového přístupu, tak by byla výsledná hloubka zuhelnatění při zahrnutí vlivu vedení v rozích 24 mm. Tato hodnota nebyla ve 4 simulacích z 6 ani dosažena, tudíž by pro dané případy v praxi byla stavba ekonomicky výhodnější. Ve zbylých simulacích byla tato hodnota vyšší a tím pádem by normový postup při požáru nebyl dostatečně bezpečný. Na výslednou hloubku zuhelnatění má vliv také vlhkost, kde se pro simulace s různými vlhkostmi průběh hloubky zuhelnatění a dosažených rychlostí zuhelnatění liší. Z výsledků této studie vyplývá, že existuje přímá korelace mezi vlhkostí dřevěného materiálu a hloubkou zuhelnatění. Je patrné, že s rostoucí vlhkostí dřeva klesá výsledná hloubka zuhelnatění při zachování ostatních charakteristik shodných.

Cílem této diplomové práce je rozšířit poznatky o chování dřeva za požáru a ověření funkčnosti výpočetního postupu definovaného Hietaniemim [3]. Problematika chování dřeva v průběhu požáru je náročná a v této práci byla identifikována řada nejistot a otázek týkajících se tohoto procesu. Metoda definovaná dle Hietaniemiho [3] se ověřila jako funkční a je potřeba dále tuto metodu rozšiřovat a zpřesňovat. Důležitým vstupním faktorem do této metody jsou naměřené teploty pro daný řešený případ a je tedy potřebné mít tyto teploty před výpočtem definované. Průběh teplot je možné získat pomocí pokročilých výpočetních modelů (např. modelů typu polí, tzv. CFD modelů či jiných pokročilých modelů).

Tato diplomová práce poskytuje pohled, jak lze postupovat při určení hloubky zuhelnatění pomocí pravděpodobnostního přístupu. Tato práce může být užitečná při následném zkoumání pravděpodobnostního přístupu v dané problematice. V navazujících pracích by bylo vhodné provést podrobnou analýzu určení a zpřesnění hranice zbytkového průřezu pro dřevěný prvek, který byl zasažen požárem. Dále by pro budoucí výzkum bylo vhodné zpřesnit vliv obsahu kyslíku na hloubku zuhelnatění dřeva.

Literatura

- [1] FOREST PRODUCTS LABORATORY, ed. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Centennial ed. Madison, Wis: Forest Products Laboratory, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, 2010. General technical report / United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 190. ISBN 978-1-4848-5970-4.
- [2] PEČENKO, Robert, Tomáš HOZJAN a Sabina HUČ. Modelling charring of timber exposed to natural fire. *Journal of Wood Science* [online]. 2023, **69**(1), 19. ISSN 1611-4663. Dostupné z: doi:10.1186/s10086-023-02091-4
- [3] HIETANIEMI, Jukka, Tomi TORATTI, Simon SCHNABL a Goran TURK. *Application of reliability analysis and fire simulation to probabilistic assessment of fire endurance of wooden structures: Espoo 2006*. S.l.: VTT Working Papers, 2006. ISBN 978-951-38-6606-8.
- [4] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03310-4.
- [5] ROTTER, T. a Petr KUKLÍK. *Kovové a dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 978-80-01-01148-5.
- [6] ČSN EN 1995-1-2. *Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Ed.1+O1*. Praha: Český normalizační institut 2010
- [7] ŠEJNA, Jakub a Lukáš. BLESÁK. *Požární odolnost dřevěných konstrukcí*. 1. vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2022. ISBN 978-80-01-07012-3.
- [8] ČSN EN ISO 80000-5. *Veličiny a jednotky – Část 5: Termodynamika*. Praha: Český normalizační institut 2020
- [9] KNUDSON R. M. a SCHNIEWIND A. P. *Performance of structural wood members exposed to fire*. 1975. ISBN 0015-7473
- [10] ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti*. Praha: Český normalizační institut 2016
- [11] BUCHANAN, Andrew a Birgit ÖSTMAN. *Fire Safe Use of Wood in Buildings: Global Design Guide* [online]. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2022 [vid. 2023-03-07]. ISBN 978-1-00-319031-8. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781003190318>
- [12] SINHA S., JHALANI A., RAVI M R, a ANJAN RAY. Modelling pyrolysis in wood. *SESI Journal*, *10.1: s.41-62*. 2000, (Corpus ID: 32941193).
- [13] WADE, Colleen. ENCLOSURE FIRE MODEL FOR MASS TIMBER CONSTRUCTION -BENCHMARKING WITH A KINETIC WOOD PYROLYSIS SUBMODEL [online]. 2019 [vid. 2023-10-28]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.15162.13764
- [14] WANG, Xiaoyun, Charles M FLEISCHMANN a Michael J SPEARPOINT. Parameterising study of tunnel experiment materials for application to the Fire Dynamics Simulator pyrolysis model. *Journal of Fire Sciences* [online]. 2016, **34**(6), 490–514. ISSN 0734-9041, 1530-8049. Dostupné z: doi:10.1177/0734904116667738
- [15] 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

- [16] 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
- [17] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Ed1+01+02+03. Praha: Český normalizační institut 2013
- [18] HARMATHY, T. Z., M. A. SULTAN a J. W. MACLAURIN. Comparison of severity of exposure in ASTM E 119 and ISO 834 fire resistance tests [online]. 1987 [vid. 2023-04-06]. Dostupné z: doi:10.4224/40001412
- [19] 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
- [20] KAMENICKA, Zuzana, Jaroslav SANDANUS, L. BLESÁK, Kamila CABOVÁ a František WALD. Methods for determining the charring rate of timber and their mutual comparison. *Wood Research*. 2018, **63**, 583–590.
- [21] PEČENKO, Robert a Tomáš HOZJAN. A novel approach to determine charring of wood in natural fire implemented in a coupled heat-mass-pyrolysis model. *Holzforschung* [online]. 2021, **75**(2), 148–158. ISSN 1437-434X, 0018-3830. Dostupné z: doi:10.1515/hf-2020-0081
- [22] 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
- [23] MINDEGUIA, Jean-Christophe, Siyimane MOHAINE, Luke BISBY, Fabienne ROBERT, Robert MCNAMEE a Alastair BARTLETT. THERMO-MECHANICAL behaviour of CROSS-LAMINATED timber slabs under standard and natural fires. *Fire and Materials* [online]. 2021, **45**(7), 866–884. ISSN 0308-0501, 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2938
- [24] ČSN EN 14390. Požární zkouška - Velkorozměrová ověřovací zkouška výrobků pro povrchové úpravy. Praha: Český normalizační institut 2007
- [25] MAREK POKORNÝ, PETR HEJTMÁNEK, a HANA NAJMANOVÁ. VIRTUÁLNÍ CFD MODEL PRO ROOM CORNER TEST. 15. říjen 2015
- [26] JOACHIM SCHMID, MICHAEL KLIPPEL, MARTIN VIERTTEL, ROBERT PRESL, RETO FAHRNI, ANTONIO TOTARO, a ANDREA FRANGI. Charring of timber - Determination of the residual virgin cross section and charring rates. In: . 2020.
- [27] ČSN 73 2824-1. Třídění dřeva podle pevnosti – Část 1: Jehličnaté dřevo. Praha: Český normalizační institut 2015
- [28] ING. MARIE KRÍŠŤANOVÁ. Vliv průběhu požáru na zuhelnatění dřeva. Praha, 2023. b.n.