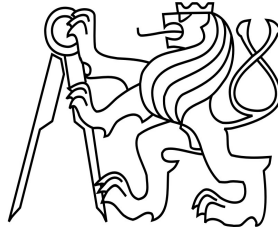


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

# **ANALÝZA SÁLAVÉHO TOKU PŘI POŽÁRU HOŘLAVÝCH KAPALIN**

ANALYSIS OF RADIATIVE FLUX FROM POOL FIRE

Bc. Tomáš Bůžek

vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Ing. Martin Benýšek

2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bůžek Jméno: Tomáš Osobní číslo: 438080  
Zadávající katedra: K133  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza sálavého toku při požáru hořlavých kapalin  
Název diplomové práce anglicky: Analysis of Radiative Flux from Pool Fire

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.

Analýza řešení sálavého toku.

Konceptní popis řešení sálavého toku v zahraničí.

Vytvoření databáze požárně technických charakteristik hořlavých kapalin.

Numerické řešení sálavého toku se zaměřením na požár hořlavých kapalin.

Zhodnocení vlivu clonících stěn na průběh sálavého toku.

Vyhodnocení.

Závěr.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru

ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty

DRYSDALE, Dougal. An introduction to fire dynamics. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011.

KUČERA, Petr. Požární inženýrství: dynamika požáru. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-074-6.

S. K. HOSTIKKA and A. HAMINS. Numerical Modelling of Pool Fires Using Les and Finite Volume Method for Radiation, 2003.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 16. 9. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

*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)

---

# Obsah

Poděkování .....	IV
Čestné prohlášení .....	V
Abstrakt .....	VI
Abstract .....	VI
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	VII
<b>1 Úvod .....</b>	<b>9</b>
1.1 Motivace.....	9
1.2 Struktura.....	9
1.3 Cíle práce .....	10
<b>2 Současný stav poznání .....</b>	<b>11</b>
2.1 Úvod .....	11
2.2 Plošný požár .....	11
2.3 Odstupová vzdálenost v České republice.....	11
2.3.1 Určení odstupových vzdáleností .....	12
2.4 Odstupová vzdálenost ve Švédsku .....	13
2.5 Odstupová vzdálenost Anglie a Wales .....	13
2.6 Požárně technické charakteristiky .....	14
2.6.1 Teplota vzplanutí.....	14
2.6.2 Teplota vznícení .....	15
2.6.3 Mez výbušnosti.....	17
2.7 Parametry ovlivňující způsob hoření hořlavých kapalin.....	18
2.7.1 Dynamika plošného požáru hořlavé kapaliny .....	18
2.7.2 Rychlost odpařování.....	19
2.7.3 Výška plamene .....	19
2.7.4 Rychlost spalování.....	20
2.7.5 Rychlost uvolňování tepla (HRR) .....	21
2.7.6 Hustota tepleného toku .....	22
2.7.7 Chování kapalně fáze .....	23
2.7.8 Chování plamene při hoření hořlavých kapalin.....	25
<b>3 Analýza sálového toku při hoření hořlavých kapalin .....</b>	<b>26</b>
3.1 Úvod .....	26
3.2 Analytické řešení výšky plamene .....	26
3.2.1 Požární scénáře .....	26
3.2.2 Model Heskestad.....	29
3.2.3 Model Thomas.....	30
3.2.4 Výsledky analytického řešení .....	32
3.3 Numerické řešení výšky plamene.....	38
3.3.1 Požární scénáře .....	38
3.3.2 Software .....	40
3.3.3 Výpočetní síť.....	40
3.3.4 Citlivostní analýza velikosti výpočetní sítě .....	41
3.3.5 Teplotní křivky .....	42

---

3.3.6	Rychlost uvolňování tepla při hoření hořlavých kapalin .....	42
3.3.7	Výška plamene plošného požáru – numerické řešení.....	44
3.4	Výsledné výšky plamene pomocí numerického řešení a porovnání s analytickým řešením .....	45
<b>4</b>	<b>Porovnání výsledků analýzy sálavého toku .....</b>	<b>46</b>
4.1	Požárně nebezpečný prostor od ohraničených hořlavých kapalin .....	46
4.2	Popis řešeného případu .....	46
4.2.1	Řešení požárně nebezpečného prostoru pomocí různých teplotních křivek požáru.....	47
4.2.2	Grafické porovnání řešených odstupů dle teplotních křivek .....	48
4.3	Výpočetní matematický model .....	51
4.3.1	Požární scénáře .....	52
4.3.2	Výpočetní síť.....	53
4.4	Řešení požárně nebezpečného prostoru v řezové rovině – matematický model.....	56
4.4.1	Vliv velikosti plamene na velikost požárně nebezpečného prostoru.....	63
4.5	Řešení požárně nebezpečného prostoru při využití clonící stěny.....	65
4.6	Popis řešeného případu .....	66
<b>5</b>	<b>Závěr a doporučení .....</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam vztahů .....</b>	<b>79</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>80</b>
	<b>Příloha 1 – Databáze požárně technických charakteristik .....</b>	<b>83</b>
	<b>Příloha 2 – Vzor zdrojového kódu numerického modelu.....</b>	<b>87</b>
	<b>Příloha 3 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle normové teplotní křivky .....</b>	<b>92</b>
	<b>Příloha 4 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle uhlovodíkové teplotní křivky .....</b>	<b>94</b>
	<b>Příloha 5 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle křivky vnějšího požáru.....</b>	<b>96</b>

---

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Radku Štefanovi Ph.D., za vedení diplomové práce. Zároveň bych rád poděkoval panu, Ing. Martinovi Benýškovi, za cenné rady a odborný dohled.

---

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza sálavého toku při požáru hořlavých kapalin“ vypracoval samostatně po konzultacích s vedoucím práce a s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci 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 4. ledna 2020

.....

Bc. Tomáš Bůžek

---

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou sálavého toku při požáru hořlavých kapalin. Cílem práce je analýza řešení sálavého toku. V teoretické části je popsáno všeobecné řešení sálavého toku v zahraničí a popis řešení sálavého toku v ČR. Dále jsou popsány požárně technické charakteristiky hořlavých kapalin a je popsáno chování plamene při hoření hořlavých kapalin. Praktická část diplomové práce se zabývá vytvořením databáze požárně technických charakteristik hořlavých kapalin z dostupných zdrojů. Sálavý tok je analyzován pomocí matematických modelů hoření hořlavé kapaliny, a dále se zaměřuje na vliv clonících stěn při řešení odstupových vzdáleností. Porovnává se analýza odstupů podle normového řešení, dále se porovnává analytické řešení metodou Thomas a Heskestad s normovým a numerickým řešením. Pro numerické řešení je použit program FDS. Závěr práce vyhodnocuje získané poznatky a řeší jejich aplikaci při řešení požární bezpečnosti staveb.

### Klíčová slova

tepelný sálavý tok; výška plamene; hoření hořlavé kapaliny; odstupová vzdálenost; konstrukce bránící sdílení tepla; plošný požár

## Abstract

The diploma thesis deals with the analysis of the radiative heat flux from pool fire. The aim of this work is to analyze the solution of radiative flux. The theoretical part is described general solution of radiative flux abroad and description of solution of radiative flux in the Czech Republic. Furthermore, the fire-technical characteristics of flammable liquids are described and the flame behavior of flammable liquids is described. The practical part of the thesis deals with the creation of a database of fire-technical characteristics of flammable liquids from available sources. The radiation flow is analyzed using mathematical models of flammable liquid combustion, and further it focuses on the effect of screening walls in the solution of separation distances. Analysis of separation distances according to standard solution is compared, analytical solution by Thomas and Heskestad method is compared with standard and numerical solution. FDS is used for numerical solution. The conclusion evaluates the acquired knowledge and solves their application in the solution of fire safety of buildings.

### Keywords

radiative heat flux; flame height; burning of a flammable liquid; separating distance; construction preventing heat transfer, pool fire

---

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

A	Plocha	m <sup>2</sup>
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
V	Objem	m <sup>3</sup>
$\rho_n$	Nahodilé požární zatížení	kg/m <sup>2</sup>
$\rho_s$	Stálé požární zatížení	kg/m <sup>2</sup>
$\rho_v$	Výpočtové požární zatížení	kg/m <sup>2</sup>
p	Požární zatížení	kg/m <sup>2</sup>
b	Součinitel větrání	-
T	Teplota	K; °C
I	Intenzita sálání tepla	kW/m <sup>2</sup>
$I_o$	Kritická hodnota intenzity sálání	kW/m <sup>2</sup>
HRR	Heat Release Rate (rychlost uvolněného tepla)	W
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area (rychlost uvolněného tepla na jednotku plochy)	W/m <sup>2</sup>
$S_{po}$	Celková POP v obvodové stěně	m <sup>2</sup>
$S_{po1}$	Zcela POP obvodové stěny	m <sup>2</sup>
$S_{po2}$	Částečně POP obvodové stěny	m <sup>2</sup>
$S_p$	Uvažovaná plocha obvodové stěny	m <sup>2</sup>
$k_2$	Součinitel redukující hustotu tepelného toku z částečně POP	-
Q	Celkové množství uvolněného tepla	J/s·W
$H_i$	Výhřevnost hořlavé nebo nesnadno hořlavé látky	J/kg
$M_i$	Hmotnost látky	kg
n	Počet hořlavých nebo nesnadno hořlavých látek	-
$H_d$	Výhřevnost dřeva	J/kg
$T_0$	Počáteční teplota	K; °C
t	Čas od počátku požáru	min
$A_f$	Celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek	m <sup>2</sup>



