

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

MODELOVÁNÍ POŽÁRU A ANALÝZA SDÍLENÍ TEPLA
NA MOSTNÍCH KONSTRUKCÍCH

MODELLING OF FIRE AND ANALYSIS OF TRANSFER
ON BRIDGE STRUCTURES

Autor práce: Bc. FILIP LUŠTINEC
Vedoucí práce: Ing. MARTIN BENÝŠEK, Ph.D.
Konzultanti práce: Ing. RADEK ŠTEFAN, Ph.D.
Ing. ŠÁRKA KOŠŤÁLOVÁ

Praha, 2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Luštinec Jméno: Filip Osobní číslo: 468441
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požáru a analýza sdílení tepla na mostních konstrukcích
Název diplomové práce anglicky: Modelling of fire and analysis of heat transfer on bridge structures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury

Modely požáru na konkrétní konstrukci

Výpočty

Vyhodnocení

Závěr

Seznam doporučené literatury:

GARLOCK, Maria, Ignacio PAYA-ZAFORTEZA, Venkatesh KODUR a Li GU. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies. Engineering Structures[online]. 2012, 35, 89–98. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2011.11.002

KODUR, Venkatesh a M. Z. NASER. Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies. Frontiers of Structural and Civil Engineering [online]. 2021, 15(1), 46–60. ISSN 2095-2430, 2095-2449. Dostupné z: doi:10.1007/s11709-020-0676-6

DRYSDALE, Dougal. An introduction to fire dynamics. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek

Datum zadání diplomové práce: 22.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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)

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se sdílením tepla a jeho ovlivněním mostních konstrukcí. Mezi cíle práce patří zmapování vlivu požáru, jakožto mimořádné situace (zatížení) a jeho působení na mostní konstrukci, analýza konstrukce a numerická simulace s vyhodnocením výsledků.

Teoretická část diplomové práce se zabývá uceleným shrnutím řešené problematiky – terminologie mostních objektů, požárními odolnostmi, výpočetními metodami pro posouzení konstrukcí ovlivněných požárem, popis přístupů k modelování požáru, rychlost uvolňování tepla a samotné sdílení tepla.

Součástí diplomové práce je praktická část, která se zabývá modelem vytvořeným pomocí výpočetní dynamiky kapalin a plynů (CFD – Computational Fluid Dynamics), konkrétně v softwaru Fire Dynamics Simulator (FDS). Příklad je zaměřen na model mostního objektu a požár nákladního automobilu přepravující hořlavý materiál. Na základě křivky rychlosti uvolněného tepla je definován požár a z následných simulací jsou vybrány sledované veličiny – zejména teploty. Součástí vyhodnocení je zaměření se na vliv teplot v konstrukci s posouzením kritické teploty ve výztuži. Závěrem diplomové práce je porovnání vstupních a výstupních dat z jednotlivých použitých softwarů a popis výsledků.

Klíčová slova

Mostní konstrukce; požár; mimořádné zatížení; modelování požáru; sdílení tepla; výpočetní dynamické modely kapalin a plynů; Fire Dynamics Simulator; rychlost uvolňování tepla

Abstract

The diploma thesis is focused on issues related to heat transfer and its impact on bridge structures. The objectives of the work include mapping the impact of fire as an emergency (load) and its effect on the bridge structure, structural analysis and numerical simulation with an evaluation of results.

The theoretical part of the thesis deals with a comprehensive summary of the issues – the terminology of bridge structures, fire resistance, simplified computational methods for assessing structures affected by fire, description of approaches to fire modelling, heat release rate and heat transfer.

This thesis also has a practical part, that deals with the model created using Computational Fluid Dynamics (CFD), specifically in the software Fire Dynamics Simulator (FDS). The example is focused on a model of a bridge object and a fire of the truck carrying flammable material. Based on the heat release rate curve, a fire is defined and the monitored quantities – especially temperatures - are selected from the subsequent simulations. Part of the evaluation is the focus on the effect of structural temperatures with an appraisal on the critical temperature of the reinforcement. The conclusion of the diploma thesis is a comparison of input and output data from individual used software and a description of the results.

Keywords

Bridge structures; fire; extra load; fire modelling; heat transfer; Computational Fluid Dynamics; Fire Dynamics Simulator; heat release rate

Prohlášení

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

V Praze dne 2. ledna 2022

.....

Bc. Filip Luštinec

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinovi Benýškovi, Ph.D., za ochotu při konzultacích, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování diplomové práce. Mé poděkování dále patří konzultantům, panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D. a paní Ing. Šárce Košťálové.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu a důvěru nejen při tvorbě diplomové práce, ale i během celého studia na vysoké škole.

Tato diplomová práce byla vytvořena v rámci podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS21/040/OHK1/1T/11.

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk	III
Seznam použitých programů	IV
1 Úvod	11
1.1 Motivace	11
1.2 Cíle práce	12
2 Současný stav poznání	13
2.1 Statistika požárů mostních konstrukcí	13
2.2 Mostní konstrukce	14
2.2.1 Základní terminologie mostních objektů	14
2.2.2 Třídění mostů podle statické funkce hlavní nosné konstrukce	16
2.3 Mimořádné zatížení – požár	17
2.4 Vliv požární situace na mostní konstrukci	17
2.5 Příklady vybraných požárů mostních konstrukcí	18
2.6 Různé přístupy k modelování požáru	20
2.7 Matematické modely požáru	21
2.7.1 Zjednodušené modely požáru	21
2.7.2 Pravděpodobnostní modely	21
2.7.3 Deterministické modely	22
2.8 Rychlost uvolňování tepla	24
2.9 Sdílení tepla	27
2.9.1 Tepelný tok a hustota tepelného toku	27
2.9.2 Vedení tepla (kondukce).....	27
2.9.3 Proudění tepla (konvekce)	28
2.9.4 Sálání tepla (radiace)	29
2.10 Požární odolnosti konstrukcí	29
2.11 Posuzování požární odolnosti konstrukcí	30
3 Praktická část diplomové práce	31
3.1 Předloha konstrukce pro model	31
3.2 Použité softwarové nástroje.....	32
3.2.1 FDS – Fire Dynamics Simulator	32
3.2.2 Smokeview	33
3.2.3 PyroSim	33
3.2.4 TempAnalysis_s	34
3.3 Počáteční podmínky a vstupní parametry	34
3.3.1 Vlastnosti materiálů	36
3.4 Modelování v softwaru FDS.....	37
3.4.1 Velikost výpočetní sítě	37
3.4.2 Rozměry konstrukcí a nákladního automobilu	39
3.5 Rychlost uvolňování tepla	40
3.5.1 Definování požáru	41

3.6	Výsledky teplot.....	42
3.6.1	Teploty na povrchu konstrukce	45
3.6.2	Teploty plynu pod konstrukcí mostovky	48
3.7	Porovnání jednotlivých výstupů	51
3.8	Porovnání kritických teplot výztuží.....	52
4	Závěr	54
	Seznam obrázků.....	56
	Seznam tabulek	58
	Literatura	59

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

Q	Rychlost uvolňování tepla	W
t	Čas	s
q	Tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
S	Plocha	m^2
c	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	Teplota	K
I	Intenzita záření	$W \cdot m^{-2}$
A_f	Plocha požáru	m^2
ΔH	Reakční teplo	$kJ \cdot mol^{-1}$
ΔH_{eff}	Efektivní výhřevnost	$kJ \cdot kg^{-1}$
ΔH_c	Celková výhřevnost	$kJ \cdot kg^{-1}$

Řecké symboly

τ	Čas	s
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
α	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
ε	Emisivita plamene	-
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Θ	Teplota	$^{\circ}C$

Zkratky

CFD	Computational fluid dynamics
FDS	Fire dynamics simulator
RHR	Reat of heat release
HRR	Heat release rate
HZS	Hasičský záchranný sbor
PTCH	Požárně technické charakteristiky

Seznam použitých programů

Microsoft Office 365

Autodesk AutoCAD 2020

ARCHICAD 22

TempAnalysis_s [1]

PyroSim [2]

Zotero [3]

1 Úvod

Pro účely požární ochrany se za požár považuje každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení či zranění osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách. Za požár se považuje i nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata nebo materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy [4].

Požární inženýrství je progresivní obor, jehož hlavním cílem je snaha porozumět základním jevům, které probíhají při požáru. S rozšířením využívání informačních technologií v oblasti požárního inženýrství byla během posledních desetiletí vyvíjena velká řada výpočetních programů snažících se modelovat průběh požáru. Motivací za těmito modely může být snaha předpovědět průběh požáru bez nutnosti provádění finančně náročných požárních experimentů, nebo např. možnost prokázání požadovaných vlastností konstrukcí v případě, že tradiční normové postupy jsou neefektivní nebo jinak nevyhovující [5].

Požáry spojené s mostními konstrukcemi, už je nutné brát v dnešní době jako samozřejmost. Nejedná se pouze o případné dopravní autonehody, ale požáry jsou způsobené při rekonstrukcích a opravách mostů, poruchou vedení vysokého napětí, či nedbalým zakládáním ohňů lidí bez domova. Podkladem pro toto tvrzení je statistika, která byla vytvořena v rámci zjištění kvantity požárů spojených s mostními konstrukcemi na území České republiky (tab. 1) [6].

1.1 Motivace

Výběr tématu Modelování požáru a analýza sdílení tepla na mostních konstrukcích byla prioritou. Již ve druhém ročníku na Fakultě stavební ČVUT, kdy jsme se jako studenti rozhodovali, jakým směrem se dále bude ubírat naše studium při výběru oborů, byla má osobnost na vážkách. Rozhodoval jsem se mezi obory Q – Požární bezpečnost staveb, na kterém je v rámci tohoto oboru psána tato diplomová práce a oborem K – Konstrukce a dopravní stavby. Oba tyto obory mi jsou velice blízké, a proto zvítězilo právě toto téma, neboť se jedná o propojení obou problematik.

Obecnou motivací pro zpracování této diplomové práce je skutečnost, že ačkoliv si veřejnost spojuje požáry na mostních konstrukcích ve velice malých měřítcích, je faktem, že ke kolapsům mostních konstrukcí způsobených mimořádným zatížením – požárem, dochází dvakrát více, než v případě jiného mimořádného zatížení – zemětřesení [7].

1.2 Cíle práce

Hlavními cíli diplomové práce jsou:

- 1) vliv požáru a jeho ovlivnění mostní konstrukce,
- 2) analýza dostupných studií o kolapsech mostů,
- 3) příčiny kolapsů mostních konstrukcí,
- 4) studie rychlosti uvolněného tepla,
- 5) model požáru pod mostní konstrukcí a jeho analýza.

2 Současný stav poznání

V kapitole týkající se současného stavu poznání je komplexně shrnuta problematika týkající se modelování požáru na mostních konstrukcích. Jedná se o průřez týkající se:

- terminologie mostních objektů,
- zajímavé a důležité milníky mimořádného zatížení na mostech,
- modelování požárů (obecně) se sdílením tepla.

2.1 Statistika požárů mostních konstrukcí

Statistika požárů, která byla zpracována na základě poskytnutých dat [6] je v níže přehledové tabulce (tab. 1) sepsána pomocí jednotlivých událostí. Statistika obsahuje datum a příčinu, od které vznik požár. Dále jsou v tabulce uvedena data, kým byl požár uhašen a v jakém rozsahu došlo ke zranění osob.

tab. 1: Statistika požárů souvisejících s mostními konstrukcemi na území ČR [6]

Datum	Příčina	Uhašení	Zranění/úmrťi
10.03.2003	Požár odpadu bezdomovců	HZS	0/0
23.01.2008	Požár odpadu bezdomovců	HZS	0/0
14.05.2008	Požár bednění na stavbě mostu	Civilisté + HZS	0/0
07.12.2008	Požár automobilu	Civilisté + HZS	1/0
26.12.2010	Požár odpadu bezdomovců	HZS	0/0
20.05.2012	Požár ve výduti žel. mostu	HZS	0/0
18.10.2013	Požár vysokého vedení	HZS	0/0
20.04.2017	Požár odpadu bezdomovců	HZS	1/0
20.06.2017	Požár kamionu s návěsem	HZS	1/0
23.06.2017	Požár automobilu	HZS	0/0
05.10.2017	Požár matrace (nepovolená skládka)	HZS	0/0
09.01.2021	Požár automobilu	HZS	0/0

V souvislosti se statistikou požárů (tab. 1) lze samostatně vyzvednout dopravní nehodu na území České republiky, která se stala 20.06.2017 na dálnici D46 na 27. kilometru ve směru Olomouc – Prostějov (v tab. 1 šedě podbarvená). Jednalo se o požár kamionu s návěsem. Nákladem byly autosedačky uložené v plastových přepravkách. Škoda dle odhadů byla vyčíslena na 8,5 milionu korun českých. Na obrázku (obr. 1) je vidět jakým způsobem je poškozena mostní konstrukce nadjezdu přes dálnici [6].



obr. 1: Požár kamionu a poškození mostní konstrukce na území ČR [6]

2.2 Mostní konstrukce

Pro připomenutí základní terminologie mostních objektů je zpracován výtah základního rozdělení konstrukce, ze které se ve výsledku skládá mostní objekt.

Pro popis pojmů byla použita norma [8] a poskytnuté přednášky [9] od kolegů akademické obce. Součástí této kapitoly není vypsání všech pojmů, které obsahuje česká technická norma, nýbrž jde o seznámení s pojmy, se kterými se lze v diplomové práci setkat.

2.2.1 Základní terminologie mostních objektů

Mostní objekt

Nedílná součást dopravní cesty (pozemní komunikace, dráhy nebo vodní cesty) v místě, v němž je třeba překonat přírodní nebo umělou překážku přemostěním.

Pojem mostní objekt zahrnuje:

- mosty,
- propustky,
- lávky.

Most

Mostní objekt s kolmou světlostí alespoň jednoho mostního otvoru větší než 2,0 m.

Je tvořen:

- spodní stavbou,
- nosnou konstrukcí,
- svrškem,
- vybavením,
- přidruženými částmi,
- popř. přesypávkou.

Propustek

Mostní objekt s kolmou světlostí mostního otvoru od 0,4 m do 2,0 m včetně. Propustek zpravidla slouží k příčnému provedení stálých nebo občasných vod, trubních a jiných vedení tělesem komunikace.

Nosná konstrukce

Nosnou konstrukcí je část mostu, která přenáší účinky zatížení ze svršku na spodní stavbu.

Je tvořena všemi nebo jen některými z uvedených konstrukčních částí:

- hlavní nosná konstrukce,
- mostovka,
- ztužení,
- ložiska,
- mostní závěry,
- spolupůsobící přesypávka (nadezdívka),
- čelní zeď.

Mostovka

Část nosné konstrukce mostu, která přenáší zatížení od dopravy ze svršku do hlavní nosné konstrukce.

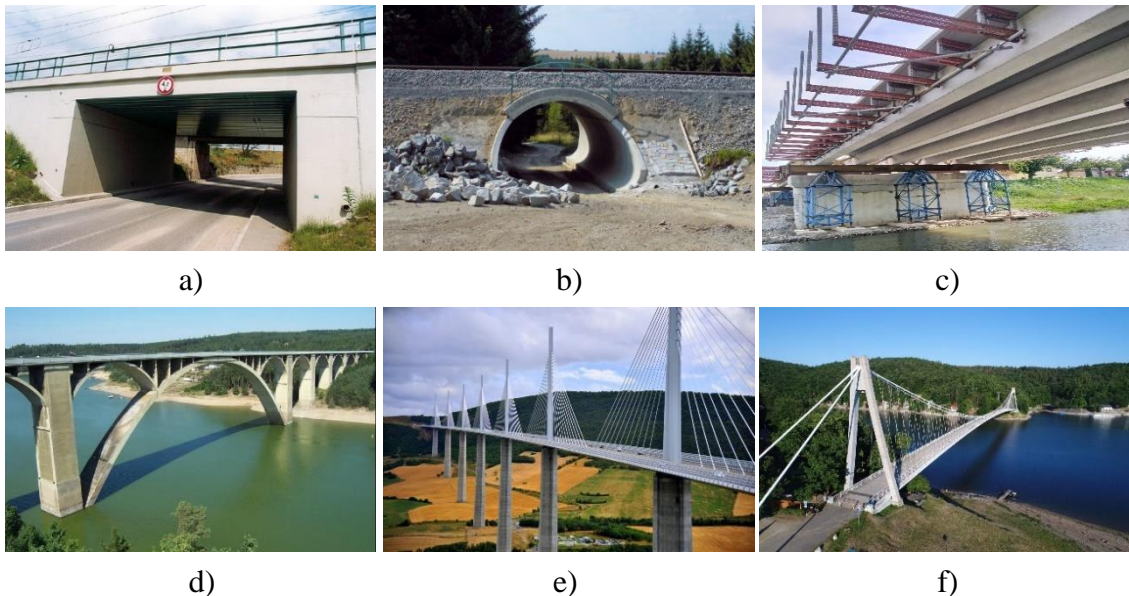
Ztužení

Část nosné konstrukce, jejímž účelem je zachycovat a přenášet vodorovné účinky zatížení a zajišťovat prostorový tvar nosné konstrukce.

2.2.2 Třídění mostů podle statické funkce hlavní nosné konstrukce

Hlavní nosná konstrukce je část mostní konstrukce, která slouží k překlenutí překážky, a která je obvykle uložena na spodní stavbě mostu, což jsou základy a podpěry. Třídění hlavní nosné konstrukce podle základního tvaru a statického působení (obr. 2):

- deskový most,
- trémový most,
- rámový most,
- obloukový most,
- klenbový most,
- věšadlový most,
- vzpínadlový most,
- vzpěradlový most,
- zavěšený most,
- visutý most.



obr. 2: Mosty podle statické funkce hlavní nosné konstrukce [9] – a) deskový most, b) klenbový most, c) trémový most, d) obloukový most, e) visutý most, f) zavěšený most

Hlavní nosnou konstrukci dále třídíme podle materiálu, ze kterého se skládá. Tyto konstrukce pak jsou – dřevěné, cihelné, kamenné, betonové, ocelové, spřažené a kombinované.

2.3 Mimořádné zatížení – požár

K tomu, aby mohlo hoření probíhat je zapotřebí přítomnost činitelů jako hořlavá látka – látky v pevném, kapalném a plynném skupenství, které za určitých podmínek reagují s oxidantem a tím se podílí na rozvoji hoření, oxidační činidlo – nejčastěji vzdušný kyslík, ale patří sem i látky kyslík uvolňující, dále např. chlor, některé kyseliny apod. a iniciační zdroj – plamen, jiskra, zdroje vzniklé přeměnou jiné energie na tepelnou (např. mechanická, chemická, světelná nebo elektrická energie). Tyto tři prvky tvoří tzv. trojúhelník hoření (obr. 3). Vyloučíme-li jednu jeho stranu – složku, pak nemůže k požáru dojít [10].



obr. 3: Trojúhelník hoření [11]

Dokonalé hoření je takové hoření, při kterém je dostatek oxidačního činidla, a při reakci dále nevznikají produkty, které jsou schopné dalšího hoření. Nedokonalé hoření je hoření za nedostatku oxidačního činidla, při této reakci vznikají zplodiny schopné dalšího hoření. Explosivní hoření může probíhat formou výbuchu. Výbuch je rychlá fyzikálněchemická reakce provázená okamžitým uvolňováním velkého množství energie [10].