---

$q_{f,d}$	Návrhová hustota požárního zatížení	MJ/m <sup>2</sup>
$A_v$	Celková plocha svislých otvorů ve všech stěnách	m <sup>2</sup>
$h_{eq}$	vážený průměr výšky oken ve všech stěnách	m
$D$	<i>Hloubka požárního úseku</i>	<i>m</i>
$W$	<i>Šířka stěny s oknem</i>	<i>m</i>
$L_H$	Hloubka plamene	m
$L_L$	Výška plamene	m

### Řecké symboly

$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
$\rho$	Objemová hmotnost	kg/m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	Emisivita tělesa	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup>
$\theta$	Absolutní teplota tělesa	K; °C
$\Phi$	Polohový faktor	-
$\rho_g$	Objemová hmotnost plynů	kg/m <sup>3</sup>
$\tau_F$	Doba volného hoření ohně	s

### Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
DP1, DP2, DP3	Druhy konstrukčních částí
POP	Požárně otevřená plocha

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Hořlavé kapaliny vykazují vysoké požární nebezpečí při skladování a přepravě. Odlišují se zejména rychlostí spalování, výškou plamene při hoření a s tím spojeným vysokým sálavým teplem. Hořlavé kapaliny jsou specifické zejména v možnosti mísitelnosti, dělitelnosti a těkavosti. Tyto kapaliny jsou používány zejména v průmyslových provozech a jejich požáry tak patří k nejčastějším technologickým nehodám v průmyslu.

Při požáru hořlavé kapaliny se využívá rozdělení do dvou případů. Hoření kapalin v neohraničeném prostoru se nazývá **tryskající požár**. Typickým tryskajícím požárem může být únik hořlavé kapaliny z potrubního vedení a jeho následné hoření. Pokud je hořlavá kapalina ohraničená v určitém prostoru nazývá se **plošný požár**. Oba tyto případy mají odlišný průběh hoření a představují vysoké nebezpečí z hlediska velmi rychlého nárůstu teplot a rychlosti hoření.

Omezení rizika vzniku požáru je možné předejít zejména znalostí požárně technických charakteristik hořlavých kapalin. Tyto charakteristiky se vztahují k chemickým a fyzikálním vlastnostem dané hořlavé kapaliny. Pro účinné bezpečnostní opatření je důležité znát tyto charakteristiky a předcházet tak vzniku požáru.

Sálavý tok, který vyzařuje při hoření hořlavých kapalin je velice nebezpečný z hlediska šíření požáru na okolní objekty, a hlavně při zásahu složek IZS. V této práci se pojednává o hoření hořlavých kapalin, kdy je kapalina bezprostředně po iniciaci ve fázi ustáleného hoření. Je řešeno hoření hořlavých kapalin na ohraničené ploše, například havarijní jímky pro hořlavé kapaliny. Problematika je popsána na obecné teoretické rovině a dále je hoření modelováno pomocí matematických CFD modelů. Je sledován zejména sálavý tok, který vyzařuje při hoření hořlavých kapalin.

## 1.2 Struktura

V úvodní kapitole je sepsána motivace pro tuto práci a základní popis řešené problematiky. V teoretické části se pojednává o současném stavu poznání, je vytvořena databáze požárně technických charakteristik pro hořlavé kapaliny z dostupných zdrojů. Dále jsou uvedeny možnosti hašení požárů hořlavých kapalin a jsou popsány přenosy tepla u plošných požárů. Další část diplomové práce se zabývá numerickým modelováním požáru hořlavých kapalin se zaměřením na sálavý tepelný tok, a s ním spjatou odstupovou vzdálenost. Simulace jsou prováděny v matematickém CFD modelu pomocí software FDS. V závěru práce jsou shrnuty poznatky a zhodnoceny výsledky této práce.

### 1.3 Cíle práce

Hlavní cíle práce jsou:

- zpracování současného stavu poznání řešení odstupových vzdáleností dle norem ČR a porovnání s řešením v zahraničí
- tvorba databáze požárně technických charakteristik hořlavých kapalin
- popis průběhu hoření tzv. plošných požárů a procesů sdílení tepla
- simulace požárních scénářů hoření hořlavé kapalina za pomoci numerického CFD modelu a analytických modelů Thomas a Heskestad
- zpracování dat simulací a shrnutí získaných poznatků

## 2 Současný stav poznání

### 2.1 Úvod

V této části diplomové práce je přiblížena řešená problematika. Jsou vysvětleny charakteristiky plošných požárů a s tím spjaté fyzikální děje.

### 2.2 Plošný požár

Plošné požáry patří mezi nejčastější nehody při úniku kapalné hořlavé látky. Jejich parametry jsou dlouhodobě zkoumány a zajímá nás zejména rychlost spalování, výška vyšlehávajícího plamene a radiace. Z hlediska skladování hořlavých kapalin a jeho transportu je velice důležité znát tyto parametry. Plošné požáry velkých rozměrů mohou vytvořit nebezpečnou odstupovou vzdálenost o velikosti desítek metrů a představují tak veliké riziko šíření požáru na okolní objekty [1].

Při běžných experimentech plošných požárů je využíváno numerických simulací, které zahrnují multifyzikální řešení s chemickými reakcemi, hydrodynamiku a radiaci. Mezi největší problémy patří zpětná radiace od plamenů blízko povrchu hořlavé kapaliny, a je to nejdůležitější sdílení tepla při plošných požárech.

### 2.3 Odstupová vzdálenost v České republice

Jedná se o vzdálenosti představující oblast, ve které hrozí přenos požáru na sousední objekt, konstrukci či požární úsek. Vymezuje oblast na jejíž hranici je intenzita tepelného toku tak malá, že nemůže dojít k šíření požáru [2].

Odstupová vzdálenost představuje kolmou vzdálenost od požárně otevřené plochy k hranici požárně nebezpečného prostoru. Hraniční hodnota intenzity tepelného toku je dle českých stavebních předpisů stanovena na hodnotu  $18,5 \text{ kW/m}^2$  [3].

Hodnota byla stanovena na základě experimentů vlivu sálavého tepla na dřevěné konstrukce. Výsledkem experimentu bylo zjištění, že při dlouhodobějšímu působení sálavého tepla dochází k rozkladu dřeva a uvolňování plynů. V době působení tepelného toku  $18,5 \text{ kW/m}^2$  přibližně 20 minut nenastane samovznícení plynů [2].

### 2.3.1 Určení odstupových vzdáleností

Odstupová vzdálenost záleží zejména na rozměrech požárně otevřené plochy a požárním riziku. Při určení odstupových vzdáleností rozlišujeme, zda se jedná o zcela požárně otevřené plochy a částečně požárně otevřené plochy.

Jako zcela požárně otevřené plochy se rozumí (okna, prosklené stěny, volné otvory zcela bez výplně, otvory s žaluziemi apod.). A dále plochy obvodových stěn nebo její části, kde hustota tepelného toku od požáru v rovině vnějšího líce  $I > 60 \text{ kW/m}^2$  v požadované době PO [4].

Částečně otevřená požární plocha je definována jako plocha v obvodové stěně nebo její části, kde hodnota hustoty tepelného toku od požáru v rovině vnějšího líce  $15 < I \leq 60 \text{ kW/m}^2$  v požadované době PO [4].

#### 2.3.1.1 Určení odstupové vzdálenosti v České republice

Problematika odstupových vzdáleností se v České republice řeší v souladu s českými technickými normami řady ČSN 7308xx, hlavně tedy podle dvou kmenových norem ČSN 73 0802, ČSN 73 0804. V těchto normách je požárně nebezpečný prostor uvažován po hranici hustoty tepelného toku  $18,5 \text{ kW/m}^2$ .

Obvodové stěny druhu DP1 nebo DP2, které vykazují požadovanou požární odolnost a množství uvolněného tepla z vnějšího povrchu je  $Q \leq 150 \text{ MJ/m}^2$ , se hodnotí jako požárně uzavřené plochy a odstupové vzdálenosti se od nich neurčují. Pokud je množství uvolněného tepla v rozmezí  $150 < Q \leq 350 \text{ MJ/m}^2$ , hodnotí se stěna jako částečně požárně otevřená plocha a v případě uvolněného tepla  $Q > 350 \text{ MJ/m}^2$  jde o zcela požárně otevřenou plochu. Logicky se tedy stanovuje požárně nebezpečný prostor u ČPOP a od zcela POP obvodových stěn. Zejména otvory v obvodových stěnách se klasifikují jako POP [5].

Požárně nebezpečný prostor skladu hořlavých kapalin se určuje buď podle konkrétních podmínek podrobnou analýzou možných a pravděpodobných variant požáru nádrže a její havarijní jímky, nebo podle následujících zásad, kde požárně otevřená plocha a hustota tepelného toku jsou určeny:

- délkou (největším půdorysným rozměrem) havarijní jímky posuzované nádrže, na které může současně probíhat požár
- výškou plamene rovnou polovině průměru nádrže (nebo opsané kružnice nádrže, pokud má tato jiný než kruhový půdorys); nejmenší započítaná výška je 9 m; nemusí se však počítat s výškou plamenů větší než 30 m
- hustotou tepelného toku
  - u nádrží a havarijních jímek vybavených samočinným stabilním hasícím zařízením  $135 \text{ kW/m}^2$  (tok odpovídá době  $\tau_e = 120$  minut a součiniteli emisivity 0,8); nebo

- v ostatních případech nádrží a havarijních jímek  $180 \text{ kW/m}^2$  (tok odpovídá době  $\tau_e = 180$  minut a součiniteli emisivity 0,9).[6]

## 2.4 Odstupová vzdálenost ve Švédsku

Následující text je převzat z diplomové práce [9], citovaný text je psán kurzívou.