2.4 Vliv požární situace na mostní konstrukci

Pokud se zabýváme a posuzujeme požární situaci, která do jisté míry ovlivňuje mostní konstrukci, je nezbytné se v první řadě zabývat o jakou šlo konstrukci, myšleno typem statické funkce hlavní nosné konstrukce (viz kap. 2.2.2), a především v jaké části mostního objektu požár vznikl [12–14].

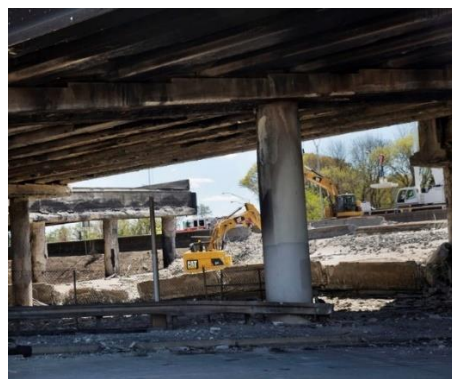
Velkým rozdílem je, pokud vezmeme jako příklad hlavní nosnou konstrukci deskového, trémového a visutého mostu. Uvážíme-li konstrukci visutého mostu, tak nejkritičtějším místem, kde může požár způsobit největší škody, je u kotev, které jsou přímo napojené na mostovku a zároveň přenáší zatížení do ocelových lan nesoucích celý most. Požár může vzniknout i pod mostovkou visutého mostu, ale z tohoto pohledu se jedná o méně rizikové místo, než je tomu při horní hraně mostovky [12–14].

Druhým příkladem jsou deskové a trémové mosty, kdy je pro tyto konstrukce vyšším rizikem ovlivnění statické funkce, když požár působí zespodu, čili na spodní hranu mostovky. Je to tedy diametrálně odlišná situace, jako je tomu u visutých mostů. Neboť je ovlivněna výztuž v desce/trámech u spodního líce a dochází k jejímu nadměrnému protažení a záhy ke kolapsu [12–14].

2.5 Příklady vybraných požárů mostních konstrukcí

V následující kapitole jsou blíže popsány významné požáry, které ovlivnily pohled na situaci týkající se zabýváním problematiky spojenou s požáry a mostními konstrukcemi.

Jedná se o události, které se z většiny staly ve Spojených státech amerických, nicméně se s takovými situacemi setkáváme i ve světě [7, 13, 15, 16]. V tabulce (tab. 2) jsou vypsány události, které jsou svými následky řazeny mezi ty, které jsou jedny z největších. Jak již bylo zmíněno, tak požárních situací spojených s mostními objekty je mnoho, ale v rámci diplomové práce je důležité se zaměřit na ty stěžejní. V této tabulce (tab. 2) je popsáno 7 konstrukcí se specifikací místa, data, kdy došlo k požáru a jeho příčině, o jakou konstrukci se jednalo a v poslední řadě, jak velké bylo poškození konstrukce a její eventuelní asanace.



obr. 4: Příklady poškození mostních konstrukcí zasažených požárem [7, 13, 15, 16]

tab. 2: Příklady požárů spojených s mostními objekty [7, 13, 15, 16]

Místo nehody	Datum	Příčina	Typ konstrukce	Poškození	Asanace
I-20/I-59/I-65, Birmingham, AL, USA	05.01.2002	Převrácení cisterny pod mostem převážející benzín	Ocelové nosníky + železobetonová deska	Průhyb mostovky o 3 metry	Kompletní rekonstrukce mostu
I-80/880 – MacArthur Maze, Oakland, CA, USA	29.04.2007	Nehoda cisterny s benzínem pod mostem	Ocelové nosníky + železobetonová deska, podepření	Zřícení křižovatky v délce 50 metrů	Kompletní rekonstrukce dílčí části mostu
Most I-75, Hazel Park, MI, USA	15.07.2009	Náraz cisterny s hořlavou kapalinou do nadjezdu	Ocelové nosníky + železobetonová deska	Zřícení mostu + poškození dálnice pod nadjezdem	Kompletní rekonstrukce mostu
Most přes dálnici 60, Los Angeles, CA, USA	14.12.2011	Požár cisterny s 33 800 galony benzínu	Předpjaté I nosníky + železobetonová deska	Poškození předpjatých betonových nosníků	Kompletní rekonstrukce mostu
Dálnice 57, Dormagen, Germany	14.03.2012	Požár uskladněných plastů pod mostem	Železobetonová deska	Poškození železobetonové desky	Kompletní rekonstrukce mostu
Nadjezd, Káhira, Egypt	11.03.2014	Výbuch plynových lahví pod mostem	Ocelové nosníky + železobetonová deska, podepření	Kolaps ocelového sloupu vlivem zvýšené teploty	Kompletní rekonstrukce dílčích částí mostu
I270/I-70 Ramp, OH, USA	01.07.2015	Požár cisterny s ethanolem pod mostem	Železobetonová deska	-	Kompletní rekonstrukce mostu

2.6 Různé přístupy k modelování požáru

Pro modelování požáru existuje množství různých metod a přístupů s různým stupněm komplexnosti. Podle potřeb modelovaného požárního scénáře je nutné zvolit vhodnou metodu (musí proběhnout ověření, zda lze konkrétní model použít) a ve zpracovávané dokumentaci popsat, jaká metoda/postup byla zvolena (důvody, výhody, omezení, aj.).

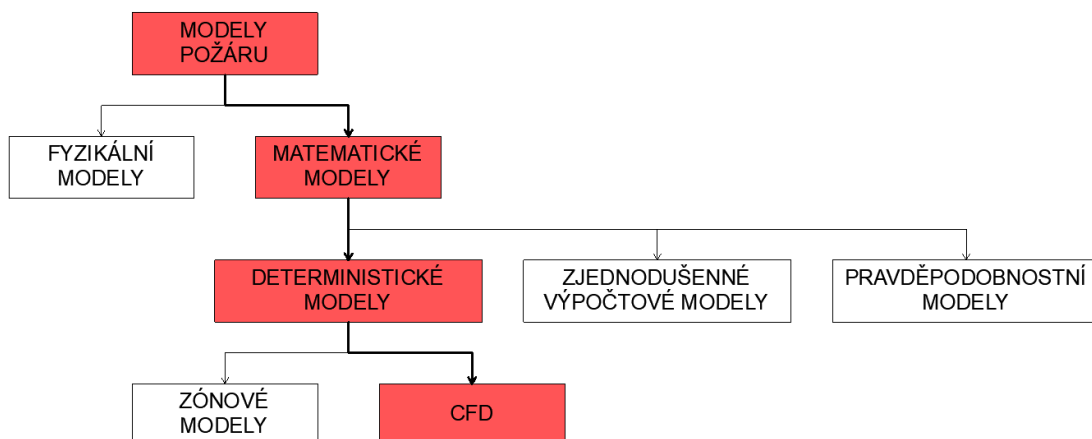
V požárním inženýrství existují dvě základní skupiny modelů požáru a to matematické modely a fyzikální modely [5, 17].

Fyzikální modely

Fyzikální modely spočívají v napodobení požáru za zjednodušených fyzikálních podmínek. Obvykle se jedná o zjednodušené požární experimenty v reálném nebo častěji ve zmenšeném měřítku. Velkorozměrové požární zkoušky se přibližují průběhu požáru v reálných podmínkách, jejich nevýhodou však je značná nákladnost a složitost na provedení. Z tohoto důvodu se v praxi uplatňují spíše experimenty ve zmenšeném fyzikálním měřítku. Hlavním cílem fyzikálních modelů je stanovení fyzikálního a chemického chování sledované soustavy při požáru, avšak zcela přesně jej nikdy vystihnout nemohou. Přesto jsou tyto modely užitečné k pozorování fyzikálních jevů, získání zcela nových poznatků nebo k tzv. validačním procesům [5, 17].

Matematické modely

Matematické modely oproti tomu popisují chování fyzikálních soustav při požáru pomocí souboru matematických rovnic za využití výpočetní techniky. Výsledky matematických modelů slouží především jako předpověď chování skutečných fyzikálních soustav při požáru. Matematický model musí být vždy nejprve podroben procesu verifikace a validace. Právě díky procesu validace (tj. systematickému srovnání teoretického předpokladu s experimentem) si lze ověřit platnost matematického modelu v dostatečném rozsahu možných použití. Mezi oběma skupinami modelů lze nalézt vzájemnou provázanost a možnost doplňování sledovaných veličin [5, 17].



obr. 5: Schématické rozdělení modelů požáru [5] s vyznačeným postupem DP

2.7 Matematické modely požáru

Matematické modely požáru se dělí do dvou základních skupin, a to modely pravděpodobnostní a deterministické [17], které je možné pro úplnost doplnit ještě o zjednodušené výpočtové modely (obr. 5) [4, 5].

2.7.1 Zjednodušené modely požáru

Zjednodušené výpočtové modely jsou určeny především pro „ruční výpočty“ a lze za ně považovat např. tabulkové procesory nebo triviální programy sloužící k analytickému vyjádření některých základních procesů při požáru. Tyto modely zahrnují např. empirické výpočty teploty a rychlosti oblaku zplodin hoření, výšky plamenů a další [5, 18]. Nejpoužívanější zjednodušené výpočtové modely jsou založeny na přenosu tepla a hoření (popř. rozvoji požáru) [5, 18].

Pro ruční výpočet přenosu tepelného toku (radiací, konvekcí, nebo kondukcí) existují analytické výrazy, které obvykle vycházejí z energetické rovnováhy, odhadu tepelných vlastností a homogenity posuzovaných médií. Tepelný tok způsobený radiací od plamenů, horkých plynů a horkých ploch působících na pevný povrch je hodnocen pomocí klasické teorie přenosu tepla a polohových součinitelů [5, 18].

V případě výpočtu rozvoje a množství tepla uvolněného ze zdroje hoření je nutné znát typ a množství hořícího paliva. Stanovení rychlosti hoření je většinou stanoveno na základě předem získaných dat, např. z malorozměrových požárních zkoušek nebo interpolací výsledků z velkorozměrových zkoušek [5, 18]. Pro počáteční fázi rozvoje požáru je dle Přílohy C v normě [4] stanoven tzv. lokální požár, který nepředpokládá celkové vznícení látek, ale uvažuje nerovnoměrné rozdělení teploty v prostoru. Pro plně rozvinuté požáry jsou určovány nominální teplotní křivky (např. ISO 834 [4]) a dále parametrické teplotní křivky dle Přílohy A normy [4], které pracují s parametrem odvětrání a tepelnou setrvačností ohraničujících konstrukcí. Parametrické teplotní křivky [19, 20] navíc popisují i fázi chladnutí při požáru [4, 5, 18].

2.7.2 Pravděpodobnostní modely

Pravděpodobnostní modely vycházejí z teorie pravděpodobnosti popisující zákonitosti jevů s předem neznámým výsledkem. U těchto modelů je vycházeno z „náhodného pokusu“, při kterém je sledován průběh požáru v čase. Tato metoda se vyznačuje nedostatečnou znalostí počátečních podmínek a získáváním mnohdy rozdílných výsledků při opakování stejných počátečních podmínkách. Z tohoto důvodu nejsou pravděpodobnostní modely požáru v technické praxi příliš rozšířeny [5, 17, 18].

Použité proměnné hodnoty jsou u pravděpodobnostního modelu náhodné. Tento model slouží jako prostředek pro odhad pravděpodobnostního rozdělení potenciálních

výstupů. Vstupní hodnoty mají náhodné časové rozdíly v průběhu výpočtu a s ohledem na neurčitost spojenou s průběhem požáru neprobíhá daný požár nikdy vícekrát stejným způsobem [5, 17, 18]

Pravděpodobnostní modely se dělí do tří základních skupin, a to na simulační, síťové a statistické modely [5, 17, 18]. Dále se těmito pravděpodobnostním modelům diplomová práce nevěnuje.

2.7.3 Deterministické modely

Deterministické modely řeší rozvoj požáru a procesů s ním spojených pomocí matematických rovnic popisujících fyzikální a chemické děje při požáru [5, 21].

Rozvoj a výsledky požáru jsou určeny fyzikálními podmínkami, které jsou nazývány požární scénáře. V požárních scénářích je zahrnuto mnoho proměnných, které mají vliv na výsledné hodnoty popisující požár. Tyto proměnné jsou např. množství a uspořádání hořlavých látek, místo vzniku požáru, provedení požárně bezpečnostních systémů, charakter a dispozice objektu, rozmístění a způsobilost evakuovaných osob a další. Přestože se tyto údaje liší v závislosti na konkrétním účelu modelu, je možné vstupní parametry rozdělit do několika skupin, týkající se požárního zatížení, výměny plynů s okolím a popisu prostoru, ve kterém k požáru došlo [5, 21].

Deterministické modely mohou zahrnovat velmi jednoduché modely mající závislost pouze na několika fyzikálních veličinách, nebo složité modely popisující chování požáru v jedné nebo více místnostech. V závislosti na složitosti požárního scénáře může vyřešení trvat i hodiny výpočtového času. Tyto modely tedy poskytují exaktní řešení pro konkrétní požární situaci, nesledují však pravděpodobnost, s jakou se dané požární situace mohou objevit v prostoru. Přesto mají tyto modely nezastupitelné místo při řešení konkrétních požárních situací [5, 21].

Deterministické modely lze rozdělit do dvou podskupin, a to na zónové modely a CFD modely (označovány českým ekvivalentem jako „modely typu pole“) [5, 21]. Diplomová práce se dále zónovým modelům požáru nevěnuje.

CFD modely („modely typu pole“)

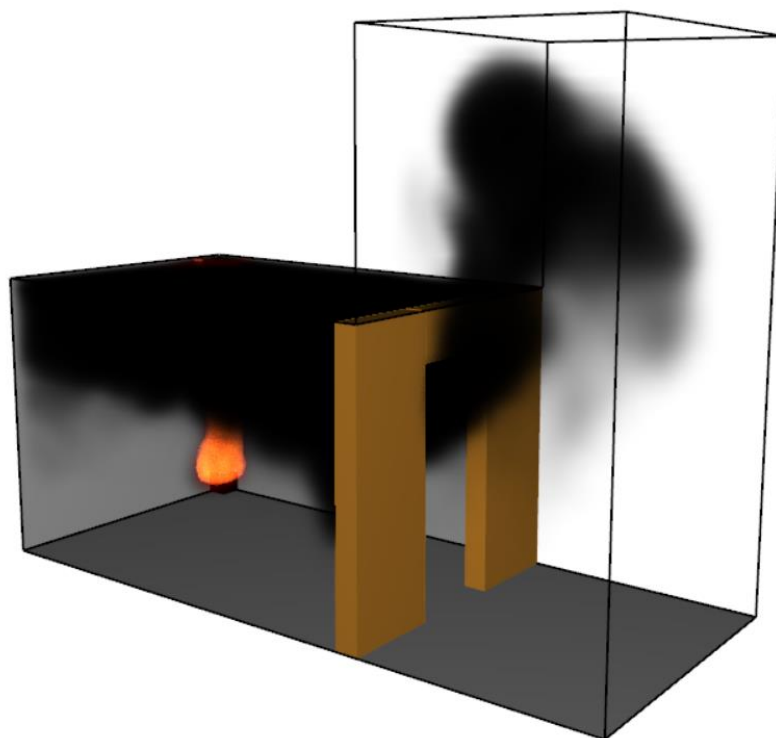
Modely, které jsou sofistikované programy postavené na algoritmech výpočetních dynamických modelů kapalin a plynů. Princip těchto modelů spočívá v rozdělení výpočetní oblasti do tzv. kontrolních objemů, mezi kterými probíhá vzájemná výpočetní interakce.

CFD modely řeší rovnice zachování hmotnosti, energie, hybnosti a částicového složení. Jedná se o tzv. Navier-Stokesové rovnice, tedy třídídimenzionální časově závislé nelineární parciální diferenciální rovnice [5, 21]. CFD modely jsou vhodné pro řešení problémů, kde je třeba zahrnout např. vliv teplotních gradientů v prostoru před požárem

nebo vliv venkovního tlaku vzduchu. Hlavní uplatnění těchto modelů v požárním inženýrství je při simulaci pohyb plyných zplodin hoření uzavřeným prostorem [5, 21].

CFD modely řeší stejně jako zónové modely parciální diferenciální rovnice zachování energie, hmoty a chemických látek, ale také rovnice zachování hybnosti. Výpočetní oblast je rozdělena na velké množství trojrozměrných buněk, tzv. kontrolních objemů, které vytvářejí prostorovou síť. Pro každou buňku jsou pak řešeny rovnice, které jsou zmíněny výše. V CFD programech lze simulovat pohyb kouře a plamene (obr. 6), požární větrání, hasicí zařízení a mnoho dalšího [5, 21].

Nevýhodou CFD programů je obtížná dostupnost vstupních dat, zejména tedy materiálových charakteristik. Vstupní data značně ovlivňují výstupy ze CFD modelů. Další nevýhodou je, že výpočet může trvat i několik stovek hodin. O délce výpočtu rozhoduje také jemnost sítě. Čím jemnější síť, tím je výpočet delší, ale přesnější [5, 21].



obr. 6: Šíření kouře a plamene v CFD programu (kód převzat [21])

Relevantnost a úplnost vstupních dat udává přesnost získaných výsledků (výstupů) z požárních simulací. Je možné rozlišovat vstupní hodnoty materiálové (vlastnosti materiálů) a vstupní hodnoty modelové (výpočetní síť, radiace atd.). Hodnoty potřebné pro výpočet se mohou lišit dle vybraného modelu požáru. Pro méně sofistikovanější modely obecně postačí méně vstupních dat než pro komplexní modely typu CFD [22].