*Švédský návod pro projektování uvažuje, že odstupové vzdálenosti nezáleží na požárním zatížení ani na jiných požárních údajích o objektu. Mezi hlavní požadavek pro vzájemnou vzdálenost mezi objekty je ten, že by měl být objekt umístěn minimálně 4,0 m od hranice pozemku. Avšak v případě, že je objekt umístěn méně než 4,0 m, musí být sousední objekt umístěn tak, aby mezi objekty vznikla vzdálenost 8,0 m a objekt musí být navržen tak, aby bylo zamezeno nebezpečí šíření požáru na přilehlé objekty.*

*Odstupové vzdálenosti se ve Švédsku řeší podle švédského návodu pro projektování. Objekty musí splňovat umístění ve vzdálenosti 4,0 m od hranice pozemku, případně minimálně 8,0 m mezi objekty na sousedních pozemcích. Pokud nejsou tyto hodnoty dodrženy, musí být prokázáno, že nedojde k šíření požáru mezi objekty. Kritický sálavý tok a tudíž hranice tzv. požárně nebezpečného prostoru je  $15 \text{ kW/m}^2$  po dobu 30 minut.*

## 2.5 Odstupová vzdálenost Anglie a Wales

Následující text je převzat z diplomové práce [9], citovaný text je psán kurzívou.

*V Anglii a Walesu se pro stanovení odstupových vzdáleností používá stavební nařízení pro požární bezpečnost, tzv. Schválený dokument B [10], který používá kritickou hodnotu intenzity záření, při které může dojít ke vznícení jako  $12,6 \text{ kW/m}^2$ . Oproti České republice nezávisí odstupové vzdálenosti na velikosti požárního zatížení. Předpokládá se vyzařované záření buď  $84 \text{ kW/m}^2$  nebo  $168 \text{ kW/m}^2$ , v závislosti na účelové skupině budovy a použité metodě výpočtu.*

*V porovnání s Českou republikou se v Anglii a Walesu uvažuje menší kritická hodnota intenzity záření (kritická hodnota tepelného toku v ČR je  $18,5 \text{ kW/m}^2$ ). V případě, kdy si postavíme dům například na pozemku, kde v okolí nejsou dosud žádné objekty a dodržíme odstupové vzdálenosti od skutečných hranic pozemku, tak nás nemusí zajímat případná okolní zástavba – neovlivňujeme umístění okolních objektů. V případě, kdy nedodržíme odstupové vzdálenosti od skutečných hranic a ty zasahují na sousední pozemek, tak při umísťování sousedního objektu musí být odstupová vzdálenost tohoto objektu posouzena k fiktivní hranici, která je dána koncem odstupové vzdálenosti dříve postaveného objektu.*

## 2.6 Požárně technické charakteristiky

Pro různé chemické složení můžeme definovat rozdílnou iniciaci procesu hoření. Za pomoci fyzikálně chemických vlastností je popisují požárně technické charakteristiky (PTCH). Základními PTCH je teplota vzplanutí, teplota vznícení a oblast výbušnosti. PTCH jsou proměnlivé v čase a jsou stanovovány podle příslušných norem, experimentálně v akreditovaných zkušebnách.

Zejména složky IZS využívají PTCH k vyhodnocování taktického postupu při hašení nebo k určení bezpečnostních vzdáleností a bezpečné manipulace s hořlavou kapalinou.

### 2.6.1 Teplota vzplanutí

Jedná se o nejnižší teplotu, při které je uvolněno množství, které se po smísení se vzduchem a přiblížením zápalného zdroje vzplane a opět zhasne.

Pro vzplanutí je zásadní rychlost odpařování hořlavé kapaliny.

Teplota vzplanutí se stanovuje zkušebními metodami tzv. otevřeného nebo uzavřeného kelímku [13, 14]. Při zkušební metodě tzv. uzavřeného kelímku dojde ke vzplanutí dříve (při nižší teplotě). Při obou zkušebních metodách se teplota vzplanutí vztahuje k atmosférickému tlaku 101,325 kPa.

Hořlavé kapaliny se třídí v ČR dle normy podle bodu vzplanutí.

#### 2.6.1.1 Rozdělení hořlavých kapalin dle bodu vzplanutí

Za hořlavou kapalinu se považuje kapalina, suspenze nebo emulze, splňující při atmosférickém tlaku 101 kPa současně tyto podmínky :

- není při teplotě + 35 °C tuhá ani pastovitá
- má při teplotě + 50 °C tlak nasycených par nejvýše 294 kPa
- má teplotu vzplanutí nejvýše + 250 °C
- lze u ní stanovit teplotu hoření

Hořlavé kapaliny se dále dělí podle teploty vznícení do následujících teplotních tříd:

- T1 – teplota vznícení nad 450 °C
- T2 – teplota vznícení 300 až 450 °C
- T3 – teplota vznícení 200 až 300 °C
- T4 – teplota vznícení 135 až 200 °C
- T5 – teplota vznícení 100 až 135 °C

- T6 – teplota vznícení 85 až 100 °C

Podle teploty vzplanutí dále třídíme hořlavé kapaliny podle třídy nebezpečnosti (Tab. 2) [6].

Tab. 1 Třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin [6]

<i>Třída nebezpečnosti</i>	<i>Teplota vzplanutí [°C]</i>
<i>I</i>	<i>&lt;21</i>
<i>II</i>	<i>21-55</i>
<i>III</i>	<i>55-100</i>
<i>IV</i>	<i>&gt;100</i>

Rozdělení do tříd nebezpečnosti je závislé na hodnotě teploty vzplanutí, přičemž do té nejpřísnější, tedy I. třídy nebezpečnosti, se zařazují hořlavé kapaliny s teplotou vzplanutí do 21 °C. Do stejnojmenné třídy se dále zařazují hořlavé kapaliny třídy II. a III., které jsou vlivem okolních podmínek zahřívány na svou teplotu vzplanutí nebo i teplotu vyšší a v neposlední řadě také kapaliny, u kterých nebyla příslušnou zkouškou stanovena teplota vzplanutí [1].

Teplotní třídy a třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin je nutné odlišovat a vždy vyhodnocovat obě charakteristiky. Zejména při čerpání hořlavých kapalin může dojít k nepříjemnostem. Jsou hořlavé kapaliny, které náleží do stejné třídy nebezpečnosti (např. I. třídy), ale jsou v různých teplotních třídách. To znamená, že jedna látka se vznítí při zahřátí na teplotu 250 °C (T5), ale druhá již při zahřátí na 80 °C (T6).

U hořlavých kapalin je důležitý proces odpařování, odpařování probíhá u hořlavých kapalin za běžných teplot, avšak se vzrůstající teplotou kapaliny se urychluje proces odpařování.

Vzniklé páry se dále mísí se vzduchem v okolí a promísením vznikne tzv. **hořlavá směs**, kterou je snadné iniciovat a vznikne tak proces hoření.

## 2.6.2 Teplota vznícení

Pro teplotu vznícení je rozhodující, při jaké nejnižší teplotě se směs okolního vzduchu a hořlavých apr vznítí. Vznícení je uvažováno jako chemická reakce směsí plynů vypařujících se nad hladinou hořlavé kapaliny a mísením se s okolním vzduchem, za vzniku otevřeného plamene. Využívá se zatřídění hořlavé kapaliny do teplotních tříd. (Viz 2.5.1)



Vznícení je děj, který vzniká před samotným hořením.

### 2.6.2.1 Vznícení

Za vznícení se považuje začátek chemické reakce směsi plynu nebo páry se vzduchem za objevení otevřeného plamene (začátek hoření). Při stanovení teploty vznícení se vznícení vyvolá pouze působením tepla, nikoliv iniciačním zdrojem (plamenem nebo jiskrou).

Hodnota teploty vznícení představuje teplotu, která je nebezpečná pro vznícení směsi hořlavých plynů nebo par od různých zdrojů, např. zahřáté části strojů, tepelné výměníky a rozvody. Teplota vznícení se může vlivem různých materiálů, ve srovnání s laboratorními podmínkami zkoušky, značně měnit.

Obecně lze vznícení rozdělit na tzv. okamžité a dlouhodobé. Jak vyplývá z názvu, u okamžitého zapálení je aktivační energie dodána v krátkém časovém intervalu v podobě např. exploze, jiskry nebo různých mechanických nárazů. Proces hoření je u okamžitého zapálení mnohem intenzivnější a je ovlivněn jak teplotou zdroje, tak tepelnou kapacitou kapaliny.

### 2.6.2.2 Samovznícení

Samovznícení je vznícení, při kterém je zdrojem energie potřebné ke vznícení sama hořlavá kapalina. K samovznícení látky může docházet v důsledku fyzikálních, chemických nebo biologických pochodů. Podmínkou pro samovznícení, stejně jako pro vznícení, je, aby množství vznikajícího tepla bylo větší než teplo odváděné.