Všechny objekty v modelovém prostoru musí odpovídat výpočetní síti. Obecně platí, že všechny geometrické charakteristiky modelového prostoru musí být zachyceny buňkou sítě. Objekty, které jsou menší než buňka sítě, musí být zanedbány, lépe alespoň

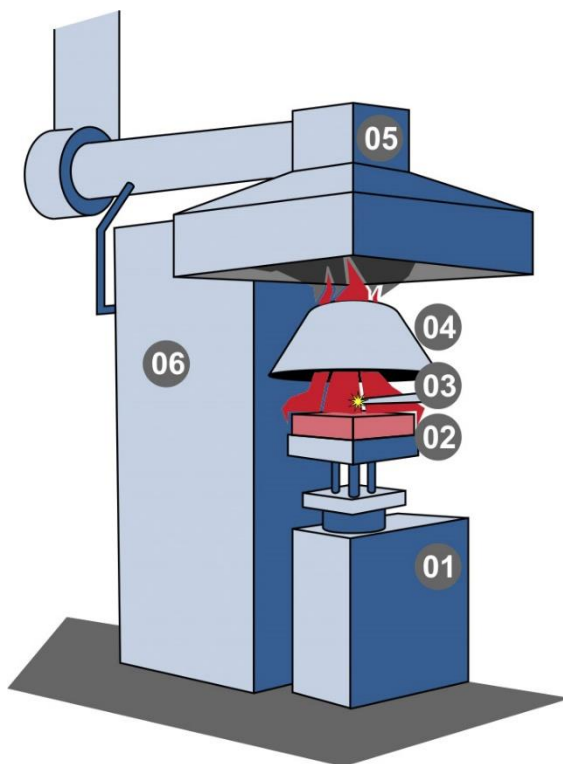
zjednodušeny, aby odpovídaly původním použití, to celé má za následek celkové zjednodušení modelu. Před zanedbáním konkrétního objektu je však třeba pečlivě zvážit, zda objekt může ovlivnit chování požáru (např. tepelný tok, proudění aj.) v modelovaném úseku. Úroveň detailů geometrie je provázána s velikostí buňky sítě. Často musí být proveden kompromis mezi velikostí sítě a zjednodušením geometrie objektu. Velikost buňky výpočetní sítě je jednou z proměnných, které ovlivňují přesnost výsledků. Při použití příliš hrubé sítě může dojít k zanedbání určitých detailů v proudění či teplotním poli. V uživatelských příručkách softwarových nástrojů jsou uvedena doporučení pro výběr velikosti buněk sítě, nebo lze tyto rozměry určit pomocí online programů dostupných na internetu [36]. Při rozhodování o velikosti buňky sítě je třeba vzít v úvahu rozměry celé výpočetní oblasti a dobu potřebnou pro výpočet. [22]

Důležitým parametrem pro požární simulaci metodou CFD je definice hoření. Při výběru způsobu popisu hoření, kdy lze postupovat od jednoduchého použití hořáku s předepsanou hodnotou, funkcí hodnoty v čase, rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy – HRRPUA, popis paliva, které hoří v závislosti na teplotě vznícení, až po definici paliva, které hoří podle chemických reakcí popisujících proces pyrolýzy. [22]

2.8 Rychlost uvolňování tepla

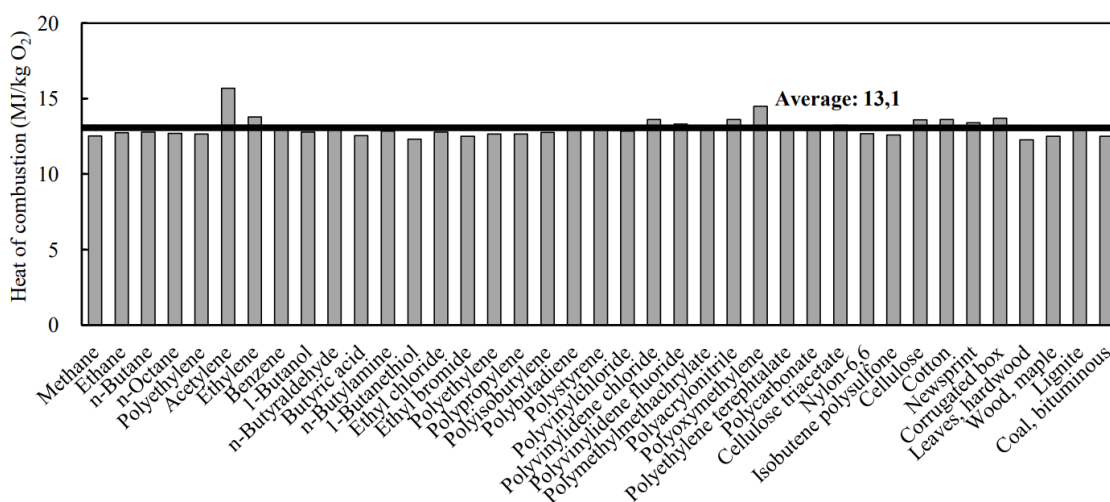
V této kapitole je práce zaměřena na samotné uvolňování tepla. Rychlost uvolňování tepla (angl. Rate of heat release – RHR¹, Heat release rate – HRR) je energie, která je uvolňována hořlavým materiálem za jednotku času. Veličina je časově proměnlivá, tudíž neuvádí pouze celkové množství uvolněného tepla, ale i časovou závislost v průběhu požáru [23].

¹ RHR – značení podle Eurokódu, ve výpočtech značené jako Q



obr. 7: Schéma kónického kalorimetru [23] – váhy pro měření úbytku hmotnosti (1), upevňovací rám pro vzorek (2), piezoelektrický zdroj jiskry (3), kónická topná spirála (4), odvodní potrubí s analyzátory veličin (5), měřicí ústředna (6)

Ideálním způsobem získání hodnoty rychlosti uvolňování tepla je samotné měření. K tomuto účelu se nejčastěji využívá metody kyslíkové kalorimetrie (obr. 7). Podstatou této metody je uvolnění konstantního množství energie na jednotku spotřebovaného kyslíku. Konstanta je stanovena na 13,1 MJ na jeden kilogram spotřebovaného kyslíku [24].



obr. 8: Spalné teplo vztažené ke spotřebě kyslíku druhu paliv [24]

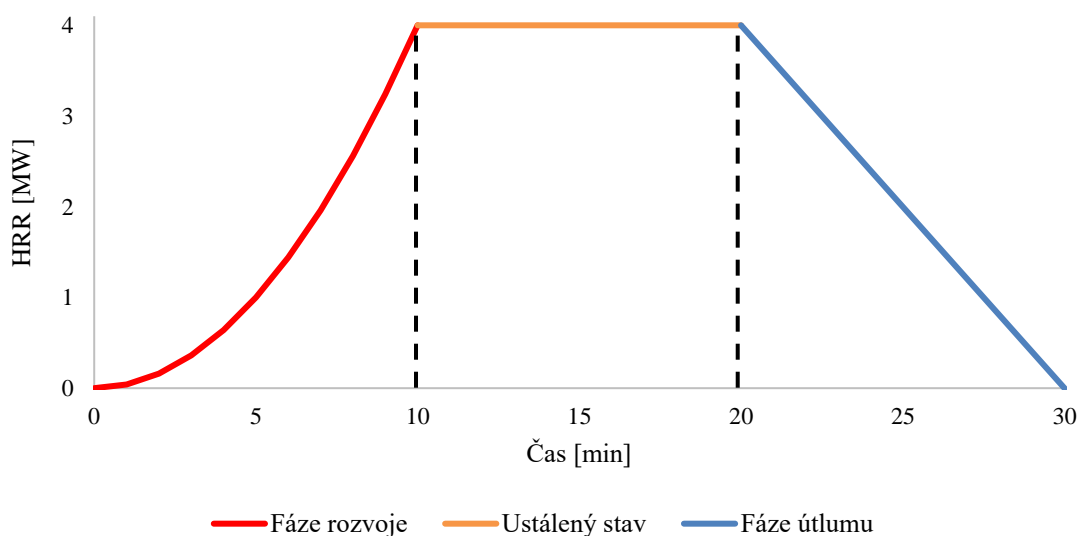
Z metody spotřeby kyslíku vychází i metoda kónické kalorimetrie, která je v současné době nejpoužívanější malorozměrovou zkouškou pro stanovení rychlosti uvolňování tepla. Stanovení HRR se provádí na kónickém kalorimetru dle normy ISO 5660-1 [25]. Z parametru rychlosti uvolňování tepla vychází některé další veličiny, jedná se např. průměrná rychlost uvolňování tepla (AHRE), celkové uvolněné teplo (THR), index rozvoje hoření (FIGRA), efektivní výhřevnost (EHC). Na základě HRR a s ním souvisejících veličin lze stanovit velikost požárního nebezpečí, intenzitu hoření a míru hořlavosti materiálů. Dále se tato PTCH využívá při modelování rozvoje požáru, simulaci návrhových požárních scénářů nebo také při klasifikaci stavebních výrobků do tříd reakce na oheň [25].

Průběh požáru lze charakterizovat třemi fázemi: fází rozvoje, ustáleným stavem a fází útlumu. Rychlost rozvoje požáru závisí na typu provozu, hustotě požárního zatížení a rychlosti rozvoje požáru. Po fázi rozvoje následuje ustálený stav, kde hodnota HRR dosahuje svého maxima na maximální ploše zasažené požárem. Fáze útlumu hoření je vyjádřena lineárním poklesem HRR. Zároveň model umožňuje stanovit model řízený požárem nebo palivem [26].

Fáze rozvoje, kde t [s] je jednotkou času a t_α [s] je doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolnění tepla o velikosti 1 MW je dána vztahem (1) [26].

$$Q = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 [W] \quad (1)$$

Na základě mnoha požárních experimentů bylo zjištěno, že počátek fáze útlumu nastává po vyhoření 70 % veškerého požárního zatížení [26]. Na následující obrázku (obr. 9) je uveden obecná křivka HRR.



obr. 9: Obecný rozvoj rychlosti uvolňování tepla

2.9 Sdílení tepla

V této kapitole současného stavu poznání je popsáno samotné sdílení tepla. Sdílení tepla je jedním ze způsobů přenosu energie, který spočívá v tepelné výměně, probíhající tak, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšimu tělesu. Výměna tepla může probíhat vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo sáláním (radiací). Při vedení tepla částice látky v oblasti s vyšší teplotou předávají část své energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím s nižší teplotou (majícím nižší energii). Při tomto procesu se částice nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh [27, 28].

Vedení tepla lze také rozdělit na ustálené a neustálené vedení. Ustálené neboli stacionární vedení tepla není závislé na čase, což znamená, že teplotní rozdíl mezi částmi těles je stálý. Při neustáleném neboli nestacionárním vedení tepla dochází k postupnému vyrovnávání teplotních rozdílů mezi jednotlivými částmi tělesa. Základním zákonem vedení tepla je Fourierův zákon, který je matematicky popsán níže. Tento zákon vyplývá z experimentálně zjištěných skutečností [27, 28].

2.9.1 Tepelný tok a hustota tepelného toku

Během požáru je chladnějším částicím v okolí předávána energie. Tato energie, která je předávána z teplejších částic na chladnější se nazývá tepelný tok. Tento proces vzniká vlivem tepelných ztrát požáru do okolí. Obecně lze tepelný tok definovat dle rovnice (2), kde Q [J] je množství přeneseného tepla a τ [s] jednotkou času [27, 28].

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} [W] \quad (2)$$

Pokud je tento tepelný tok vztažen na jednotku plochy kolmé ke svému gradientu, jedná se o hustotu tepelného toku. Tento vztah je definován dle rovnice (3) [27, 28].

$$q = \frac{d\dot{Q}}{dS} [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

2.9.2 Vedení tepla (kondukce)

Tento způsob sdílení tepla se uskutečňuje primárně v pevných látkách, kde částice s vyšší střední kinetickou energií předávají svou energii částicím s nižší kinetickou energií vlivem srážek [27, 28].

Pro stacionární vedení tepla homogenní látkou v kartézském prostoru (x, y, z), je dán vztah (4), známý jako Fourierův zákon vedení tepla [27, 28].

$$q = -\lambda \operatorname{grad}(T) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) [W \cdot m^{-2}] \quad (4)$$

T [K] je teplota a součinitel λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Jedná se o materiálovou vlastnost, která je proměnná s teplotou. Čím vyšší konstanta je, tím lépe příslušný materiál vede teplo. U různých tepelných izolací (skelná vlákna, minerální vlny atd.) se hodnota součinitele tepelné vodivosti pohybuje mezi 0,035 až 0,045 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Fourierův zákon však platí pro stacionární vedení tepla neboli pro vedení tepla, které je neměnné v čase. Řešení úloh vedení pro nestacionární vedení tepla je složitou operací. Obvykle se pro tento výpočet využívají různé numerické metody s využitím výpočetní techniky [27, 28].

2.9.3 Proudění tepla (konvekce)

Jedná se o přenos tepla z teplejších částic na chladnější v plynném nebo kapalném médiu (tekutině). Sdílení tepla mezi tekutinou a pevnou látkou se nazývá přesup tepla. Přestup tepla je definovaný Newtonovým ochlazovacím zákonem, kde lze snadno vypočítat hustotu tepelného konvektivního toku. V diferenciálním tvaru lze tento zákon popsát dle (5) [27, 28].

$$\alpha = \frac{dq}{dT} [W] \quad (5)$$

Hustotu konvektivního toku q [$W \cdot m^{-2}$] přímo úměrně ovlivňuje součinitel přestupu tepla α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]. Po integraci této rovnice lze definovat tento vztah dle (6), kde T_w [K] je teplota stěny pevné látky a T_f [K] teplota tekutiny, která předává teplo do pevné látky pomocí konvekce ($T_w < T_f$) [27, 28].

$$q = \alpha (T_f - T_w) [W \cdot m^{-2}] \quad (6)$$

V opačném případě, kdy je pevná látka teplejší než tekutina ($T_f < T_w$), platí vztah (7).

$$q = \alpha (T_w - T_f) [W \cdot m^{-2}] \quad (7)$$

Součinitel přestupu tepla je funkcí látkových vlastností tekutiny (viskozity, hustoty, měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti) a rychlosti proudění tekutiny. Jelikož jsou látkové vlastnosti tekutiny funkcí tlaku a teploty, je tedy součinitel přestupu tepla závislý i na teplotě a tlaku. Hodnoty součinitelů přestupu tepla mohou být v jednoduchých případech uvedeny v literatuře, jinak se obvykle součinitel přestupu tepla vyhodnocuje pomocí korelací s využitím bezrozměrných čísel nebo lze využít nějaký simulační software [29].

2.9.4 Sálání tepla (radiace)

Jedná se o přenos tepla elektromagnetickými vlnami do okolí. Na rozdíl od jiných způsobů přenosu tepla, probíhá sálání bez závislosti na látkovém prostředí, lze tedy přenášet teplo sáláním i ve vakuu. Pomocí Stefan-Boltzmannova zákona (8) lze definovat intenzitu vyzáření se zohledněním reálného povrchu materiálu [27, 28].

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8)$$

Intenzita záření $I \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}]$ prudce roste, a to se čtvrtou mocninou teploty $T \text{ [K]}$. σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, která má hodnotu přibližně $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$. $\varepsilon [-]$ je emisivita povrchu stěny vyzařovaného tělesa. Hodnota emisivity se v praxi pohybuje v intervalu $0 < \varepsilon < 1$. V případě, kdy se $\varepsilon = 1$, jednalo by se o tzv. absolutně černé těleso, které kompletně pohltí celý zářivý tok. Ve skutečnosti však dokonalé černé neexistuje a jde pouze o pojem, ke kterému se lze limitně přiblížit. Emisivita je závislá na materiálu a jeho povrchu a na teplotě povrchu. Materiály, jejichž emisivita se blíží k nule, odráží téměř všechny sálavý tok [27, 28].

2.10 Požární odolnosti konstrukcí

Jedním ze základních parametrů každého stavebního materiálu jakéhokoliv druhu je tzv. požární odolnost. Jedná se o dobu, po kterou je konstrukce schopna odolávat účinkům požáru, tak aby byla zachována její funkce (mezní stav). Těchto funkcí (mezních stavů), kterými jsou konstrukce schopné po daný čas odolávat účinkům požáru, je několik druhů. Jsou definovány dle normy ČSN EN 13501-2 [30].

Nosnost – R

Schopnost konstrukce odolávat po určitou dobu působení požáru na jeden nebo více povrchů při specifikovaném mechanickém zatížení, bez jakékoli ztráty konstrukční stability [30].

Celistvost – E

Schopnost prvku s dělicí funkcí odolávat šíření požáru pouze z jedné strany, bez přenosu požáru na neexponovanou stranu v důsledku průniku plamenů nebo horkých plynů. Mohou způsobit vznícení neexponovaného povrchu, nebo jakéhokoli materiálu ležícího v jeho blízkosti [30].

Izolace – I

Schopnost konstrukčního prvku odolávat působení požáru pouze z jedné strany, bez přenosu požáru v důsledku významného přestupu tepla z exponované strany na neexponovanou stranu. Přestup má být omezen tak, aby se nevznítala ani neexponovaná strana, ani materiál v její blízkosti, Prvek má rovněž vytvářet tepelnou bariéru, schopnou

bránit osoby v její blízkosti. Teplota na neexponované straně povrchu nesmí překročit danou mez [30].

Radiace – W

Schopnost konstrukčního prvku odolávat požáru pouze z jedné strany tak, aby se snížila pravděpodobnost přenosu požáru následkem prostupu významného sálavého tepla jak prvkem, tak i z neexponovaného povrchu prvku na sousední materiály. Prvek má také chránit osoby v jeho blízkosti. Tepelný tok nesmí v dané vzdálenosti od neexponovaného povrchu překročit danou mez [30].

2.11 Posuzování požární odolnosti konstrukcí

V následující kapitole je uveden stručný přehled, jak lze konstrukce posuzovat a jejich možné použití v souvislosti mostních konstrukcí.

Posuzování konstrukcí pro jejich požární odolnost se dělí na tři skupiny. První a nejzákladnější skupinou je posouzení pomocí tabulek. Tato metoda posouzení pomocí tabulek je uplatnitelná pouze za předpokladu použití normové teplotní křivky, a proto pro posouzení konstrukce namáhané uhlovodíkovou, či tunelovou teplotní křivkou (což je vhodnější model požáru) nelze na mostní konstrukce aplikovat [31].

Druhou skupinou pro posuzování požární odolnosti konstrukcí jsou zjednodušené výpočetní metody, do kterých patří metoda izotermie 500 °C, zónová metoda, metoda výpočtu založená na jmenovité křivosti sloupu, metoda pro smyk, kroucení a kotvení výztuže a poslední zjednodušená výpočetní metoda slouží pro posouzení nosníků a desek. Metoda izotermie 500 °C a zónová metoda se dají primárně aplikovat za předpokladu použití normové teplotní křivky. Izoterma 500 °C lze následně aplikovat i s použitím parametrické teplotní křivky. Na základě těchto skutečností se zjednodušené výpočetní metody nedají aplikovat pro posouzení požární odolnosti mostní konstrukce [31].

Poslední, třetí, skupinou jsou zpřesněné výpočetní metody, které umožňují realistickou analýzu konstrukce vystavené účinkům požáru. Vycházejí ze základních fyzikálních chování, která vedou ke spolehlivému přiblížení k očekávanému chování nosných prvků/konstrukcí za požáru. Tyto výpočetní metody musí obsahovat modely pro sestavení vývoje a rozložení teploty v prvcích a mechanické chování konstrukce nebo její části. Zpřesněné výpočetní metody lze dále použít s jakoukoliv teplotní křivkou za předpokladu, že jsou známy veškeré materiálové vlastnosti pro rozsah teplot a rychlost zahřívání. Tyto metody jsou proto vhodnými nástroji pro posouzení mostní konstrukce na účinky požáru [31].

3 Praktická část diplomové práce

Praktická část diplomové práce je zaměřena na řešení příklad, kterým je matematický model mostní konstrukce za použití výpočetního programu dynamiky tekutin [2]. Pod touto mostní konstrukcí se nachází nákladní automobil, který je plně naložen materiálem – dřevěným nábytkem. Nákladní automobil včetně nákladu je v tomto případě hlavní složkou paliva požáru, který ovlivňuje mostní konstrukci zespod. Touto konstrukcí je původní železniční podjezd. Praktická část diplomové práce je rozdělena na jednotlivé sekce, tím způsobem, jakým byl chronologický postup při řešení problematiky. Výstupem matematického modelu jsou teploty plynů pod mostní konstrukcí a teploty na povrchu konstrukce, které se dále vyhodnocují pomocí programu [1], který vytváří za pomoci vlastností materiálu teplotní křivky. Následně lze vykreslit vývoj teplotních profilů v konstrukci .