Energii potřebnou k samovznícení si hořlavá kapalina sama vytváří vlivem fyzikálních, biologických nebo chemických pochodů. Samovznícení může být jak tepelné (vlivem oxidačních reakcí), tak řetězové (vlivem štěpení chemických vazeb). V praxi, zejména u hořlavých kapalin, uložených v zásobnících, se lze setkat s požáry vzniklými tepelným samovznícením. Tepelné samovznícení probíhá pouze za vyšších teplot, vlivem oxidačních reakcí, které se projevují ve formě uvolňování tepla a následného počátku samozahřívání kapaliny. Množství uvolněného tepla směsi hořlavé kapaliny popisuje následující vztah (1), ze kterého vychází, že uvolněné teplo je závislé na hodnotě spalného tepla a rychlosti oxidační reakce hořlavé směsi:

$$Q_1 = \Delta H \times V \times v \quad (1)$$

kde:	$Q_1$	množství tepla, které se uvolní za časovou jednotku	[kJ/s]
	$\Delta H$	reakční teplo	[kJ/mol]
	$V$	objem hořlavé kapaliny	[m <sup>3</sup> ]

V rychlost oxidační reakce  $[(K \cdot mol)/(s \cdot m^3)]$

Uvolněné teplo, které postupně zahřívá hořlavou směs, dále postupuje skrz stěny nádoby do okolního prostředí. Lze konstatovat, že množství odvedeného tepla se rovná rozdílu teploty hořlavé směsi kapaliny a stěn nádoby dle rovnice:

$$Q_2 = a \times S \times (T - T_s) \quad (2)$$

kde:  $Q_1$  množství tepla, odvedeného ze směsi za časovou jednotku [kJ/s]

a koeficient přestupu tepla ze směsi na stěnu nádoby  $[K/(m^2 \cdot s)]$

S povrch nádoby  $[m^2]$

T teplota hořlavé směsi [K]

$T_s$  teplota stěn nádoby [K]

Podmínkou pro počátek procesu samozahřívání a následného samovznícení je, aby množství uvolněného tepla ( $Q_1$ ) bylo větší, než množství tepla odváděného do okolního prostředí ( $Q_2$ ). Pokud nastane jev opačný, ke samovznícení nedochází [15].

Za bezpečnou teplotu, na kterou může být kapalina zahřata se pokládá teplota, jejíž hodnota nepřekračuje 90% hodnoty teploty samovznícení.

### 2.6.3 Mez výbušnosti

Mezí výbušnosti je nazýváno koncentrační rozmezí hořlavé směsi vypařující se nad hladinou kapaliny, které je při zapálení iniciačním zdrojem schopno výbuchu a následného dalšího šíření požáru. Dolní koncentrační mez výbušnosti je nejnižší koncentrace hořlavých par ve směsi s oxidačním prostředkem (vzduchem), která je schopna při iniciaci zápalným zdrojem šířit plamen.

Horní koncentrační mez výbušnosti je nejvyšší koncentrace hořlavých par ve směsi s oxidačním prostředkem (vzduchem), která je ještě výbušná. Koncentrace těchto hořlavých par se udávají v objemových procentech.

Hořlavá směs je zapalitelná pouze uvnitř oblasti výbušnosti (Obr. 2). Pokud je koncentrace hořlavé směsi pod dolní mezí výbušnosti, není tato směs ani výbušná, ani hořlavá. Pokud koncentrace hořlavých směsí překročí horní mez výbušnosti, výbuch nenastane, ale při odpovídajícím zředěním pomocí vzduchu se může stát opět výbušnou [12].



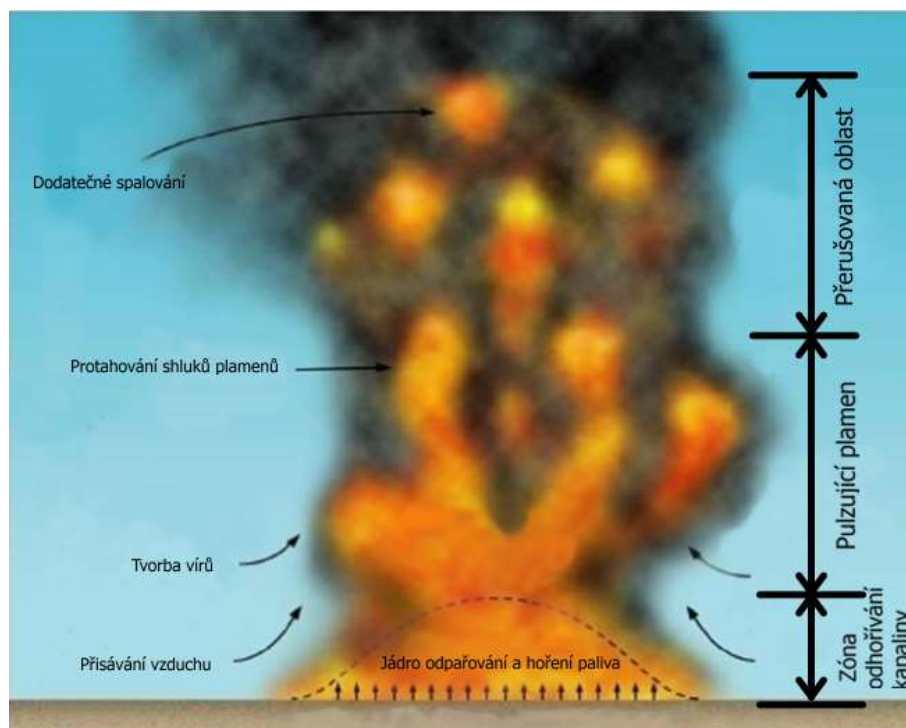
Obr. 1 Schéma mezí výbušnosti, Převzato: [12]

## 2.7 Parametry ovlivňující způsob hoření hořlavých kapalin

### 2.7.1 Dynamika plošného požáru hořlavé kapaliny

Struktura většiny požárů hořlavých kapalin může být rozdělena na jednotlivé zóny. Zóna odhořívání kapalného paliva a palivových par tvoří konstantní kuželovitý tvar. Nad touto zónou se nachází spalovací oblast, ve které dochází k pulzování plamene, a tedy zřejmé proudění vzniklé přisáváním vzduchu. Přerušovaná oblast se vyznačuje snižováním rychlosti a teploty s výškovou polohou [16].

Tyto jednotlivé zóny jsou přehledně popsány v Obr.3.



Obr. 2 Popis zón hoření hořlavé kapaliny, Převzato: [16]

### 2.7.2 Rychlost odpařování

Tato veličina je ovlivněna fyzikálními i chemickými vlastnostmi kapalin, záleží zejména zda je hořlavá kapalina tvořena směsí a také záleží na molární hmotnosti hořlavé kapaliny.

Pokud je kapalina tvořena hořlavou a nehořlavou látkou, tedy směsí, (např. methanol – voda, ethanol – voda) dochází při zahřívání k frakční destilaci, která má za následek separaci jednotlivých složek podle teploty varu. Složka s nižší teplotou varu odhoří dříve než s vyšší teplotou varu, což vede k rozdílným hodnotám teploty vzplanutí v závislosti na poměru složek.

Dle normy ČSN 65 0201 [6] je každá kapalina, která má uvedenou teplotu vzplanutí hořlavá. Rychlost odpařování vzrůstá se stoupající teplotou a se zvětšením plochy odpařované kapaliny.

### 2.7.3 Výška plamene

Výška plamene je ovlivněna přístupem vzduchu, který je dostupný ke spalování. Vzduch je stržen z přímého okolí hořící kapalně látky a mísí se s palivem. Pro interpretaci výšky plamene je vyžadováno pochopení přenosu hmoty do procesu přísávání vzduchu a následného podpoření hoření. Toto přísávání a míchání vzduchu s palivem může probíhat ve dvou fázích, první z nich je při laminárním proudění, které relativně pomalé. Druhým způsobem je turbulentní proudění při němž dochází ke zvyšující se rychlosti odhořívání paliva, což zvyšuje i rychlost odpařování [17].

Výška plamene plošného požáru je obvykle vztahována k velikosti ohraničené oblasti, ve které může dojít k hoření hořlavé kapaliny. Při experimentech s cílem určení výšky plamene je viditelný plamen běžně měřen fotografováním nebo videozáznamem hoření v tmavém prostředí a na černém pozadí.

Z různých experimentů je však zřejmé, že výška plamene závisí zejména na velikosti ohraničené oblasti hoření a rychlosti uvolňování tepla hořlavé kapaliny. V odborných literaturách je ke korelacím mezi rychlostí uvolňování tepla a výškou plamene uvažováno odlišně.