3.1 Předloha konstrukce pro model

V současné době je ve správě Ředitelství silnic a dálnic České republiky (ŘSD ČR) evidováno celkem 5 027 mostů na dálnicích a silnicích I. třídy – jedná se o sumu, ve které jsou i ocelové mosty. Tyto mostní konstrukce však nejsou vhodné pro řešení příklad diplomové práce, neboť jsou složité pro vytváření modelu a výpočet simulace požáru z hlediska časové náročnosti. Pro náplň diplomové práce byl proto hledán železobetonový most na silnicích II. třídy, který již nespadá pod ŘSD ČR. Z těchto ostatních [32] byl vybrán jeden konkrétní mostní objekt, který se stal předlohou pro matematický model v řešeném příkladu. Předpokladem nalezení vhodné předlohy se stala jednoduchost a zaměření se na hlavní nosnou konstrukci mostu, konkrétně deskovou. Velká část mostů je tvořena především konstrukcí trámovou, obloukovou anebo zavěšenou. Tyto hlavní nosné konstrukce by byly složité na modelování a následnou časovou náročnost výpočtu matematického modelu. Z tohoto důvodu byla zvolena právě desková konstrukce.

Konkrétním výběrem se stal železniční podjezd vyskytující se ve městě Turnov na silnici II/610 [32]. Podjezd a jeho dva podchody pro pěší pod železniční tratí se nachází v blízkosti Turnovského nádraží. Tento původní železobetonový most (obr. 10) byl postaven v roce 1934. Konstrukce se skládá ze dvou masivních podpěr na každé straně, dále dvě stěny s klenbovými otvory oddělující části vyhrazené pro pěší a vozovku.



a)



b)



c)

obr. 10: Předloha modelu [32] – a) přední pohled, b) zadní pohled, c) spodní část mostovky

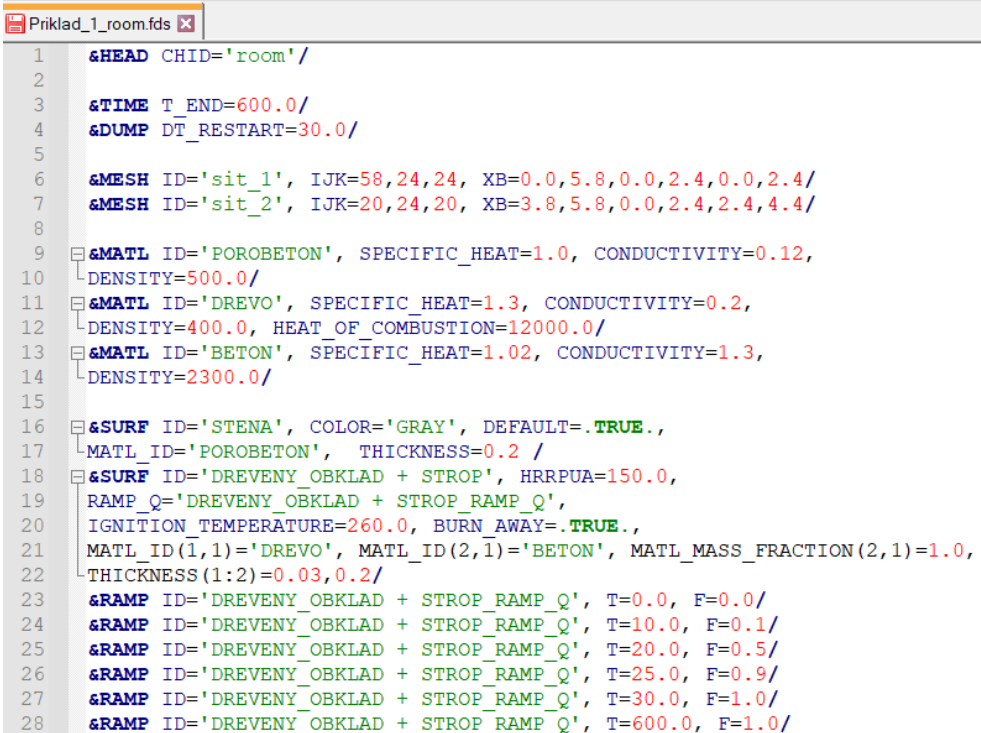
3.2 Použité softwarové nástroje

V diplomové práci jsou použity softwary, za jejichž pomoci byla řešena praktická část. V této kapitole jsou tyto programy představeny a popsány jejich základní funkce.

3.2.1 FDS – Fire Dynamics Simulator

Volně dostupný program je vyvíjen americkou organizací NIST (National Institute of Standards and Technology). První verze softwaru byla vydána roku 2000. Od této doby FDS prošlo mnoha změnami a úpravami vedoucím ke zdokonalení tohoto nástroje.

Cílem FDS je umožnit řešení praktických problémů požárního inženýrství a současně sloužit jako nástroj k porozumění dynamiky požáru a hoření. FDS je výpočetní program, který řeší rovnice popisující vývoj požáru čtením vstupních dat z textového souboru, tzv. zdrojového kódu. Výsledky jsou zaznamenávány rovněž v podobě textových souborů. Na FDS mohou navazovat další již nevýpočetní programy, které pomáhají interpretovat data získaná výpočtem v FDS nebo usnadňují práci při editaci a formulaci zadání pro simulační výpočet. Takovým programem je zejména Smokeview [2, 21].



```

1  &HEAD CHID='room'/
2
3  &TIME T_END=600.0/
4  &DUMP DT_RESTART=30.0/
5
6  &MESH ID='sit_1', IJK=58,24,24, XB=0.0,5.8,0.0,2.4,0.0,2.4/
7  &MESH ID='sit_2', IJK=20,24,20, XB=3.8,5.8,0.0,2.4,2.4,4.4/
8
9  &MATERIAL ID='POROBETON', SPECIFIC_HEAT=1.0, CONDUCTIVITY=0.12,
10 | DENSITY=500.0/
11 &MATERIAL ID='DREVO', SPECIFIC_HEAT=1.3, CONDUCTIVITY=0.2,
12 | DENSITY=400.0, HEAT_OF_COMBUSTION=12000.0/
13 &MATERIAL ID='BETON', SPECIFIC_HEAT=1.02, CONDUCTIVITY=1.3,
14 | DENSITY=2300.0/
15
16 &SURFACE ID='STENA', COLOR='GRAY', DEFAULT=.TRUE.,
17 | MATL_ID='POROBETON', THICKNESS=0.2 /
18 &SURFACE ID='DREVENY_OBKLD + STROP', HRRPUA=150.0,
19 | RAMP_Q='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q',
20 | IGNITION_TEMPERATURE=260.0, BURN_AWAY=.TRUE.,
21 | MATL_ID(1,1)='DREVO', MATL_ID(2,1)='BETON', MATL_MASS_FRACTION(2,1)=1.0,
22 | THICKNESS(1:2)=0.03,0.2/
23 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
24 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=10.0, F=0.1/
25 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=20.0, F=0.5/
26 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=25.0, F=0.9/
27 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=30.0, F=1.0/
28 &RAMP ID='DREVENY_OBKLD + STROP_RAMP_Q', T=600.0, F=1.0/

```

obr. 11: Příklad textového souboru – zdrojový kód

3.2.2 Smokeview

Smokeview pomáhá graficky zobrazit model a požadované výsledky pomocí animací. Zatímco FDS nemá žádné vlastní uživatelské rozhraní, Smokeview obsahuje rozhraní s jednoduchou nabídkou. K sestavení textových souborů obsahujících vstupní data je možné použít komerční softwarové nástroje, tzv. pre-procesory [2, 21].

3.2.3 PyroSim

PyroSim je grafické uživatelské rozhraní pro Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS modely mohou předpovídat kouř, teplotu, oxid uhelnatý a další produkující látky při požárech. Výsledky těchto simulací byly a jsou použity k zajištění bezpečnosti budov před výstavbou, hodnocení bezpečnosti stávajících budov a k rekonstrukci požárů pro pohavarijní vyšetřování hasičů a jejich výcviku [2].

3.2.4 TempAnalysis_s

Výpočetní program TempAnalysis_s slouží k teplotní analýze obdélníkových průřezů (desek, stěn, trámů a sloupů) vystavených účinkům požáru. Pomocí programu lze modelovat průřezy z libovolných materiálů, definovaných pomocí konstantních nebo teplotně závislých materiálových charakteristik, včetně průřezů opatřených izolační vrstvou. Teplotní zatížení je charakterizováno normovou nebo parametrickou teplotní křivkou podle normy ČSN EN 1991-1-2 [4]. Výstupem programu je grafické znázornění rozložení teploty v analyzovaném průřezu (teplotní profil, teplotní pole) a vyčíslení teplot v zadaných bodech průřezu. Výpočet je založen na metodě konečných prvků. Program byl vytvořen v prostředí matematického nástroje MATLAB R2007a. Uživatelské rozhraní programu je v anglickém jazyce [1].

3.3 Počáteční podmínky a vstupní parametry

Tato kapitola stanovuje, za jakých počátečních podmínek a vstupních parametrů byl spuštěn výpočet matematického modelu. Jedná se o proměnné, které se dají uživatelsky nastavit v rozhraní programu, a které ovlivňují průběh výpočtu.

Počáteční teplota a taktéž teplota okolí modelu byla nastavena na běžných 20 °C. Této teploty je dosaženo při počáteční relativní vlhkosti vzduchu 40 %. Další vstupní proměnou, která je schopna ovlivnit vývoj požáru a jeho chování je vítr – jeho intenzita a směr. V tomto případě nebyl zadán žádný z těchto parametrů, to znamená, že se vítr ve výpočtu neuvažuje. Taktéž nastavení počátečního tlaku bylo simulováno tak, aby odpovídalo běžnému atmosférickému tlaku, jako je tomu ve skutečnosti. Hodnota tlaku je stanovena na hodnotu 101 325 Pa. Vlastnosti použitých materiálů jsou podrobněji vysvětleny v podkapitole 3.4.3.

Pro průběh požáru, konkrétně vývoj uvolněného tepla, byl zvolen požár nákladního automobilu, který byl plně naložen dřevěným nábytkem [33]. Příklad je vybrán z katalogu uvolňování tepla, který publikace [21] obsahuje. Tato publikace [21] se odkazuje pomocí referencí na článek [34], který se přímo zabýval tímto příkladem.

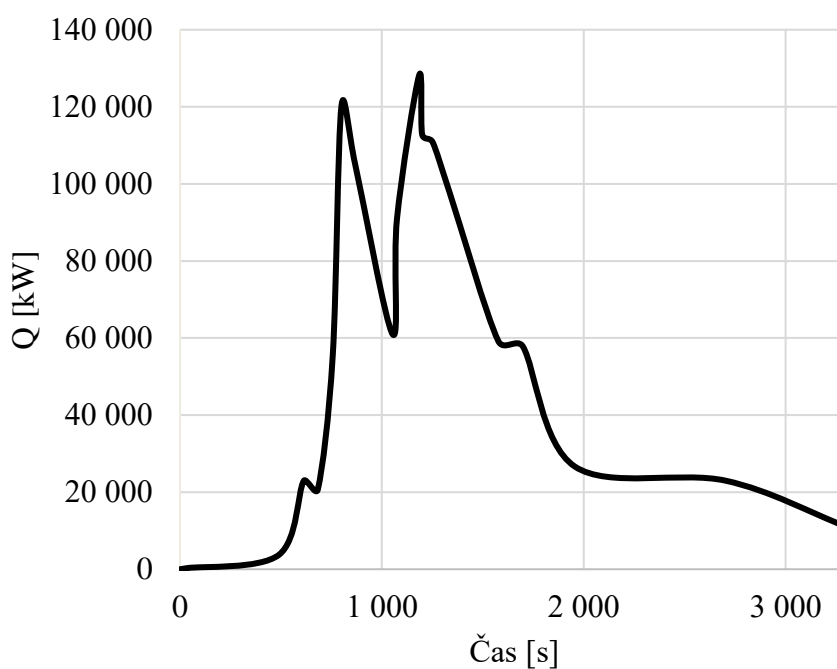
Tento soubor [33], který je jakýmsi vyhodnocením demonstrované zkoušky obsahuje mimo jiné popis nákladního automobilu (konkrétní typ není popsán, pouze je uveden popis dieselového motoru, podle kterého byl nákladní automobil dohledán), délka hřídele přívěsu, která činila 12,2 metru a celková hmotnost převáženého zboží, v tomto případě necelé dvě tuny (1994 kilogramů) dřevěného nábytku, 75 % hmotnosti tvořila celulóza a zbylých 25 % plast. Právě informace o dieselovém motoru a délce hřídele napomohly v nalezení odpovídajícího automobilu, aby byl model automobilu realistický.

Nejdůležitějším údajem celého souboru byla křivka HRR, která zachycuje nejdůležitější hodnoty v čase zkoušky. Maximální hodnota uvolněného tepla byla

128 097 kW. Tento soubor uvádí křivku pomocí zaznamenaných hodnot, které jsou níže v uvedené tabulce (tab. 3). Z těchto hodnot byl sestaven graf HRR (obr. 12). Celková doba zkoušky činila 3 313 sekund (cca 55 minut). Tato doba byla zachována i pro řešený příklad.

tab. 3: Hodnoty HRR v průběhu zkoušky [33]

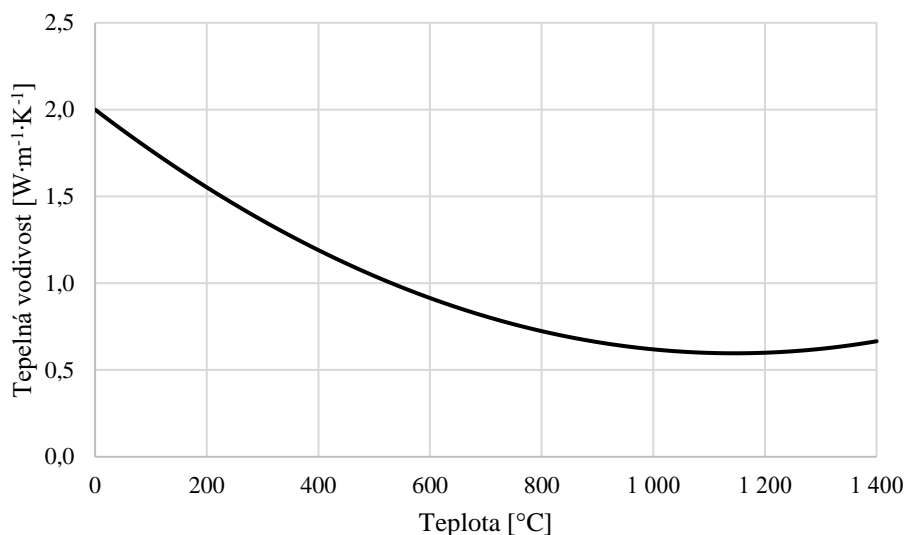
Čas [s]	HRR [kW]
0	0
34,9	283,4
488,6	3 684,2
613,0	22 955,5
682,5	20 688,3
756,6	55 546,6
799,5	120 162,0
867,3	105 142,0
1 053,6	60 931,2
1 074,8	90 971,7
1 184,0	128 097,0
1 199,5	112 794,0
1 251,6	110 810,0
1 337,1	97 489,9
1 576,4	59 230,8
1 698,2	57 813,8
1 955,9	26 639,7
2 705,0	22 955,5
3 313,7	10769,2

 Q_{\max} 

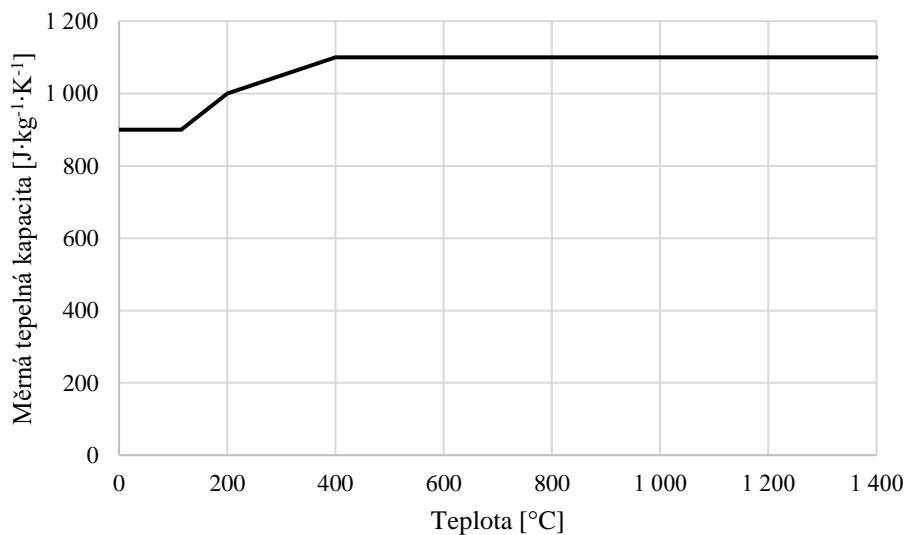
obr. 12: Graf průběhu HRR demonstované zkoušky [33]

3.3.1 Vlastnosti materiálů

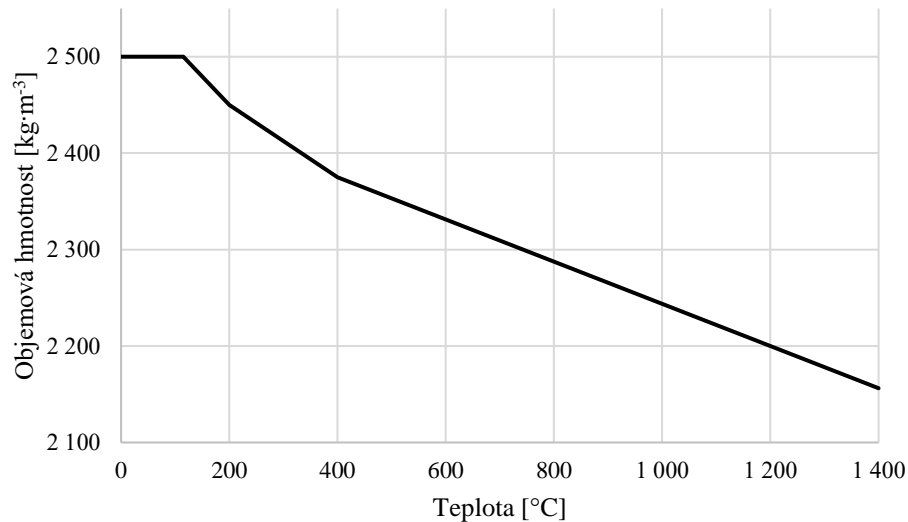
Jediný materiál, který byl použit v modelu je beton. V PyroSimu [2] lze specifikovat vlastnosti materiálu pomocí tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] (obr. 13), měrné tepelné kapacity [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] (obr. 14) a objemové hmotnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] (obr. 15). Veškeré tyto parametry a jejich hodnoty jsou převzaty z eurokódu [4]. Vlastnosti betonu se v závislosti na vzrůstající teplotě mění, jak je vidět na grafech níže.



obr. 13: Tepelná vodivost betonu [1, 4]



obr. 14: Měrná tepelná kapacita betonu [1, 4]



obr. 15: Objemová hmotnost betonu [1, 4]

3.4 Modelování v softwaru FDS

Veškerá tvorba modelu byla vytvořena za pomoci programu PyroSim [2], který je velice přívětivý pro uživatele svým rozhraním.

Prostor, ve kterém dochází k požární situaci je dimenzován tak, aby se v něm nenacházely zbytečné prostory, které nejsou potřebné k výpočtu – v tomto případě se jednalo o „osekání“ prostoru vedle podjezdu, který v reálu tvoří zemina a ve stejném smyslu odstranění prostoru nad mostovkou. Tyto veškeré idealizace a zjednodušení napomáhají k urychlení výpočtu.

3.4.1 Velikost výpočetní sítě

Modelovací prostor je ohraničen hranicemi o rozměrech $10,0 \times 20,0 \times 6,0$ (šířka \times délka \times výška) [m]. Veškeré dimenze, ať už konstrukce podjezdu, či konstrukce vozovky byly zvoleny vhodně s ohledem na návrh pozemních komunikací [35].

Celková šířka vozovky činí 8 metrů, je rozdělena pomocí vodorovného dopravního značení na dva jízdní pruhy, z nichž každý je široký 3,75 m. Jednotlivé mocnosti stěn činí jeden metr, taktéž mostovka tvořená železobetonovou deskou a její mocnost je jeden metr.

Velikost jednotlivých buněk výpočetní sítě byla nastavena na krychle o rozměrech $0,25 \times 0,25 \times 0,25$ [m]. Čím jemnější by výpočetní síť byla, tzn. že by se zmenšovala velikost jedné výpočetní buňky, tím přesnější výsledky program posléze nabízí. To vše by bylo na úkor délky výpočtu, který je mimo jiné náročný na hardware počítače, který provádí výpočet. Velikost buňky o hraně 0,25 metru byla specifikována za pomoci programu, který je volně dostupný na internetu [36]. Tento program nabídne uživateli tři

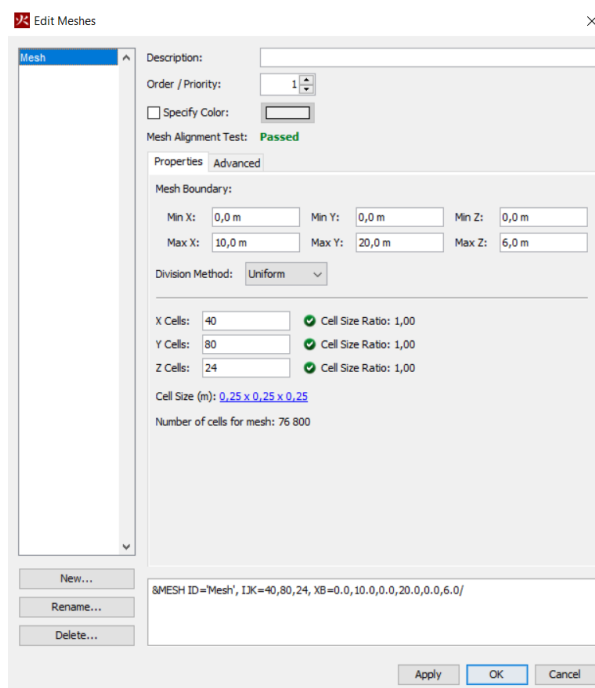
varianty velikost výpočetní buňky – od nejhrubší po nejjemnější, na základě velikosti prostoru, maximálního uvolněného tepla v prostoru a dalších proměnných (hustota vzduchu, měrná tepelná kapacita vzduchu a tíhové zrychlení). V tomto případě bylo doporučeno pro nejhrubší síť uvažovat krychli o hraně 1,67 m. To by bylo pro tento příklad krajně nevhodné. Výsledky by byly velice zkreslené a s touto velikostí buňky by nešlo vymodelovat prostor tak, aby bylo zaručen správný výpočet požáru. Pro jemnější síť bylo navrženo uvažovat rozměr hrany 0,66 m a pro nejjemnější síť byla stanovena krychle o hraně 0,41 m.

Za předpokladu uvažování rozdělení prostoru tak, aby bylo jednodušší model vytvářet, byla stanovena velikost hrany výpočetní krychle právě 0,25 m. Tato hodnota je sice ještě menší, než je nejmenší doporučená, ale v těchto rozměrech se dají vymodelovat tvary odpovídající realitě (model nákladního automobilu – kabina řidiče, pneumatiky, návěs).

Takto nastavený výpočetní prostor je ohraničen plochami, které se dají nastavit, zda fungují na principu otevřených ploch, tedy umožňují odvod kouře a tepla z modelu anebo plochy, které jsou inertní (příkaz – INERT). Model má tuto inertní plochu právě jen v rovině $Z_{\min} = \pm 0,000$ m. Na všech ostatních hranicích je nastaven příkaz – OPEN [37].