Tab. 2 Vybrané korelace mezi výškou plamene a rychlostí uvolňování tepla dle literatur

$$[18] \quad l_f \div d = 15 Q^2 \quad (3)$$

$$[19] \quad l_f \div d = 42 Q^{0.61} \quad (4)$$

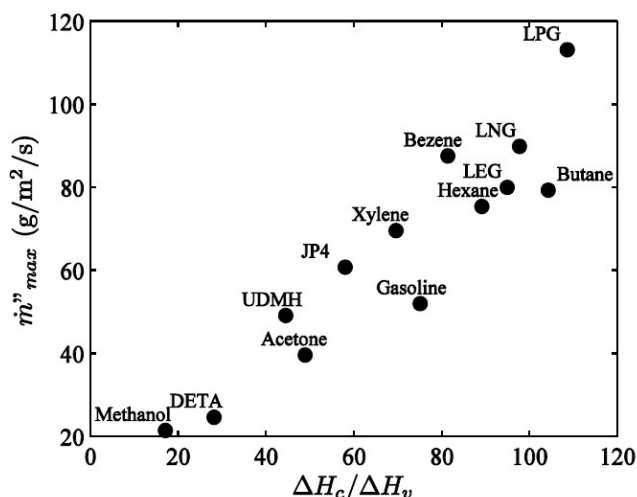
$$[20] \quad l_f \div d = 3 \times 3Q^{2/3} \quad (5)$$

#### 2.7.4 Rychlost spalování

Rozumí se rychlost, kterou těkavé látky vydávají z kapaliny palivo odpařováním. Rychlost spalování se obvykle uvádí jako míra ztráty hmotnosti paliva v závislosti na čase nebo jako ztráta hmotnosti paliva v závislosti na vztažené ploše a čase.

Nejpodstatnějším vlivem pro rychlost spalování je tvar ohraničené oblasti hoření. Lze tvrdit, že rychlost spalování je do značné míry závislá na průměru nádoby. U nádob s menším průměrem dochází k vyššímu nárůstu rychlosti odhořívání, naopak u nádob s velkým průměrem se rychlost spalování ustálí. V některých případech se rychlost spalování z velkých nádob může snížit vlivem nedokonalého spalování a nadměrné tvorby kouře.

Rychlost spalování také závisí na typu hořlavé kapaliny neboli paliva. Vzhledem k rozdílnému chemickému složení a termochemickým reakcím.



Obr. 3 Rychlost spalování vzhledem k termochemickým vlastnostem hořlavých kapalin, Převzato: [16]

Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost odhořívání je umístění kapaliny. Průběh hoření kapaliny v místnosti je oproti volnému hoření rozdílný. Pokud dochází k hoření kapaliny v uzavřeném prostoru, rychlost odhořívání je vyšší. V místnosti se totiž kumuluje kouřová vrstva, která zpětně ohřívá hladinu kapaliny a tím urychluje proces jejího odhořívání [13, 14].

Rychlost spalování může být určena dle [21, 22] následovně:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{Q}_{fs} - \dot{Q}_1}{\Delta H_v} \quad (6)$$

kde:  $\dot{Q}_{fs}$  přenos tepla od plamenů na povrch hořlavé kapaliny [kW]

$\dot{Q}_1$  teplo pohlcené při přenosu do spodních vrstev hořlavé kapaliny [kW]

$\Delta H_v$  energie nutná pro odpařování [kJ/g]

### 2.7.5 Rychlost uvolňování tepla (HRR)

Časově proměnlivá veličina, která představuje rychlost tepla uvolněného v čase. Laboratorně se tato hodnota měří v kónickém kalorimetru. V programu FDS tímto parametrem definujeme, jakým způsobem bude hořet povrch, na kterém je tato veličina určena. Proces hoření lze zadat i za pomoci kinetických vlastností hoření, avšak hodnoty pro zadání jsou obtížně dostupné.

K měření HRR se využívá měření za pomoci kyslíkové kalorimetrie, využívá se předpoklad, že látky uvolňují konstantní množství energie na jednotkové množství spotřebovaného kyslíku.

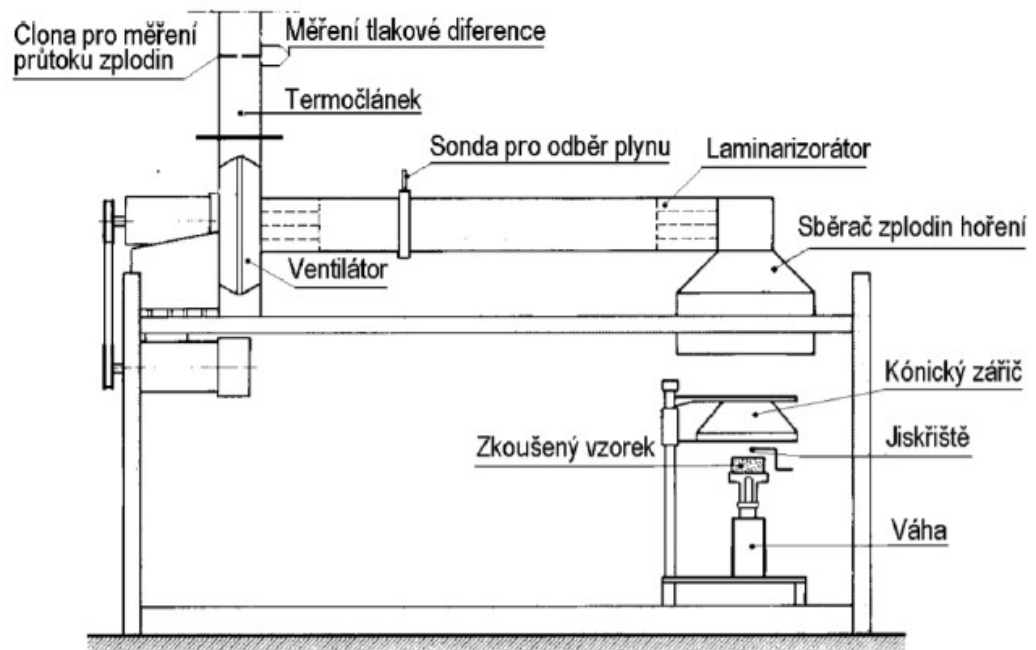
$$Q = \dot{m}'' \times \Delta H_{eff} \quad (7)$$

kde:	$Q$	rychlost uvolňování tepla	[kW]
	$\Delta H_{eff}$	efektivní výhřevnost	[kJ/kg]

Pro zjištění výhřevnosti se využívá laboratorních zkoušek. Jelikož laboratorní zkoušky se mohou lišit od výsledků při reálném požáru, je v praxi počítáno s efektivní výhřevností. Ta je dána rovnicí:

$$\Delta H_{eff} = \Delta H_c \times \chi_s \quad (8)$$

kde:	$\chi_s$	součinitel účinnosti spalování	[-]
	$\Delta H_c$	celková výhřevnost	[kJ/kg]

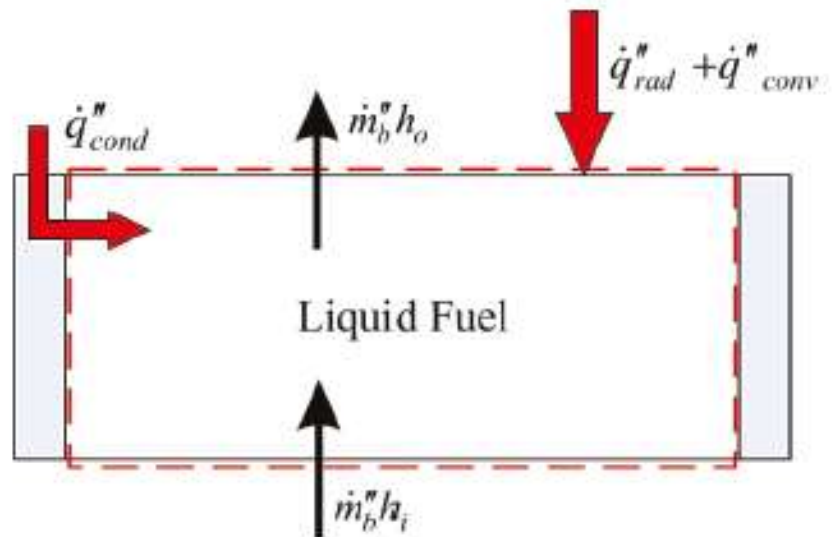


Obr. 4 Schéma kónického kalorimetru, Převzato: [23]

Při zjištění rozdílu mezi celkovou a efektivní výhřevností určuje účinnost spalování ( $\chi_s$ ). Účinnost spalování ovlivňuje například kouřivost dané látky a tvorba sazí. Obecně řešeno definuje dokonalost spalování. [23]

## 2.7.6 Hustota tepelného toku

Zejména při větších průměrech má hustota tepelného toku významný vliv na rychlost odpařování hořlavé kapaliny. Vzhledem k zákonu zachování energie, energie k zahřívání paliva a k odpařování musí být v rovnováze s tepelnými toky na hranicích řešené oblasti hoření.



Obr. 5 Schéma rovnováhy energie hoření kapalných látek, Převzato: [25]

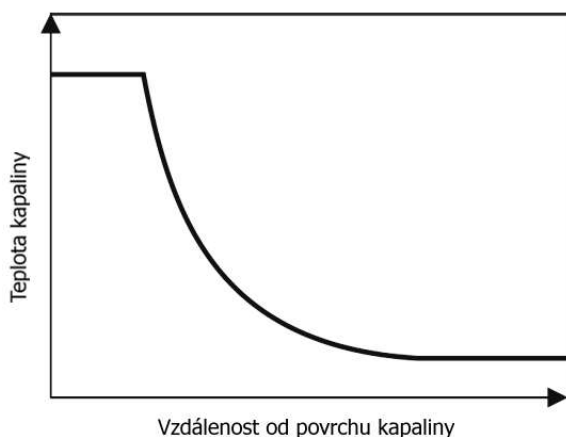
Při řešení odstupových vzdáleností je v půdorysné rovině podstatná sálavá složka tepla. Dále dochází ke sdílení tepla vně objektu a sáláním. Pro zabránění vznícení hořlavých konstrukcí vně objektu důsledkem sálání tepla, nesmí intenzita dopadající složky přesáhnout kritickou hodnotu ( $18,5 \text{ kW/m}^2$ ).

### 2.7.7 Chování kapalné fáze

Většina studií se úzce zaobírá plamenným hořením a transportem energie v rámci plynné fáze, avšak při zjišťování chování kapalné fáze je počet studií omezen. Několik studií zabývajících se plošnými požáry hlubokých nádrží řeší tento problém.

Těsně pod hladinou hořlavé kapaliny se nachází velmi horká zóna kapaliny, která se se zvětšující hloubkou snižuje. Dochází tak zejména díky pohlcování radiace od plamenného hoření nad povrchem kapaliny. [16]





Obr. 6 Schéma poklesu teploty vůči vzdálenosti od povrchu, Převzato: [16]

Důležitý faktor teploty vrstvy kapaliny je také krajní oblast ohraničení hořlavé kapaliny, pokud jsou hraniční stěny ochlazovány, tepelné vrstvy kapaliny se snižují. Pokud ovšem dochází ke zvětšování tepelných vrstev kapaliny dochází, tak hlavně díky přenosu tepla z ohraničujících konstrukcí a kapaliny, při hoření ubývá objem kapaliny a snižuje se její hladina, a tím je vystaveno účinkům hoření větší plocha ohraničujících konstrukcí, a tudíž dochází k většímu přenosu tepla s kapalinou.

Nakakuki [24] dokázal, že při řešení přestupů tepla se dostaneme do rovnováhy tehdy, kdy vezmeme v úvahu přestup tepla ze stěn ohraničující konstrukce a rychlost změny tepla v kapalině. Nicméně je potřeba použít detailní model přestupu tepla uvnitř kapalně fáze. Na základě těchto poznatků a dalšího náročného řešení přestupu tepla v kapalně fázi většina modelů kapalnou fázi zanedbává.

Inamura [25] představil dva modely pro rovnováhu energie v kapalně fázi. Jeden zahrnoval jen vedení tepla a druhý zahrnoval vedení tepla a zároveň absorpci tepla v kapalně fázi. Vypočtené teplotní profily z těchto modelů byly následně porovnány s experimentálním měřením distribuce teplot v kapalině. Ukázalo se, že absorpce záření přes kapalnou vrstvu je důležitá a musí být zahrnuta do analýzy přenosu kapalně energie. Avšak i při zohlednění hloubkové absorpce záření byly zjištěny rozpor mezi měřenou a odhadovanou distribucí teploty v kapalně fázi.

Ve většině modelů nebyly zahrnuty účinky přirozené konvekce řízené vztlakem. Po přidání konvekce se energetický model lépe shodoval s experimentálními daty. Dalším faktorem, který byl při výzkumu zpozorován, je gradient povrchového napětí, který je způsobený kolísáním teplot, a může vést k termokapilární konvekci. Tento faktor může zvýšit přenos tepla v kapalině.

## 2.7.8 Chování plamene při hoření hořlavých kapalin

Existují dva hlavní typy šíření plamene při hoření hořlavých kapalin. Jejich klasifikace je založena na PTCH hořlavé kapaliny a počáteční teplotě kapaliny před zapálením. Shrnutí výzkumu šíření plamene lze nalézt v [26, 27]. Hlavní vlastnosti hrající roli v šíření plamene v hořlavé kapalině jsou bod vzplanutí kapalného paliva a teplota vznícení.

Když dojde k zapálení par uvolňujících se z hořlavé kapaliny spotřebovává se okolní vzduchu a vytváří se difúzní plamen na ložem kapalného paliva

### 2.7.8.1 Bod vzplanutí

Výše zmíněná důležitá PTCH pro hořlavé kapaliny. Bod vzplanutí určuje nejnižší teplotu kapaliny, při které se uvolňuje takové množství hořlavých par, že po smísení se se vzduchem vytvoří hořlavou směs. Tato hořlavá směs je při přiblížení zápalného iniciačního zdroje vzplanout. Pokud proces hoření trvá alespoň 5 s bez přerušení definuje proces jako trvalé hoření.

Bod vzplanutí ovlivňuje rychlost odpařování hořlavé kapaliny. Tato veličina je ovlivněna fyzikálními i chemickými vlastnostmi kapaliny.

Byla vytvořena databáze PTCH pro snadné vyhledávání jednotlivých charakteristik viz. Příloha 1. Praktická část diplomové práce je dále úzce zaměřena na hoření dvou konkrétních kapalin – heptan a ethanol. Tyto dvě kapaliny byly vybrány z hlediska jejich rozdílnosti požárně technických charakteristik.

## **3 Analýza sálavého toku při hoření hořlavých kapalin**

### **3.1 Úvod**

Experimentální neboli praktická část se zabývá numerickým a analytickým řešením hoření hořlavých kapalin. V první části jsou zkoumány tři případy hoření kapaliny v nádobě s rozdílnou velikostí a je porovnávána charakteristika plamene. Je porovnáván normový přístup, analytický výpočet dle modelu Thomas a Heskestad a matematický model. Je sledována velikost odstupových vzdáleností v porovnání s normovým řešením.

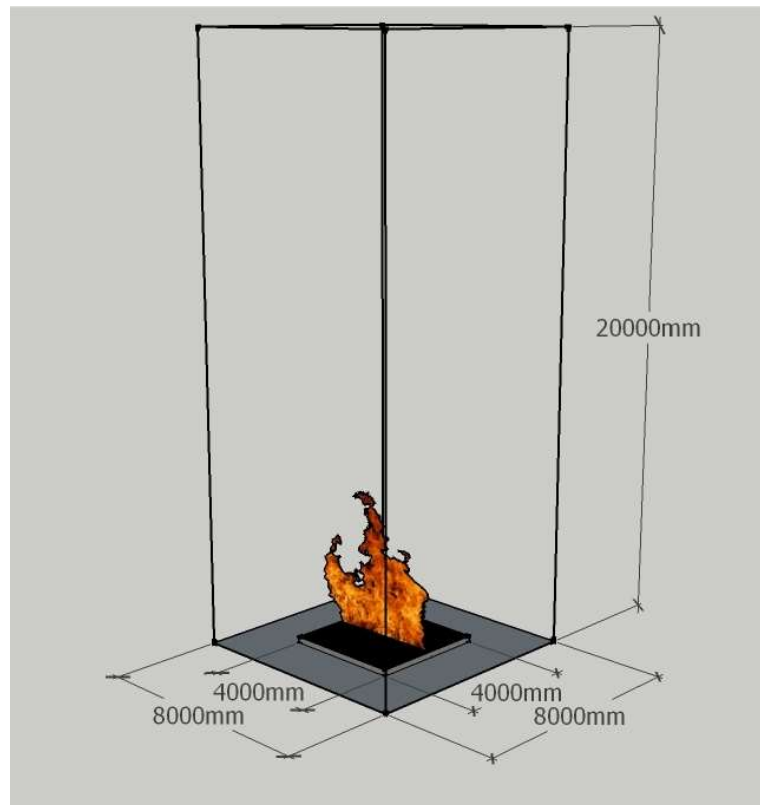
V další části je zkoumán vliv clonících stěn při řešení tepelného sálavého toku, který je určen odstupovými vzdálenostmi. Jsou vytvořeny matematické modely s různým umístěním a velikostí clonících stěn. Je sledován tvar odstupové vzdálenosti zejména u hran clonící stěny.

### **3.2 Analytické řešení výšky plamene**

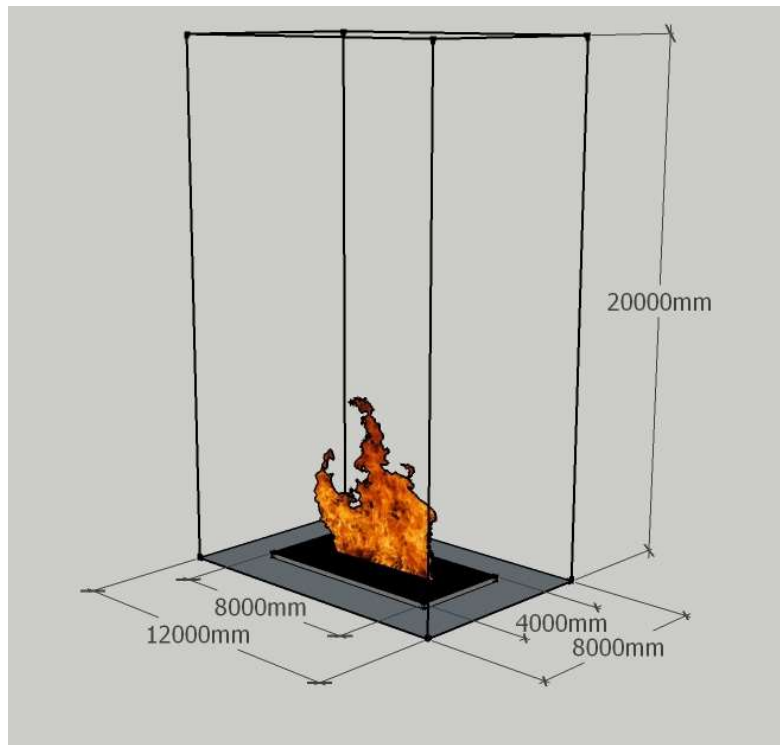
Pro analytické řešení a následné porovnání s normovým přístupem byly uvažovány dvě metody, které se využívají pro výpočet výšky plamen podle eurokódu. Jedné se o metodu Heskestad a Thomas. [28]