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,10.0,0.0,20.0,0.0,6.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.0,20.0,0.0,6.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,20.0,20.0,0.0,6.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,0.0,0.0,0.0,6.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,0.0,20.0,6.0,6.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.0,10.0,0.0,20.0,0.0,0.0/
```

obr. 16: Zdrojový kód nastavení otevřenosti ohraničujících ploch [2]



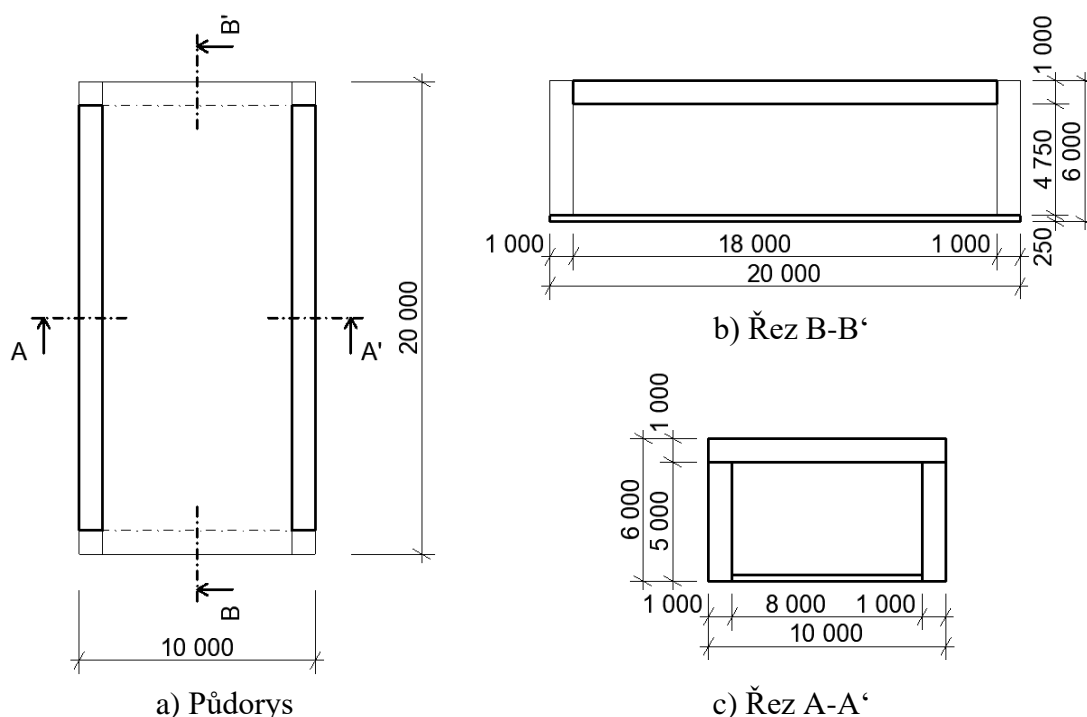
obr. 17: Zadání výpočetního prostoru [2]

3.4.2 Rozměry konstrukcí a nákladního automobilu

Svislé nosné konstrukce – stěny, podpírající betonovou desku, která tvoří hlavní nosnou statickou funkci mostu, jsou kvádry o rozměrech $1,0 \times 18,0 \times 5,0$ [m] (tloušťka \times délka \times výška).

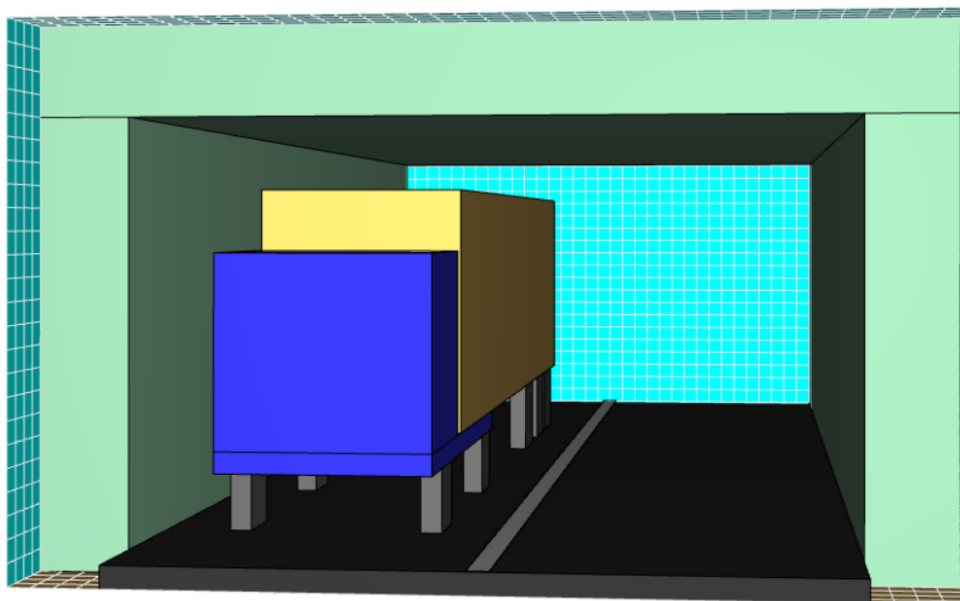
Betonová deska o mocnosti taktéž jeden metr, je prostě uložená na dvou stěnách. Statická funkce ovšem nehraje žádnou roli v softwaru FDS. Materiál těchto konstrukcí je definován jako CONCRETE (viz. kapitola 3.3.1).

Poslední konstrukcí v prostoru je vozovka, ta je zde pouze jako vizuální doplněk, stejně tak jako vodorovné dopravní značení v podobě jedné plné čáry, která pŕlívá vozovku na dva jízdní pruhy. Výška vozovky činí 0,25 m. Tím je určena i celková průjezdná výška mostu, která je 4,75 m.

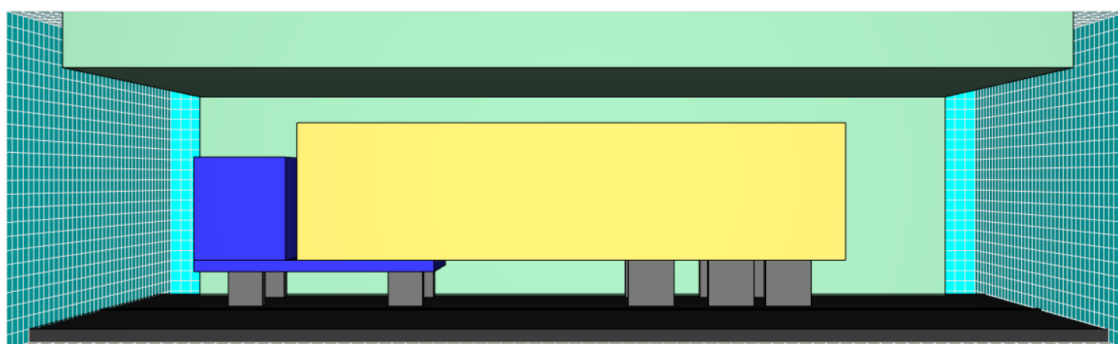


obr. 18: Rozměry matematického modelu

Nákladní automobil (tahač) a jeho rozměry jsou převzaty z technických listů dohledaných za pomoci specifikace (viz. kapitola 3.3). Pŕodorysné rozměry návěsu, na kterém se nachází burner, jsou $2,5 \times 12$ [m]. Pŕodorysná plocha je 30 m^2 . Výška návěsu je v základu nastavena na tři metry. Velikost návěsu odpovídá standardním rozměrům tak, jak je běžně známe.



obr. 19: Pohled na vymodelovaný prostor s konstrukcí a nákladním automobilem [2]



obr. 20: Boční pohled na model (skrytá boční stěna) [2]

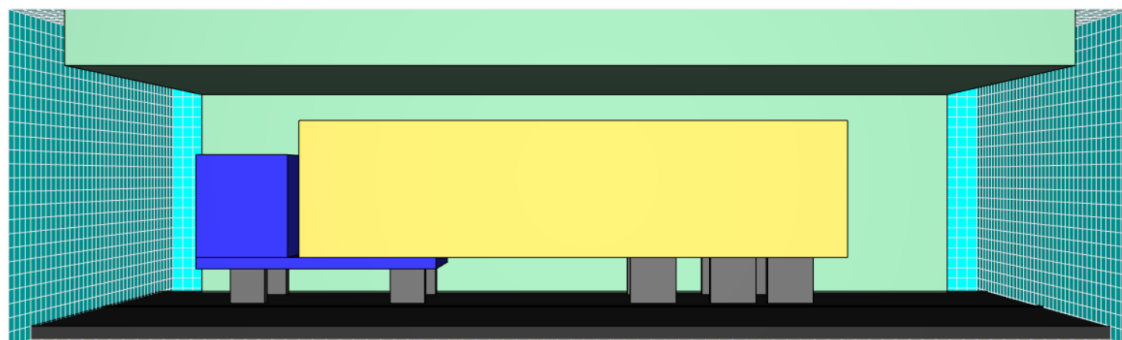
3.5 Rychlost uvolňování tepla

V rámci řešeného příkladu byly provedeny tři výpočty. Jednotlivě se od sebe lišily pouze v tom, že se měnila výšková poloha burneru (plochy, na které vzniká reakce – požár). Tyto polohy byly určeny uživatelsky a jednalo se o nejnižší možnou polohu neboli pouze podlaha přívěsu – DP.3, druhá poloha byla uprostřed výšky přívěsu – DP.2 a poslední variantou bylo umístění burneru v maximální výšce přívěsu – DP.1 (tab. 4).

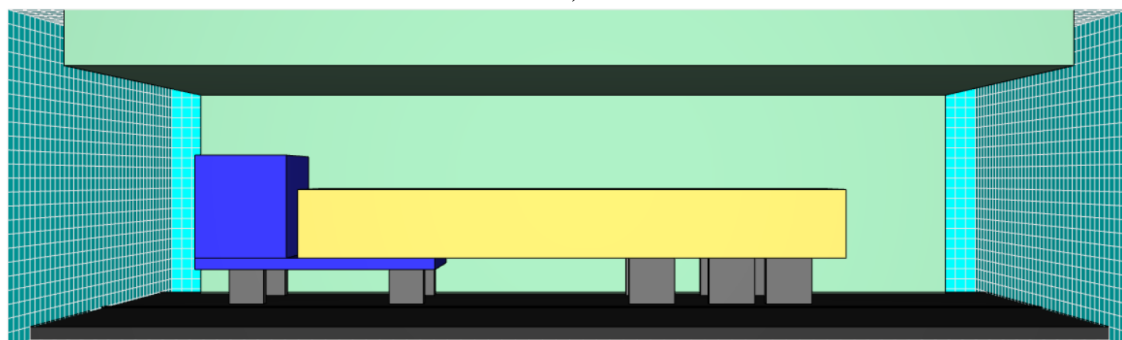
Důvodem pro zvolení těchto tří polohových výšek burneru je, že se neuvažuje pyrolýza hoření, neboť není definována – postupné odhořívání materiálu, ale je použitý zjednodušený postup přes velikost uvolněného tepla. Za tohoto předpokladu je zachována reálnost tím způsobem, že se plocha hoření mění právě ve výškových polohách. Pro vyhodnocení se dále pracuje pouze s nejhorší variantou pro konstrukci z hlediska teplot.

tab. 4: Výškové polohy jednotlivých burnerů

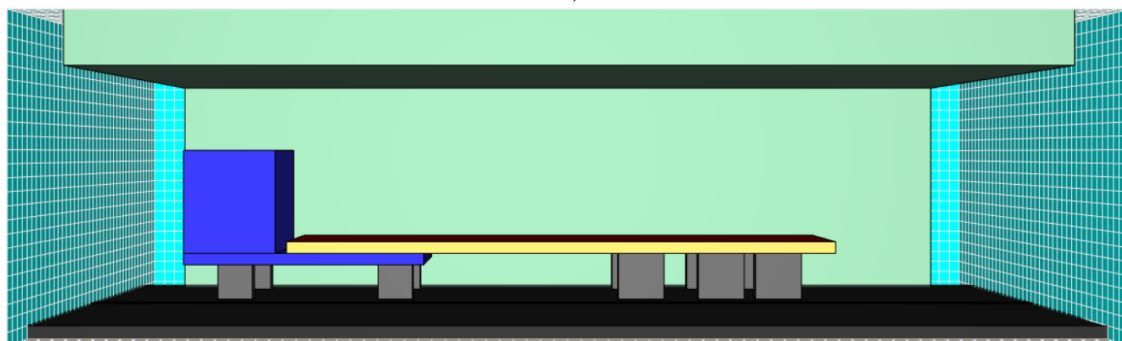
Označení výpočtu	Výšková poloha burneru vůči ±0,000 m
Výpočet 1 – DP.1	4,25 m
Výpočet 2 – DP.2	2,75 m
Výpočet 3 – DP.3	1,50 m



a)



b)

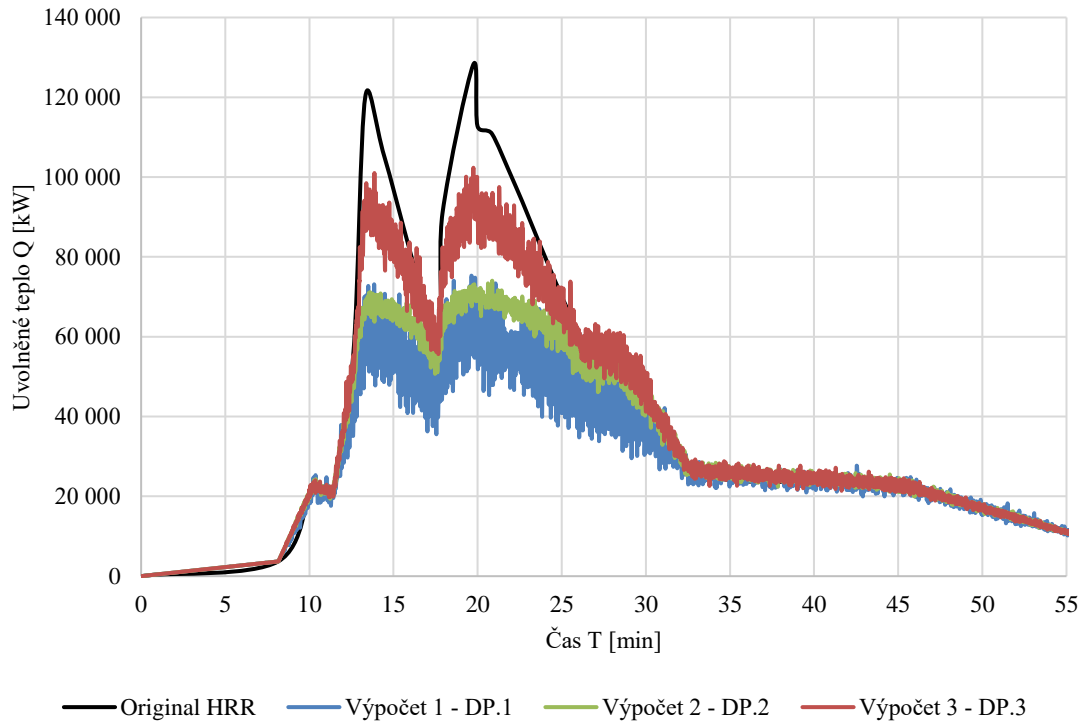


c)

obr. 21: Rozdílné výšky přívěsu [2] – a) výpočet 1 – DP.1, b) výpočet 2 – DP.2, c) výpočet 3 – DP.3

3.5.1 Definování požáru

Požár lze v softwaru FDS definovat pomocí funkce uvolněného tepla na jednotku plochy (HRRPUA – Heat Release Rate Per Unit Area [37]). Maximální hodnota uvolněného tepla činí 128 097 kW (tab. 3), půdorysná plocha přívěsu 30 m². HRRPUA je tedy podíl těchto dvou hodnot a po dosazení je hodnota 4 269,9 kW·m⁻².



obr. 22: Porovnání jednotlivých výpočtů HRR s originální křivkou

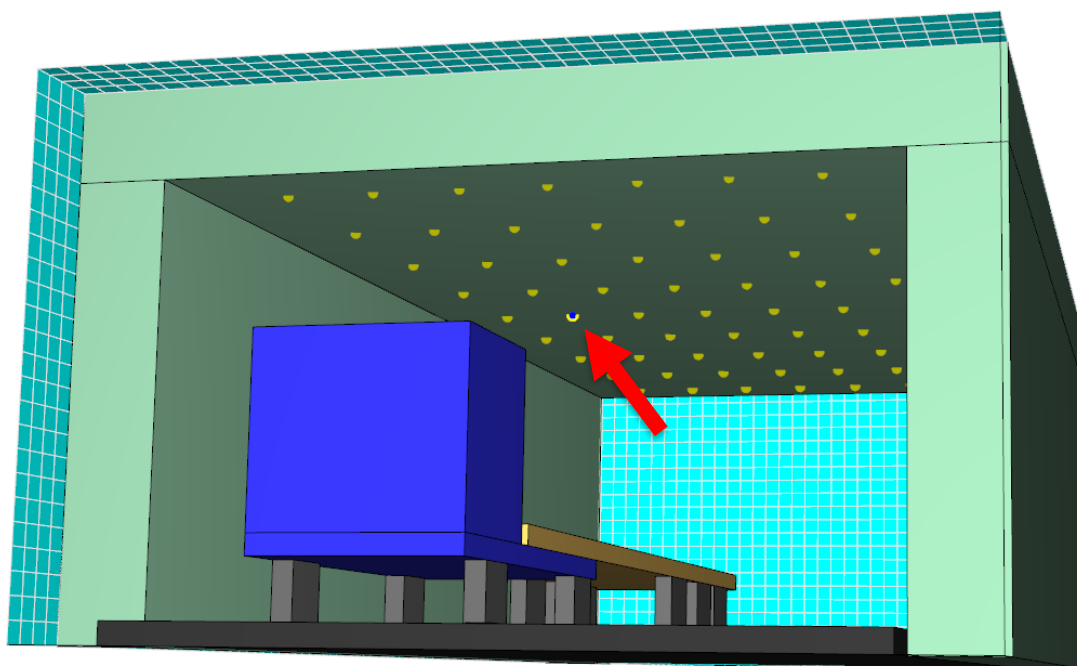
Z tohoto porovnání lze vyvodit takové výsledky, že čím níže je umístěn burner – v tomto případě DP.3 (který představuje plochu hoření na podlaze návěsu), tím více se křivka blíží ke skutečným naměřeným hodnotám. Hodnoty nepřekročily originální vývoj uvolněného tepla, což je v pořádku, neboť by to znamenalo, že je zadefinován mnohem větší požár, než je tomu doopravdy. Nicméně hodnoty nejsou ani stejné jako v originálním experimentu. Což může být zapříčiněno rozdílnými podmínkami originálu a matematického modelu. Co se týče maximální hodnoty uvolněného tepla, chybí třetí simulaci necelých 20 MW do originálu.

3.6 Výsledky teplot

V modelu se vyskytují dva typy měřících zařízení snímající nárůst vývoje teplot pod mostní konstrukcí. První skupinou těchto měřidel jsou termočlánky (funkce popisující měřidlo v programu FDS – THERMOCOUPLE) snímající teploty horkých plynů z požáru. Tyto termočlánky jsou výškově nadefinovány 0,001 m pod konstrukcí. Jsou tedy ve výšce 4,999 m od roviny $\pm 0,000$ m. Pokud by byly přímo na konstrukci, tak by pomocí této funkce (THERMOCOUPLE) neměřily žádné hodnoty. Pro měření teplot na povrchu konstrukce, tedy ve výšce 5 m slouží měřící zařízení, která jsou definována příkazem – WALL TEMPERATURE. Všechna tato měřící zařízení jsou umístěna v rovině XY ve vzdálenostech 1×1 [m] [37].

Ze všech těchto zařízení pak byla naměřená data vyhodnocena a pro jedno měřící zařízení, které udávalo nejvyšší teploty dále zpracována. Poloha tohoto měřícího zařízení

(jak pro příkaz THERMOCOUPLE, tak WALL TEMPERATURE) se nachází přímo nad plochou burneru [37]. Na obrázku (obr. 23) níže je tato poloha měřicího zařízení vyznačena.

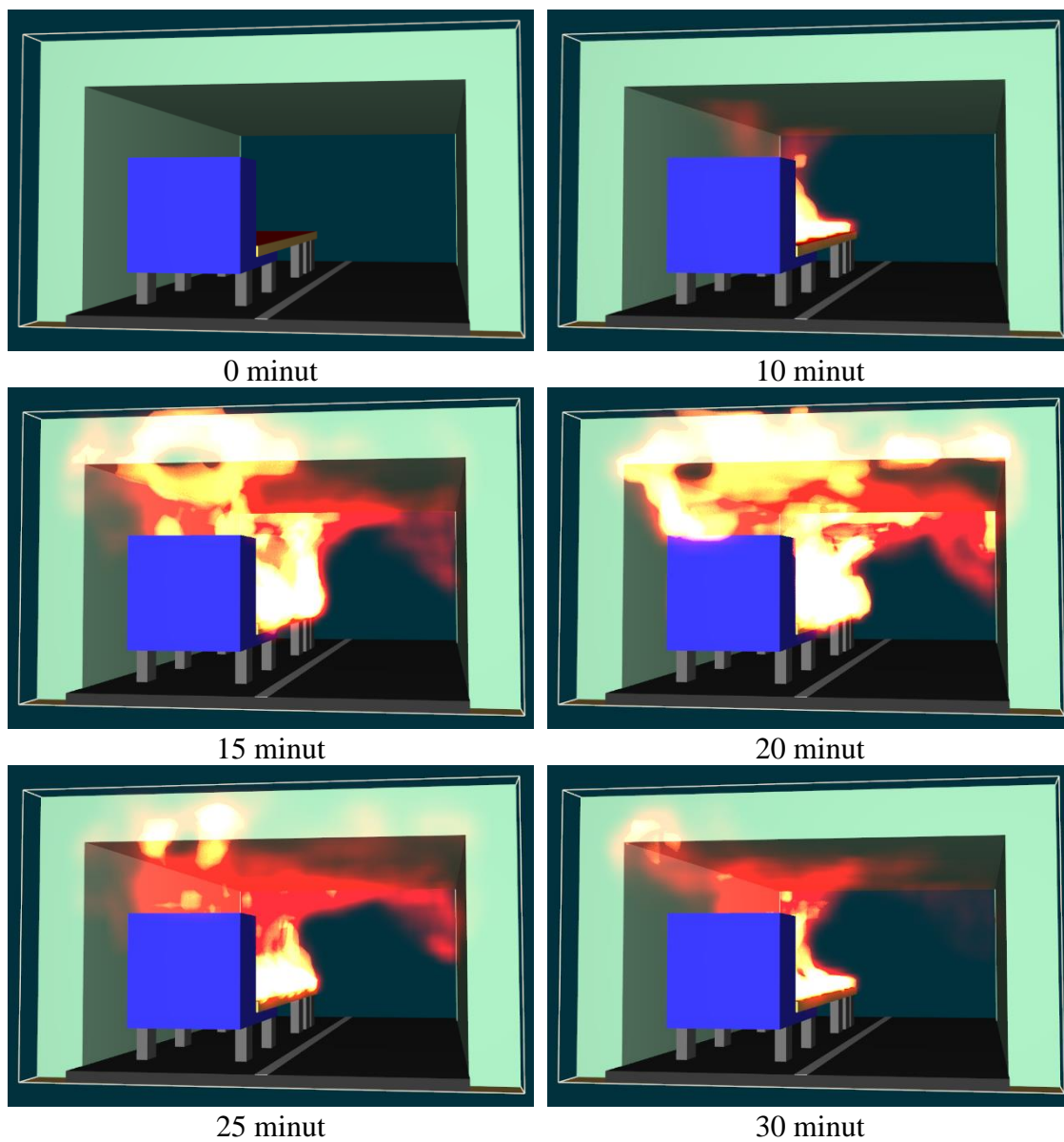


obr. 23: Rozmístění měřicích zařízení [2]

V následujících dvou podkapitolách se budou nacházet podobné grafy/výstupy jak z poskytnutých dat softwarem FDS, tak data, která byla získána z programu TempAnalysis_s (dále jen TA_s). Tento program pracuje s daty v podobě .xlsx přípon. Uživatel programu za pomoci návodu připraví požadovaný vstup. Tyto vstupy jsou dva. Jedním z nich je popis charakteristik materiálu závislých na teplotě. V tomto případě se jedná o materiál – beton (popis těchto materiálových vlastností je popsán v kapitole 3.3.1). Druhým vstupem je potom teplotní křivka. V tomto případě to jsou hodnoty poskytnuté z FDS výpočtu.

V rámci výpočtu byla použita dvojice měřicích zařízení. Z toho vyplývá, že z každého výpočtu jsou k dispozici dva grafy, a to s vývojem teploty plynu pod konstrukcí a teplotou na povrchu konstrukce.

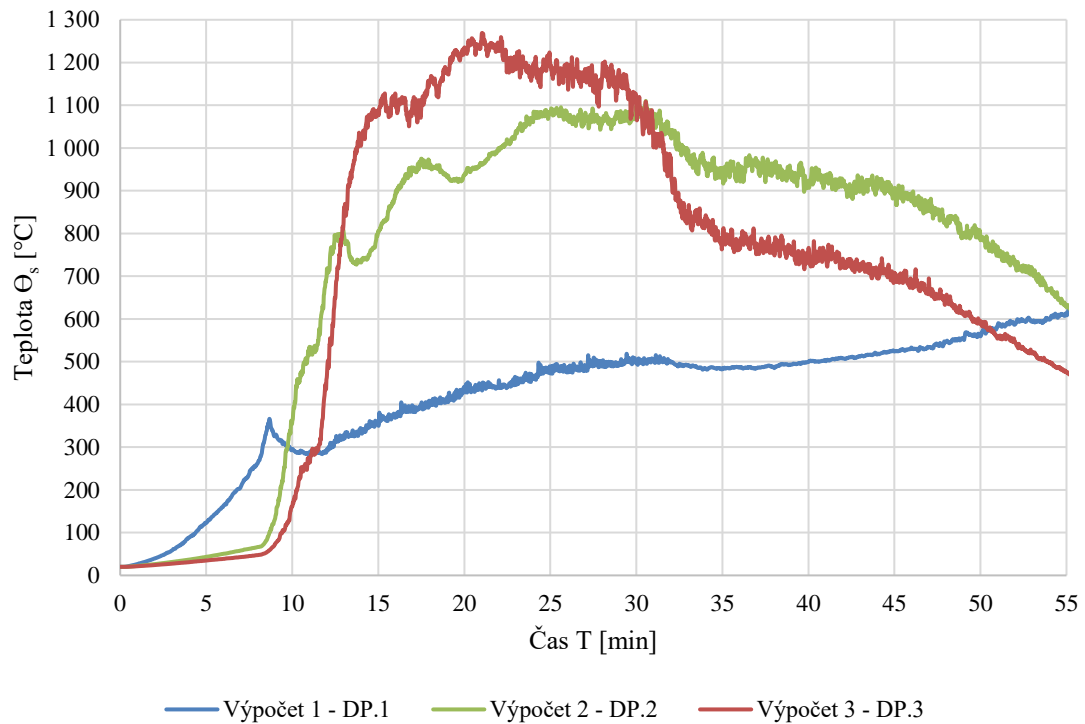
Pro pokračování je důležité zmínit, že v grafech z výpočtu jsou uvedeny tři řady výsledků, co se týče výškové polohy burneru. Nicméně nejvyšších teplot bylo vždy dosaženo u výpočtu 3 – DP.3, a proto se dále pracuje už pouze s daty z tohoto výpočtu.



obr. 24: Vizualizace požáru v důležitých čase simulace

3.6.1 Teploty na povrchu konstrukce

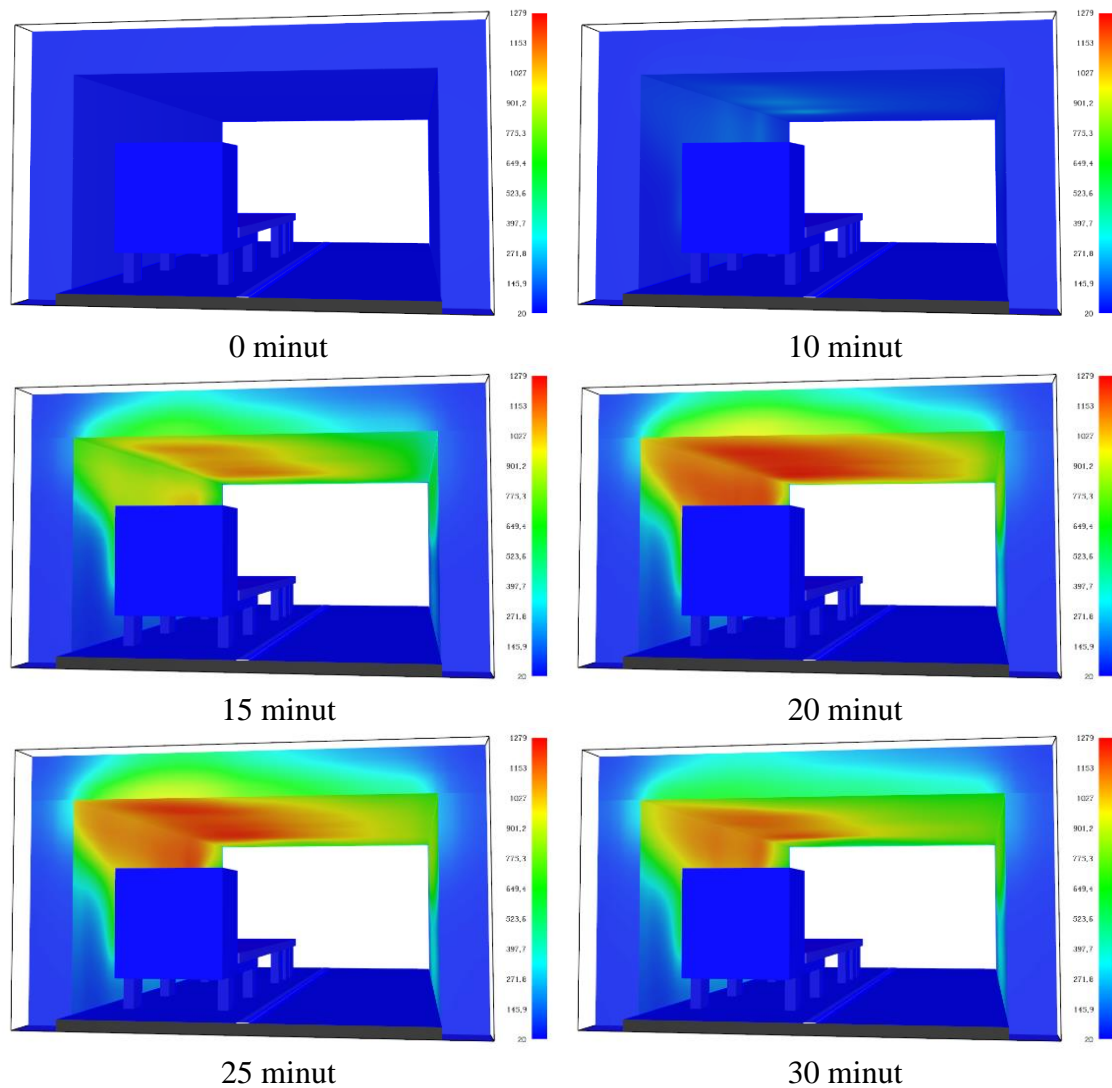
Na grafu (obr. 25) vývoje teplot na povrchu konstrukce je vidět, že nejvyšších teplot je dosaženo v rámci výpočtu 3 – DP.3. Maximální teplota činí 1 269 °C a to přibližně ve 21. minutě výpočtu.



obr. 25: Vývoj teplot na povrchu konstrukce jednotlivých výpočtů

Jak již je popsáno výše, převzaly se pouze hodnoty z výpočtu 3 – DP.3 a vložily se do programu TA_s (obr. 27). Tloušťka konstrukce odpovídá zadané tloušťce v modelu. Parametr součinitele prostupu tepla α (alfa) je zadán pomocí Dirichletovy okrajové podmínky, kterou lze simulovat pomocí velké hodnoty α (v tomto případě 10^6), neboť jsou známy veškeré hodnoty na povrchu.

Výsledkem jsou pak poskytnutá data opět v příponě .xlsx, se kterými se dá dále pracovat a vytvářet grafy s teplotními profily (obr. 28).



obr. 26: Vizualizace vývoje teplot na povrchu konstrukce v důležitých čase simulace

Na grafu (obr. 28) jsou znázorněny teplotní profily teploty v závislosti na čase v jednotlivých sledovaných vzdálenostech od exponované strany konstrukce. Pro příklad, křivka s označením „ $x = 0$ “ znamená, že je vykreslena křivka právě na povrchu konstrukce, kde se nacházel samotný měřící termočlánek. Tato křivka se shoduje s výstupem „Výpočet 3 – DP.3“ (obr. 25). Dále je patrné a potvrzuje se, že s rostoucí vzdáleností od exponované strany konstrukce se křivky zplošťují.

Graf (obr. 28) zobrazuje pouze výsledky do vzdálenosti 50 mm od exponované strany (tj. křivka $x = 50$). Neznamená to, že výsledky nebyly sledované dál než 50 mm od exponované strany, ale za touto vzdáleností se již všechny křivky zplošťují k hodnotě 20 °C. Jde zde tedy pouze o přehlednost výsledků, tak aby byly jednotlivé křivky čitelné a srozumitelné.

TA_s

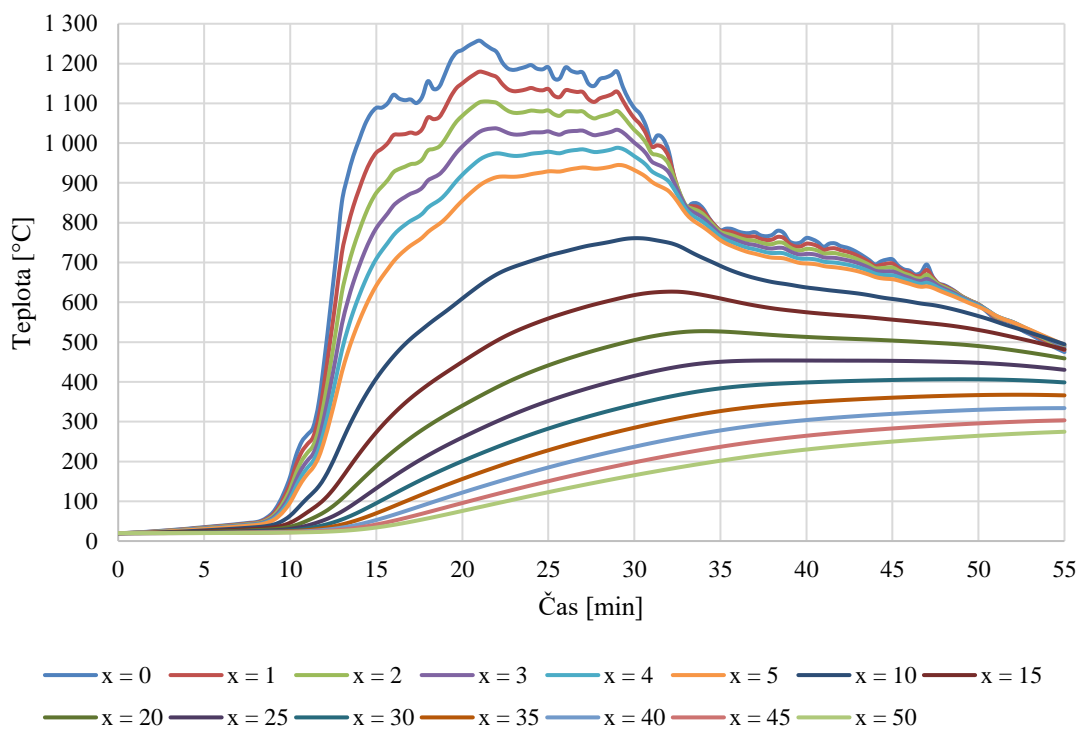
(c) Radek Štefan, radek.stefan@fsv.cvut.cz, 10/2018

h (mm)
 α ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

t (min)

x (mm)

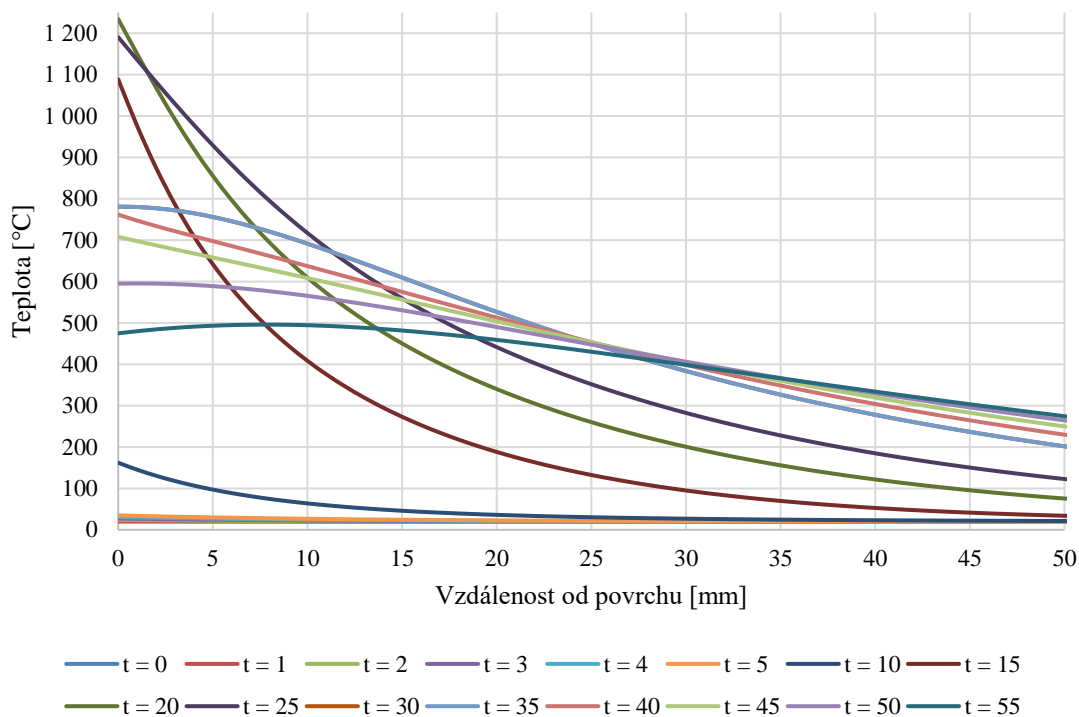
obr. 27: Výpočet teplotního profilu s teplotami na povrchu konstrukce [1]



obr. 28: Teplotní profily závislosti teploty na čase v jednotlivých vzdálenostech od exponované strany

Na grafu (obr. 29) jsou vyobrazené teplotní profily závislosti času na teplotě. Jednotlivé křivky představují čas (např.: $t = 0$). To znamená, že tato křivka je vykreslena v čase počátku simulace, je tedy konstantní po celou dobu simulace a její hodnota činí 20 °C (teplota okolního vzduchu, počáteční podmínka, která byla nastavena).

Graf (obr. 29) je na vodorovné ose seříznutý na hodnotě 50 mm. Neznamená to, že výsledky nebyly sledované dál než 50 mm od exponované strany, ale za touto vzdáleností se již všechny křivky limitně přibližují k hodnotě 20 °C. Jde zde tedy pouze o přehlednost výsledků, tak aby byly jednotlivé křivky čitelné.

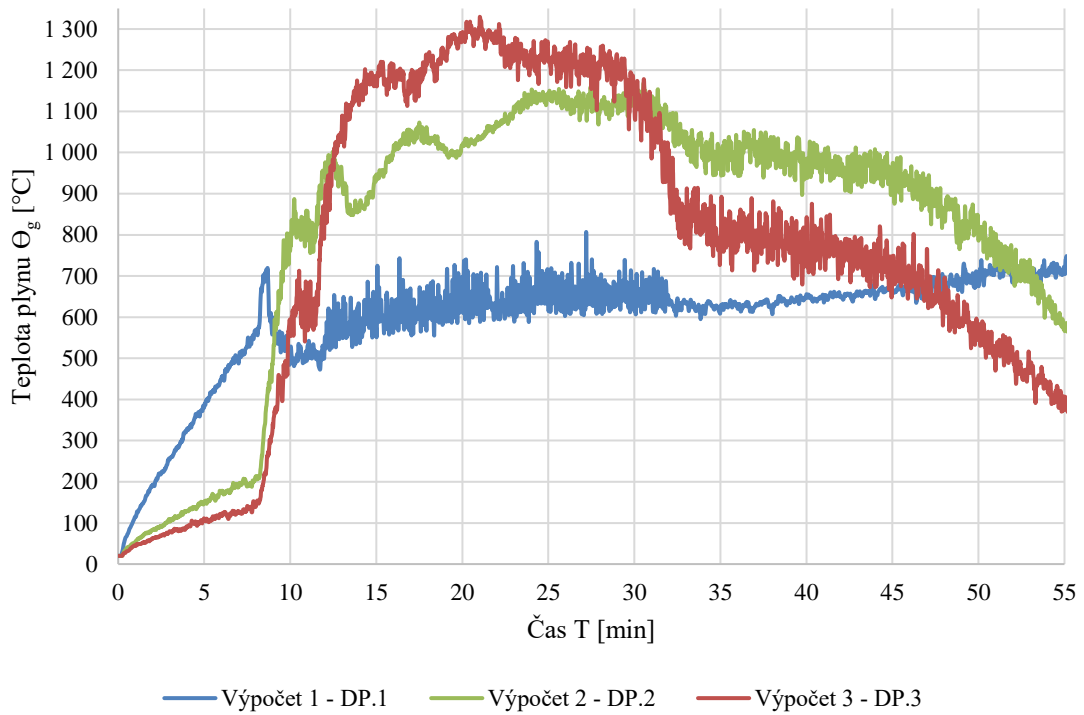