#### **3.2.1 Požární scénáře**

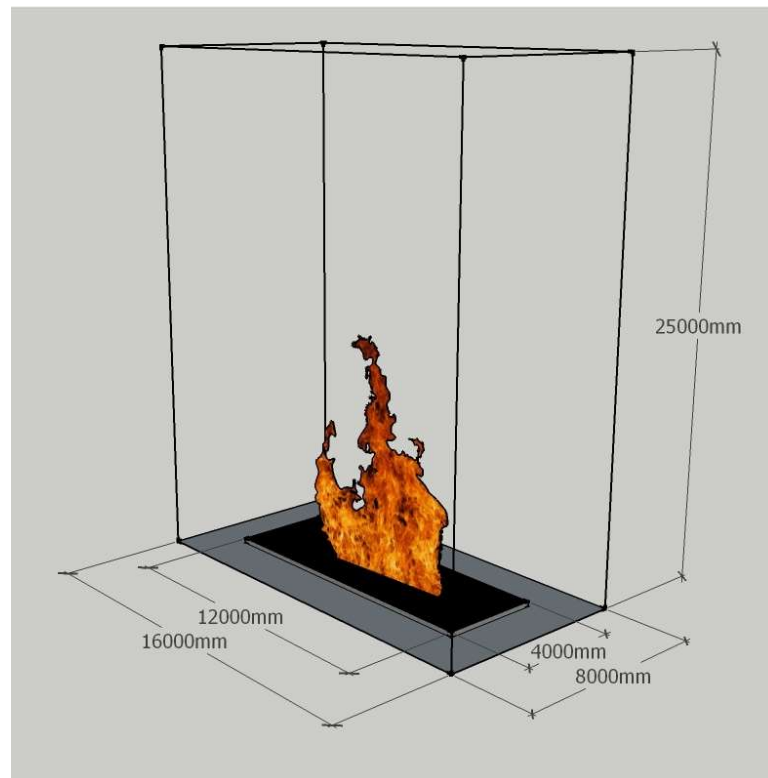
Pro vypovídající výsledky jsou použity tři požární scénáře, jedná se tedy o čtyřhrannou jímku s hořlavou kapalinou, v prvním požárním scénáře je uvažována jímka o rozměrech 4x4 m, ve druhém požárním scénáři je uvažována jímka o rozměrech 8x4 m a v posledním požárním scénáři je jímka o rozměrech 12x4 m.



Obr. 7 Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 4x4 m



Obr. 8 Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 8x4 m



Obr. 9 Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 12x4 m

Jednotlivé požární scénáře se tedy liší jen změnou délkou jedné strany. A vytvoření rozlišných ploch, na kterých probíhá odhořívání.

### 3.2.2 Model Heskestad

Vstupními daty pro výpočet je plocha ohraničené hořlavé kapaliny, hmotnostní rychlost spalování, spalné teplo látky, teplota okolního vzduchu a empirická konstanta, která charakterizuje použitou kapalinu a je funkcí zpětného tepelného toku z plamene na hladinu kapaliny.

Rychlost uvolňování tepla se spočítá dle vzorce:

$$Q = m'' * \Delta H_{c,eff} * (1 - e^{-k\beta * D}) * A_{pool} \quad (9)$$

kde:	$m''$	hmotnostní rychlost spalování	[kg/m <sup>2</sup> -sec]
	$\Delta H_{c,eff}$	spalné teplo látky	[kJ/kg]
	$k\beta$	empirická konstanta	[-]
	$A_{pool}$	plocha ohraničené hořlavé kapaliny	[m <sup>2</sup> ]

Pro pokračování ve výpočtu je nutno plochu hořlavé kapaliny přepočítat na průměr požáru, tato veličina se vypočte následovně:

$$D = \sqrt{(4 * \frac{A_{pool}}{\pi})} \quad (10)$$

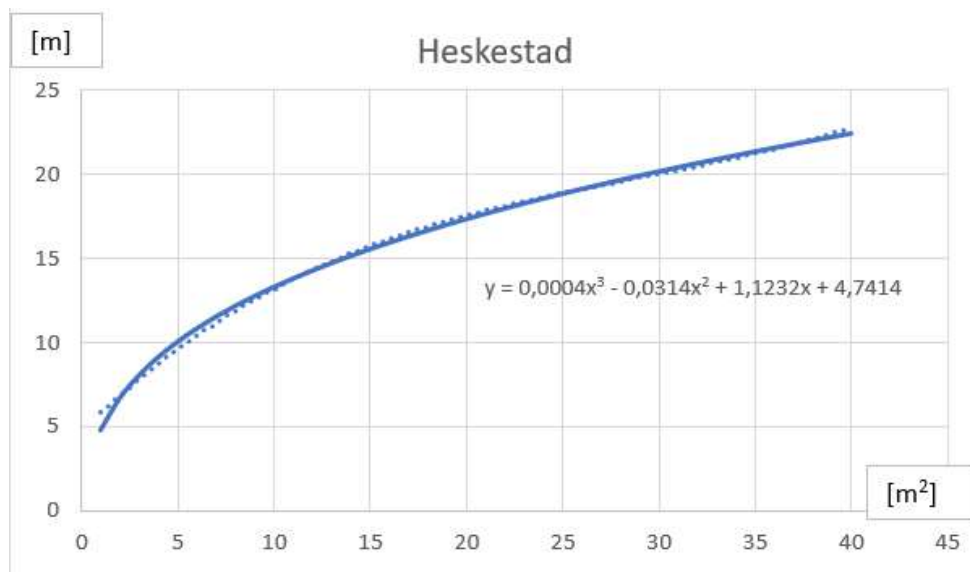
kde:	$A_{pool}$	plocha ohraničené hořlavé kapaliny	[m <sup>2</sup> ]
------	------------	------------------------------------	-------------------

Pro výslednou výšku plamene je použit následující vzorec:

$$H_f = 0,235 * Q^{\frac{2}{5}} - 1,02 * D \quad (11)$$

kde:	Q	rychlost uvolňování tepla	[kW]
	D	přepočet velikosti plochy hořlavé kapaliny	[m]

Z vypsanych vzorců je vytvořena závislost výšky plamene vůči ohraničené ploše hořlavé kapaliny, z grafu vyplývá, že se zvětšující se plochou požáru roste výška plamene.



Obr. 10 Graf závislosti ohraničené plochy hoření a výšky plamene dle modelu Heskestad

Pro řešené případy jsou výsledné hodnoty výšky plamene následující:

Tab. 3 Tabulka výsledných výšek plamene od jednotlivých zkoumaných požárů

Velikost nádrže [m <sup>2</sup> ]	Výška plamene [m]
4x4	13,31
8x4	20,68
1x4	24,01

### 3.2.3 Model Thomas

Vstupními daty pro výpočet je plocha ohraničené hořlavé kapaliny, hmotnostní rychlost spalování, spalné teplo látky, teplota okolního vzduchu a empirická konstanta, která charakterizuje použitou kapalinu a je funkcí zpětného tepelného toku z plamene na hladinu kapaliny.

Rychlost uvolňování tepla se spočítá dle vzorce:

$$Q = m'' * \Delta H_{c,eff} * (1 - e^{-k * D}) * A_{pool} \quad (12)$$

kde:  $m''$  hmotnostní rychlost spalování [kg/m<sup>2</sup>-sec]

$\Delta H_{c,eff}$  spalné teplo látky [kJ/kg]

$k\beta$  empirická konstanta [-]

$A_{pool}$  plocha ohraničené hořlavé kapaliny [m<sup>2</sup>]

Pro pokračování ve výpočtu je nutno plochu hořlavé kapaliny přepočítat na průměr požáru, tato veličina se vypočte následovně:

$$D = \sqrt{4 * \frac{A_{pool}}{\pi}} \quad (13)$$

kde:  $A_{pool}$  plocha ohraničené hořlavé kapaliny [m<sup>2</sup>]

Pro výslednou výšku plamene je použit následující vzorec:

$$H_f = 42 * D * \left(\frac{m''}{\rho_a} * \sqrt{(g * D)}\right)^{0,61} \quad (14)$$