obr. 29: Teplotní profily závislosti teploty na vzdálenostech od exponované strany v jednotlivých časech

3.6.2 Teploty plynu pod konstrukcí mostovky

Pro výsledky teplot plynu pod konstrukcí mostu je zvolen systematický postup, tak jako tomu bylo u výsledků teplot na povrchu konstrukce (viz. kap. 3.6.1)

Na grafu (obr. 30) vývoje teplot na povrchu konstrukce je právě vidět, že nejvyšších teplot je dosaženo v rámci výpočtu 3 – DP.3. Maximální teplota činí 1 329 °C a to přibližně ve 21. minutě výpočtu. Maximální teplota plynu byla dosažena ve stejné době jako maximální teplota na povrchu.



obr. 30: Vývoj teplot plynu jednotlivých výpočtů

TA_s — □ ×

(c) Radek Štefan, radek.stefan@fsv.cvut.cz, 10/2018

Load material properties	Load fire curve
DP-Material_EC.xlsx	DP.3_Fire-curve-gas.xlsx
Plot material properties	Plot fire curve

h (mm) α (W m⁻² K⁻¹)

[Calculate](#)

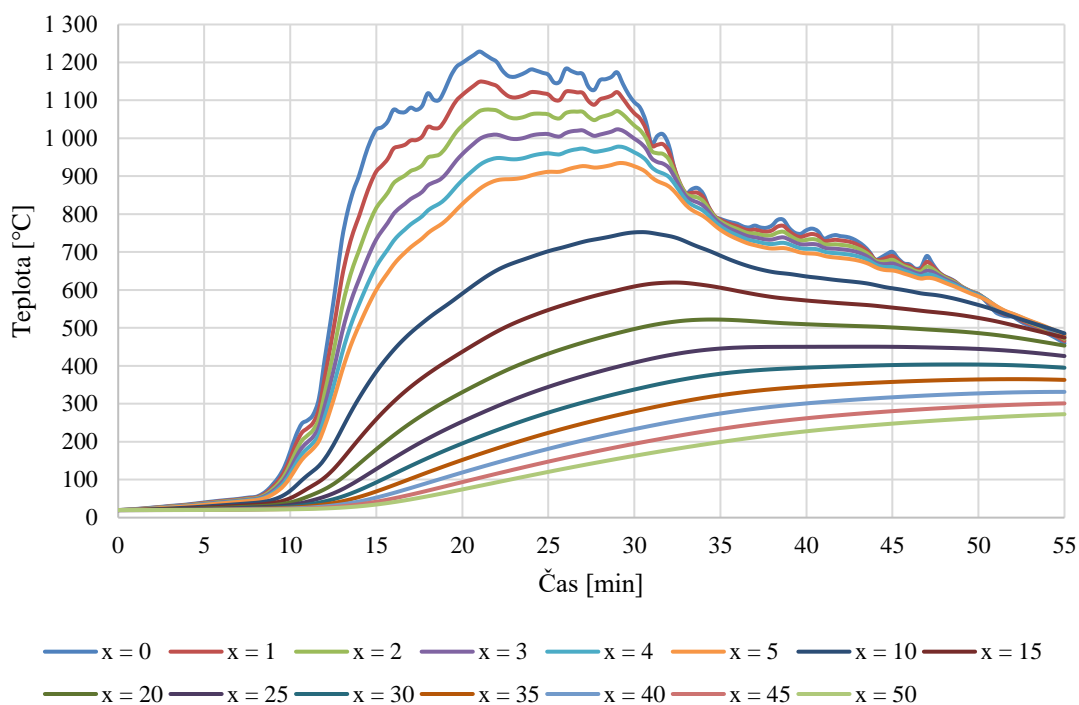
t (min) [Plot temp. profile](#) [Save temp. profile](#)

x (mm) [Plot temp. evolution](#) [Save temp. evolution](#)

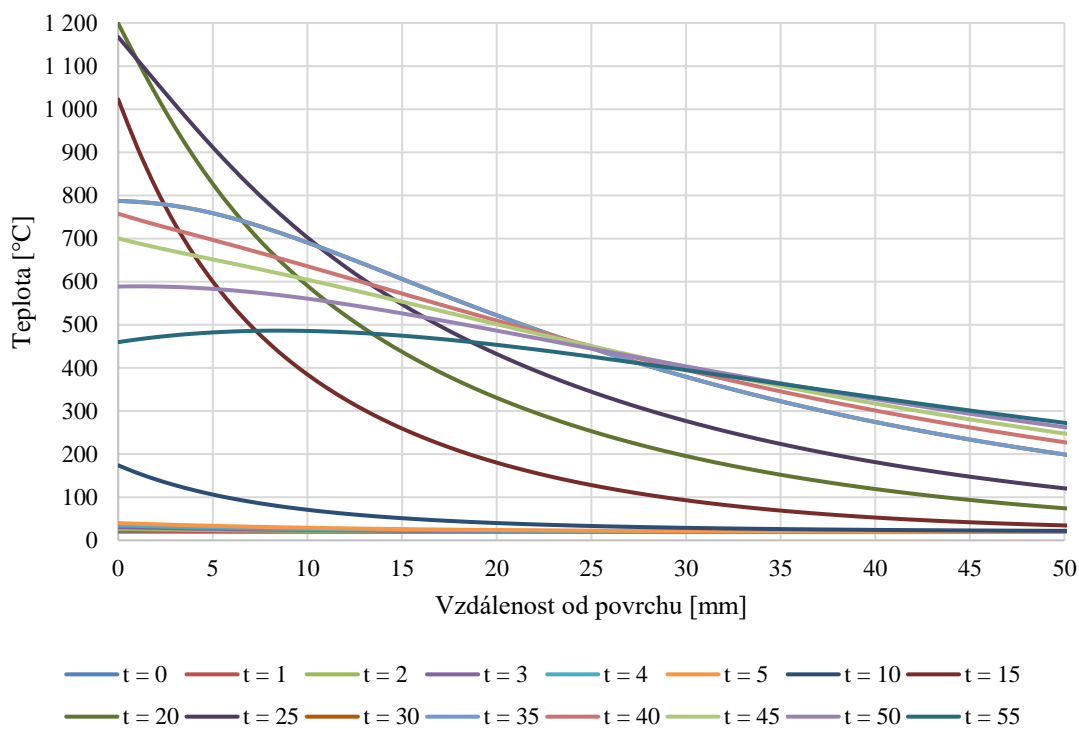
[Save data](#)

[Exit](#) [New](#)

obr. 31: Výpočet teplotního profilu s teplotami plynu [1]



obr. 32: Teplotní profily závislosti teploty na čase v jednotlivých vzdálenostech od exponované strany



obr. 33: Teplotní profily závislosti teploty na vzdálenostech od exponované strany v jednotlivých časech

3.7 Porovnání jednotlivých výstupů

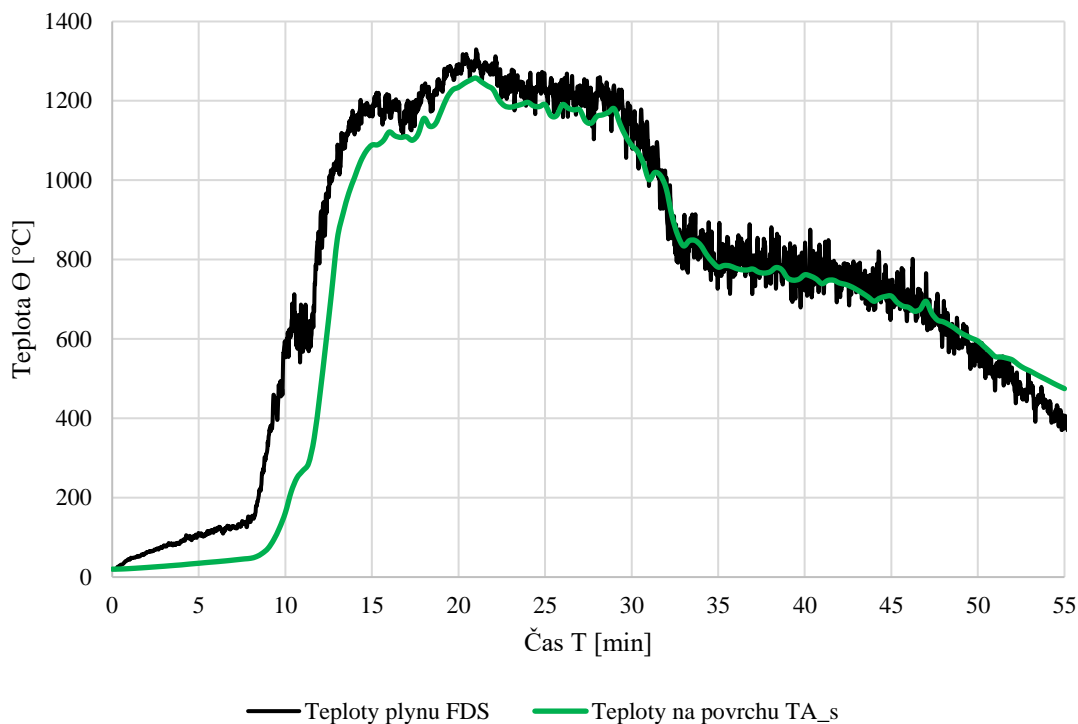
Za základě poskytnutých dat je možné v rámci řešeného příkladu v praktické části diplomové práce provést porovnání dvou výstupů ze dvou softwarů. Pro porovnání jsou použity dva grafy – teplotní vývoje. Neboť máme k dispozici jak teploty plynu, tak teploty na povrchu konstrukce, je možné provést porovnání, kdy se tyto křivky mají vzájemně překrývat. Porovnání je provedeno pro teplotu ve vzdálenosti $x = 0$ m.

Důvodem tohoto přezkoumání je potvrdit již dva známé přístupy. Program TA_s [1] je schopný vyřešit vedení tepla v konstrukci, na rozdíl od FDS, který tento fyzikální děj řeší velmi okrajově a zjednodušeně. Z programu PyroSim [2] jsou přímo poskytována data – teploty plynu, která nejsou nikterak ovlivněna. Oproti tomu je program TA_s schopen z poskytnutého vývoje teplot plynu pod konstrukcí pomocí Dirichletovy okrajové podmínky přepočítat přestup tepla konstrukcí a jeho sdílení.

První křivka, která je pouze převzatá z modelace požáru je znázorněna černou barvou v grafu (obr. 34). Tyto teploty jsou z termočlánku snímající teploty těsně pod povrchem (příkaz THERMOCOUPLE). Tato data jsou čistě ze simulace. Druhá křivka, zelená, znázorňuje vývoj teplot získaných z termočlánku umístěného na povrchu konstrukce (příkaz WALL TEMPERATURE).

Data ze simulace s teplotami na povrchu byla vložena do programu TA_s (TempAnalysis_s), spolu s těmito daty byly zadány vlastnosti betonu, které jsou totožné s vlastnostmi materiálu definovaném v FDS. Zásadním krokem je nastavení takzvané Dirichletovy okrajové podmínky, kdy je známa hodnota na povrchu konstrukce – splněno. Tato podmínka je definována velkým číslem součinitele prostupu tepla α . V tomto případě se jedná o hodnotu rovnající se $\alpha = 10^6$ [-].

Výsledkem porovnání je, že se tyto křivky do jisté míry překrývají a je tedy potvrzena Dirichletova okrajová podmínka. Neúplnost v překrytí může být způsobena v několika ovlivňujícími faktory. Těmito faktory může být odchylka v přesnosti měření definovaných termočlánků snímající teploty v FDS, nebo zadání velkého čísla součinitele prostupu tepla α .



obr. 34: Porovnání vývoje teplot s použitím Dirichletovy okrajové podmínky

3.8 Porovnání kritických teplot výztuží

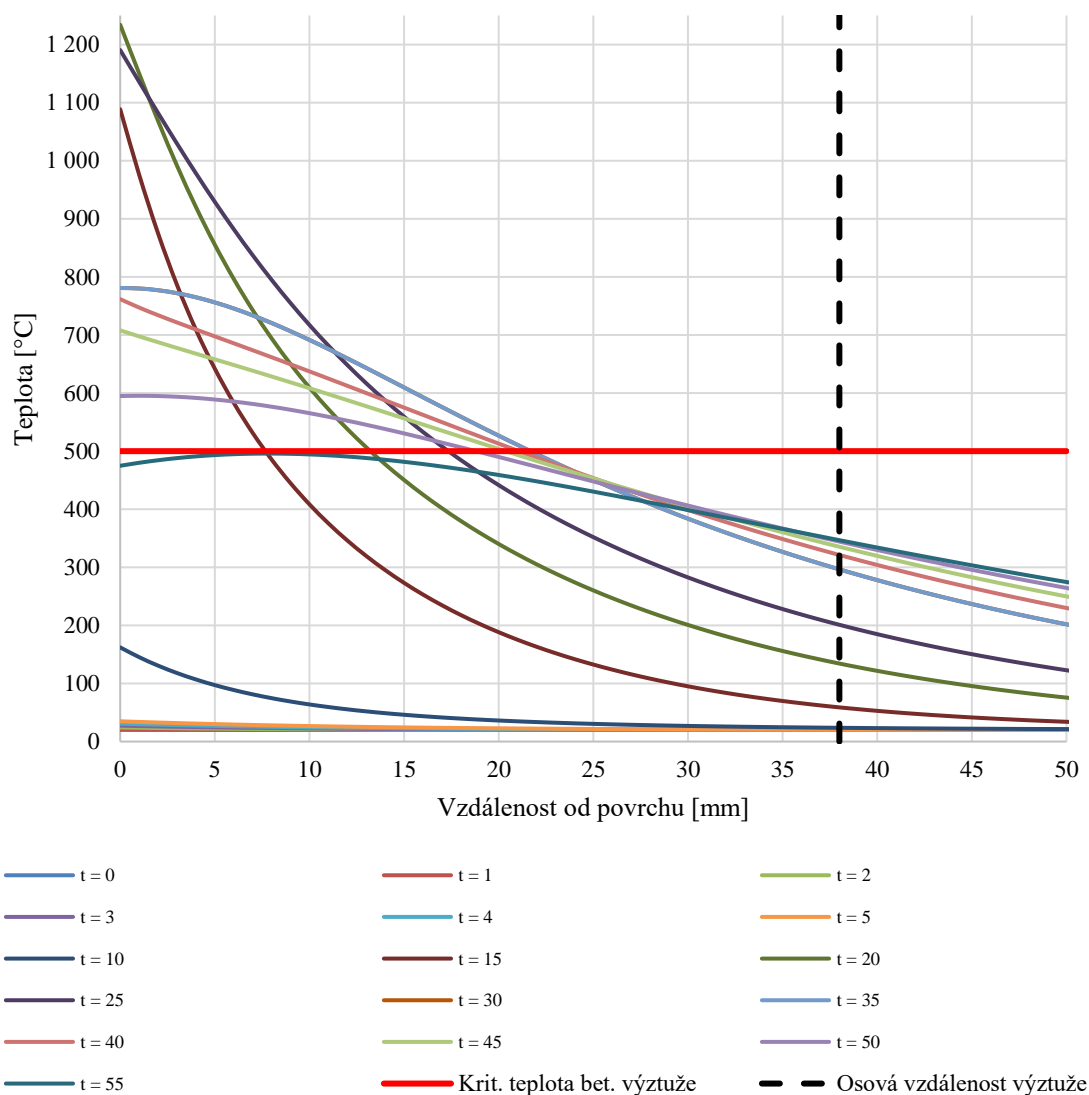
V řešení příkladu byla uvažována běžná betonářská výztuž. Proto byla porovnána s kritickou teplotou ve výztuži. V tabulce (tab. 5) jsou jmenovité kritické teploty jednotlivých výztuží, které se používají ve stavebnictví.

tab. 5: Kritické teploty betonářské výztuže [31]

Kritické teploty pro jednotlivé betonářské výztuže			
Výztuž	Běžná betonářská výztuž	Předpínací výztuž – pruty	Předpínací výztuž – dráty a lana
Kritická teplota Θ_{cr}	500 °C	400 °C	350 °C
Posouzení v rámci DP	ANO	NE	NE

Na základě dostupných teplotních profilů konstrukce lze zhodnotit, kdy dojde ke kolapsu konstrukce překročením kritické teploty ve výztuži. V rámci řešeného příkladu byl zvolen most s deskovou hlavní nosnou funkcí. Tento mostní objekt byl zrealizován v roce 1934 (tento údaj se nachází na konstrukci). Do devadesátých let 20. století bylo volena jako dostačující krycí vrstva betonu železobetonových konstrukcí 20 mm [38]. Za předpokladu použití běžné betonářské nosné výztuže o průměru 20 mm, třmínků o průměru 8 mm, je osová vzdálenost výztuže od exponovaného povrchu 38 mm. Pokud by byl tento most v ideálním stavu – bez prasklin v betonu, bez odkrytých třmínků či nosné

výztuže, je možné konstatovat, že by mostní objekt obstál požárnímu zatížení – nezkolaboval by, jak je zřejmé na grafu níže, neboť ani jeden teplotní profil není výše, jak průsečík polopřímek symbolizující kritickou teplotu ve výztuži a osovou vzdálenost výztuže.



obr. 35: Posouzení kritické teploty v ose nosné výztuže

Mostní objekt by v takovém případě odolal požáru, za předpokladu požárního scénáře, který byl použit v řešeném příkladu diplomové práce. Otázkou je, zdali by tento most vyhověl jinému požárnímu scénáři – například právě některé dopravní autonehodě (tab. 2), které znamenaly kolaps pro tyto dopravní stavby.

4 Závěr

Diplomová práce se zabývala sdílením tepla a jeho analýzou na mostních konstrukcích. Na začátku práce – teoretické části – byla shrnuta základní, a tedy nejnütnější terminologie mostních objektů, jako je celkový popis jednotlivých částí, ze kterých se most skládá a rozdělní mostních konstrukcí podle hlavní nosné funkce. Byl vytvořen souhrn dopravních nehod, které svým vývojem, co se týče mimořádné situace – požárním zatížením ovlivnily mostní konstrukce a jejich stabilitu. Tyto dopravní incidenty jsou nejčtenější na území Spojených států amerických. Ve většině případů se dále jedná o ocelové mosty, jejichž profilované vazníky jsou mnohem náchylnější na poškození vyššími teplotami, než je tomu u betonových mostů, kde hlavní nosnou betonářskou výztuž chrání dostatečná tloušťka krycí vrstvy. Proto je v těchto případech, kdy se stane požární incident pod mostem z ocelové konstrukce, požár scénář katastrofální. V teoretické části diplomová práce popsala rozdělení samotného modelování požáru, kdy lze v dnešní době využít mnoho různých přístupů k modelování konkrétní situace. Jedním ze základních parametrů požáru je rychlost uvolněného tepla. Diplomová práce věnovala pozornost kapitole v teoretické části samotnému zaměření se na sdílení tepla jako takové. Stručný, ale výstižný popis fyzikálního děje byl doplněn o základní rovnice s popisem neznámých veličin vstupujících do výpočtu.

V praktické části diplomové práce bylo cílem vytvořit matematický model mostního objektu pod nímž se rozvinulo mimořádné zatížení – požární situace. Pro tento model byl vybrán konkrétní reálný mostní objekt – železniční podjezd. Model byl pro potřeby zidealizován a zjednodušen. Na základě poskytnuté databáze požárů, byl použit požár nákladního automobilu převážejícího dřevěný nábytek. Tato požární situace byla popsána křivkou rychlosti uvolněného tepla. Tato křivka byla tedy použita jako vstupní parametr ve výpočetním softwaru. Na základě spuštěných výpočtů – celkově tři různých výpočtů, kdy se měnila výšková poloha burneru (plochy, na které v softwaru dochází k reakci) – byly tyto požární situace vyhodnoceny z poskytnutých dat simulací. Součástí každé simulace, bylo sledování vývoje teplot pod mostní konstrukcí – teplota plynu a vývoj teplot přímo na povrchu konstrukce. Na základě těchto dvou vývoju byla vyhodnocena simulace, která měla na konstrukci nejvíce nepříznivý účinek. S touto simulací bylo provedeno porovnání dat teplot plynu pod mostní konstrukcí s vývojem teplot na konstrukci za použití Dirichletovy okrajové podmínky, kdy je dána teplota na hranici. Závěrečným posouzením se stala kritická teplota ve výztuži v závislosti na teplotních profilech konstrukce, kde bylo ověřeno, že mostní objekt za vypsáných předpokladů, vyhoví namáháním požární situace.

Doporučením pro pokračování v modelování požáru pod mostní konstrukcí je samotné zdokonalování matematického modelu, především zdokonalení modelu mostní konstrukce – použitý materiál, konstrukce, počáteční podmínky a vstupní parametry –

konkrétně vytvořit reálný model hoření, případně zakomponovat do matematického modelu parametrickou studii, například vliv větru. Výběr jiného vhodného použitého materiálu oproti železobetonu, jako je například předpjatý beton či ocel, která je více náchylná na poškození požárem. Pro zdokonalení modelu je vhodné prověření a typizace konstrukcí, které jsou požárem nejvíce náchylné k poškození (např. trámové, visuté a zavěšené mostní konstrukce). V rámci simulace požáru je vhodné řešit samotnou pyrolýzu hořlavého materiálu, která by se více podobala realističtějšímu průběhu požáru.

Doporučením pro další vědeckou činnost, ale i praxi je takové, aby se více přihlíželo na riziko spojené s mostními konstrukcemi. Tato práce měla motivaci, že ke kolapsům mostních konstrukcí způsobených mimořádným zatížením, jako je právě požár, dochází dvakrát více, než v případě jiného mimořádného zatížení – zemětřesení [7]. A proto by toto téma nemělo být nikomu lhostejné při návrhu, neboť je skutečností, že se čas od času katastrofické scénáře uskutečňují a musíme s nimi počítat. Vhodným zamyšlením nad problémem je prověření pravděpodobnosti kolapsu mostní konstrukce a požárního scénáře.

Seznam obrázků

obr. 1: Požár kamionu a poškození mostní konstrukce na území ČR [6].....	14
obr. 2: Mosty podle statické funkce hlavní nosné konstrukce [9] – a) deskový most, b) klenbový most, c) trámový most, d) obloukový most, e) visutý most, f) zavěšený most	16
obr. 3: Trojúhelník hoření [11]	17
obr. 4: Příklady poškození mostních konstrukcí zasažených požárem [7, 13, 15, 16]... ..	18
obr. 5: Schématické rozdělení modelů požáru [5] s vyznačeným postupem DP.....	20
obr. 6: Šíření kouře a plamene v CFD programu (kód převzat [21]).....	23
obr. 7: Schéma kónického kalorimetru [23] – váhy pro měření úbytku hmotnosti (1), upevňovací rám pro vzorek (2), piezoelektrický zdroj jiskry (3), kónická topná spirála (4), odvodní potrubí s analyzátory veličin (5), měřicí ústředna (6).....	25
obr. 8: Spalné teplo vztažené ke spotřebě kyslíku druhu paliv [24]	25
obr. 9: Obecný rozvoj rychlosti uvolňování tepla.....	26
obr. 10: Předloha modelu [32] – a) přední pohled, b) zadní pohled, c) spodní část mostovky.....	32
obr. 11: Příklad textového souboru – zdrojový kód.....	33
obr. 12: Graf průběhu HRR demonstrováné zkoušky [33].....	35
obr. 13: Tepelná vodivost betonu [1, 4].....	36
obr. 14: Měrná tepelná kapacita betonu [1, 4]	36
obr. 15: Objemová hmotnost betonu [1, 4]	37
obr. 16: Zdrojový kód nastavení otevřenosti ohraničujících ploch [2].....	38
obr. 17: Zadání výpočetního prostoru [2]	38
obr. 18: Rozměry matematického modelu	39
obr. 19: Pohled na vymodelovaný prostor s konstrukcí a nákladním automobilem [2].	40
obr. 20: Boční pohled na model (skrytá boční stěna) [2].....	40
obr. 21: Rozdílné výšky přívěsu [2] – a) výpočet 1 – DP.1, b) výpočet 2 – DP.2, c) výpočet 3 – DP.3	41
obr. 22: Porovnání jednotlivých výpočtů HRR s originální křivkou.....	42
obr. 23: Rozmístění měřících zařízení [2]	43
obr. 24: Vizualizace požáru v důležitých čase simulace	44
obr. 25: Vývoj teplot na povrchu konstrukce jednotlivých výpočtů.....	45
obr. 26: Vizualizace vývoje teplot na povrchu konstrukce v důležitých čase simulace.	46
obr. 27: Výpočet teplotního profilu s teplotami na povrchu konstrukce [1].....	47

obr. 28: Teplotní profily závislosti teploty na čase v jednotlivých vzdálenostech od exponované strany	47
obr. 29: Teplotní profily závislosti teploty na vzdálenostech od exponované strany v jednotlivých časech.....	48
obr. 30: Vývoj teplot plynu jednotlivých výpočtů.....	49
obr. 31: Výpočet teplotního profilu s teplotami plynu [1].....	49
obr. 32: Teplotní profily závislosti teploty na čase v jednotlivých vzdálenostech od exponované strany	50
obr. 33: Teplotní profily závislosti teploty na vzdálenostech od exponované strany v jednotlivých časech.....	50
obr. 34: Porovnání vývoje teplot s použitím Dirichletovy okrajové podmínky	52
obr. 35: Posouzení kritické teploty v ose nosné výztuže	53

Seznam tabulek

tab. 1: Statistika požárů souvisejících s mostními konstrukcemi na území ČR [6].....	13
tab. 2: Příklady požárů spojených s mostními objekty [7, 13, 15, 16]	19
tab. 3: Hodnoty HRR v průběhu zkoušky [33]	35
tab. 4: Výškové polohy jednotlivých burnerů.....	41
tab. 5: Kritické teploty betonářské výztuže [31].....	52

Literatura

- [1] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. *TempAnalysis – Výpočetní program pro teplotní analýzu průřezů vystavených účinkům požáru. Uživatelská příručka* [online]. B.m.: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí, 2009. Dostupné z: <http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/vyzkum.htm>
- [2] *PyroSim* [online]. B.m.: Thunderhead Engineering Consultants, Inc., nedatováno. Dostupné z: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>
- [3] *Zotero* [online]. George Mason University: Roy Rosenzweig Center for History and New Media, nedatováno. Dostupné z: <https://www.zotero.org/>
- [4] ČSN EN 1991-1-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [5] KUČERA, Petr a Zdeňka PEZDOVÁ. *Základy matematického modelování požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- [6] *POŽÁRY.cz* [online]. B.m.: POŽÁRY.cz, z. s. nedatováno. Dostupné z: <https://www.pozary.cz/>
- [7] GARLOCK, Maria, Ignacio PAYA-ZAFORTEZA, Venkatesh KODUR a Li GU. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies. *Engineering Structures* [online]. 2012, **35**, 89–98. ISSN 01410296. Dostupné z: [doi:10.1016/j.engstruct.2011.11.002](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.002)
- [8] ČSN 73 6000 *Mosty - Terminologie a třídění*. 2011.
- [9] ŠAFÁŘ, Roman. Betonové mosty. In: . ČVUT v Praze, Fakulta stavební.
- [10] CESKO a HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR. *Konspekty odborné přípravy jednotek PO*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 978-80-86111-89-6.
- [11] UHROVÁ, Ilona. *Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou* [online]. 2013. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>
- [12] WRIGHT, William, Brian LATTIMER, Michael WOODWORTH, Mohammad NAHID a Elisa SOTELINO. *Highway Bridge Fire Hazard Assessment Draft Final Report* [online]. 2013. Dostupné z: https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP12-85_FR-Appendices.pdf
- [13] PERIS-SAYOL, Guillem, Ignacio PAYA-ZAFORTEZA, Sebastia BALASCH-PARISI a José ALÓS-MOYA. Detailed Analysis of the Causes of Bridge Fires and Their Associated Damage Levels [online]. 2017, **31**(3), 04016108. ISSN 0887-3828, 1943-5509. Dostupné z: [doi:10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000977](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000977)

- [14] BIONDINI, Fabio a Dan FRANGOPOL, ed. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July 2012* [online]. B.m.: CRC Press, 2012 [vid. 2021-12-28]. Bridge Maintenance, Safety and Management. ISBN 978-0-415-62124-3. Dostupné z: doi:10.1201/b12352
- [15] KODUR, Venkatesh a M. Z. NASER. Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* [online]. 2021, **15**(1), 46–60. ISSN 2095-2430, 2095-2449. Dostupné z: doi:10.1007/s11709-020-0676-6
- [16] QUIEL, Spencer E., Takayuki YOKOYAMA, Lynne S. BREGMAN, Kevin A. MUELLER a Shalva M. MARJANISHVILI. A streamlined framework for calculating the response of steel-supported bridges to open-air tanker truck fires. *Fire Safety Journal* [online]. 2015, **73**, 63–75. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2015.03.004
- [17] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [18] HURLEY, Morgan J., Daniel GOTTUK, John R. HALL, Kazunori HARADA, Erica KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, José TORERO, John M. WATTS a Christopher WIECZOREK, ed. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [online]. New York, NY: Springer New York, 2016 [vid. 2021-12-08]. ISBN 978-1-4939-2564-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- [19] SVOBODOVÁ, Vladislava, Martin BENÝŠEK a Radek ŠTEFAN. *Parametrické teplotní křivky* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/ptk/ptk.cz.html>
- [20] SVOBODOVÁ, Vladislava. *Aplikace různých modelů požáru pro posouzení požární odolnosti konstrukcí*. Praha, 2021. České vysoké učení technické v Praze.
- [21] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [22] CÁBOVÁ, Kamila, Matyáš KOŽICH a Tomáš APELTAUER. *Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů* [online]. nedatováno. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~wald/fire/overene_modely/CertifModels_2_metodika.pdf
- [23] KUČERA, Petr. *Požární inženýrství: dynamika požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [24] DRYSDALE, Dougal. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.

- [25] *ISO 5660-1 Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*. Geneva: International Organization for Standardization, 2002.
- [26] SOKOL, Zdeněk. Hustota požárního zatížení, rychlost uvolňování tepla. In: . České vysoké učení technické v Praze.
- [27] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 978-80-01-01715-9.
- [28] ŠTEFAN, Radek. *Transportní procesy v betonu při vysokých teplotách*. Praha, 2015. České vysoké učení technické v Praze.
- [29] KOVÁŘÍK, Petr. Termomechanika. In: [online]. Plzeň. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/TM/cviceni/sdileni.pdf>
- [30] *ČSN EN 13501-2 Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [31] *ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [32] *Databáze mostů a tunelů v České republice* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.mosty-tunely.cz/databaze/mosty/>
- [33] SPEARPOINT, Michael a Charles FLEISCHMANN. *Design fires for vehicles in road tunnels*. Auckland, New Zealand: 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 2008.
- [34] INGASON, Haukur a Anders LÖNNERMARK. Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels. *Fire Safety Journal* [online]. 2005, **40**(7), 646–668. ISSN 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2005.06.002
- [35] *ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [36] OVERHOLT, Kristopher. *Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sbenkorichi.com/calculators/fds-mesh/>
- [37] MCGRATTAN, Kevin B a Glenn P FORNEY. *Fire dynamics simulator (version 4) :: user's guide* [online]. 0 vyd. NIST SP 1019. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 2004 [vid. 2021-12-20]. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.SP.1019
- [38] HRDOUŠEK, Vladislav. Krycí vrstva nosné výztuže pro starší konstrukce realizované v minulém století. 25. listopad 2021