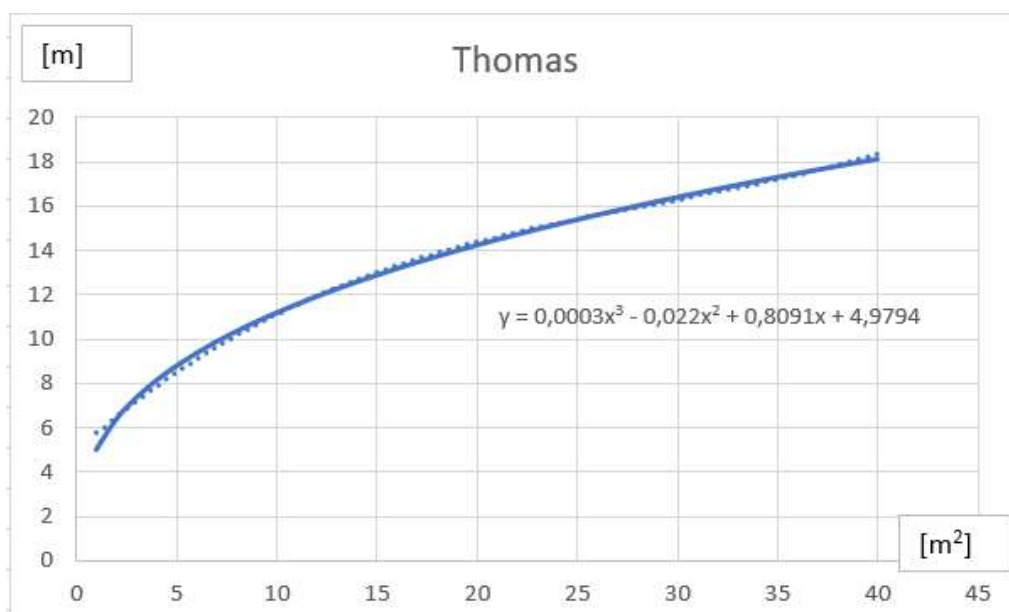
kde:  $m''$  hmotnostní rychlost spalování [kg/m<sup>2</sup>-sec]

$D$  přepočet velikosti plochy hořlavé kapaliny [m]

$\rho_a$  hustota okolního vzduchu [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  gravitační rychlost [m/s]

Z vypsaných vzorců je vytvořena závislost výšky plamene vůči ohraničené ploše hořlavé kapaliny, z grafu vyplývá, že se zvětšující se plochou požáru roste výška plamene.



Obr. 11 Graf závislosti ohraničené plochy hoření a výšky plamene dle modelu Thomas

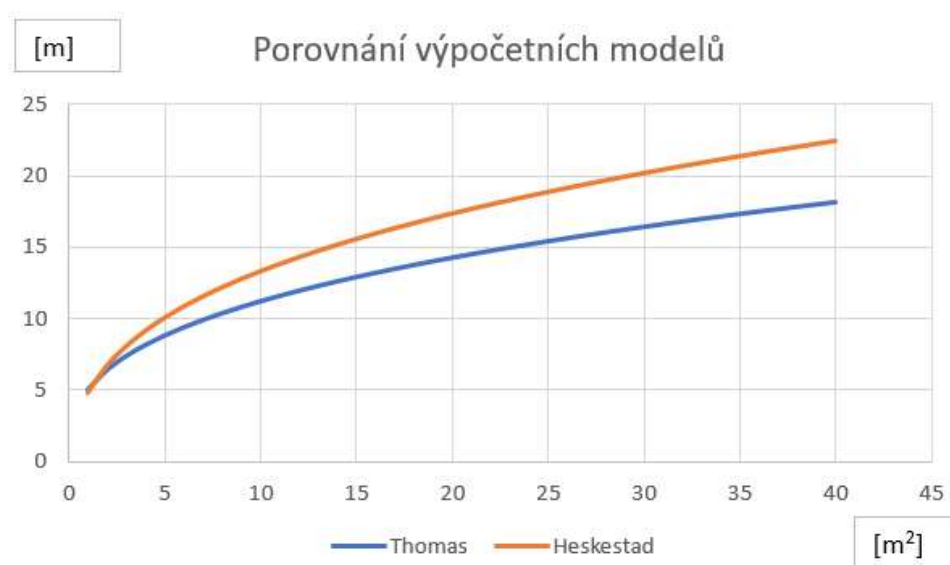
Pro řešené případy jsou výsledné hodnoty výšky plamene následující:



Tab. 4 Tabulka výsledných výšek plamene od jednotlivých zkoumaných požárů

Velikost nádrže [m <sup>2</sup> ]	Výška plamene [m]
4x4	11,20
8x4	16,77
1x4	19,31

Při porovnání obou modelů je zřejmé, že výsledné hodnoty z modelu Heskestad jsou oproti metodě Thomas vyšší.



Obr. 12 Graf porovnání obou výpočetních modelů výšky plamene

Výše uvedené modely výpočtu výšky plamene jsou součástí publikace [29]. Grafy závislostí a porovnání jsou vytvořeny pro různě velké plochy požáru.

### 3.2.4 Výsledky analytického řešení

V tabulce níže můžete vidět porovnání výšky plamene při využití metody Heskestad a Thomas oproti výpočtu matematickým modelem. Z hodnot je zřejmé, že při metodě Heskestad se dostáváme k větší výšce plamene, a naopak u metody Thomas se dostáváme k nižším hodnotám.

Metodou Heskestad a Thomas byla vypočtena výška plamene pro soubor různých hořlavých kapalin pro případ hoření jímky o rozměrech 4x4 m s hloubkou hořlavé kapaliny 0,1 m. Jelikož mají různé hořlavé kapaliny různé požárně technické charakteristiky, níže je tabulka hodnot, se kterými byl uskutečněn výpočet.

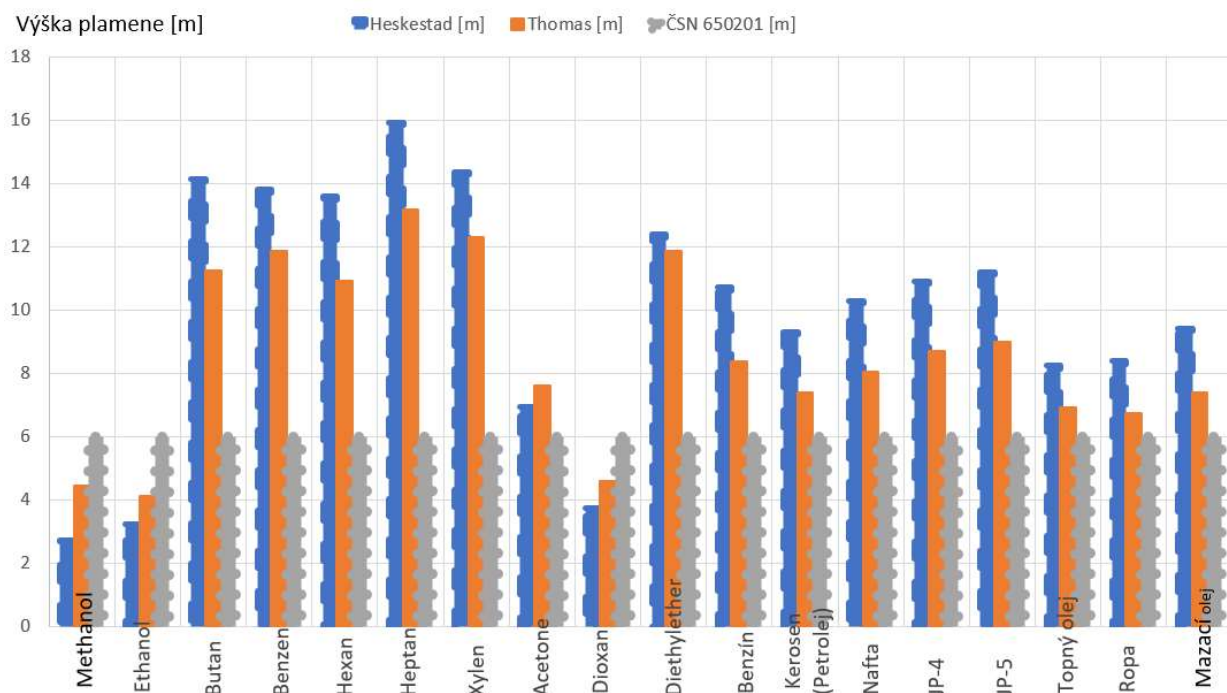
Tab. 5 Tabulka hodnot požárně technických charakteristik potřebných pro výpočet výšky plamene

Tabulka PTCH vybraných hodnot	Hmotnostní rychlost spalování $m''$ [kg/m <sup>2</sup> -sec]	Spalné teplo $\Delta H_{c,eff}$ [kJ/kg]	Hustota $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Empirická konstanta $k\beta$ [m <sup>-1</sup> ]
Methanol	0,017	20000	796	100
Ethanol	0,015	26800	794	100
Butan	0,078	45700	573	2,7
Benzen	0,085	40100	874	2,7
Hexan	0,074	44700	650	1,9
Heptan	0,101	44600	675	1,1
Xylen	0,09	40800	870	1,4
Acetone	0,041	25800	791	1,9
Dioxan	0,018	26200	1035	5,4
Diethylether	0,085	34200	714	0,7
Benzín	0,048	44700	740	3,6
Kerosen (Petrolej)	0,039	43200	820	3,5
Nafta	0,045	44400	918	2,1
JP-4	0,051	43500	760	3,6
JP-5	0,054	43000	810	1,6
Topný olej	0,035	39700	970	1,7
Ropa	0,0335	42600	855	2,8
Mazací olej	0,039	46000	760	0,7

Již podle hodnot můžeme vidět velké rozdíly v hodnotách spalného tepla a hmotnostní rychlosti odpařování. Největší vliv na výšku plamene má spalné teplo látky a hmotnostní rychlost spalování, čím je větší spalné teplo tím je plamen vyšší, to samé platí u hmotnostní rychlosti spalování. Všimněme si, že pokud by byla uvažována normová hodnota výšky plamene, která je nejméně 6 m, bylo by řešení na straně bezpečné pouze ve třech z osmnácti zkoumaných hořlavých kapalin. Už jen tato skutečnost poukazuje na nedostatečné řešení normovým přístupem.

Tab. 6 Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 4x4 m

Výsledné hodnoty výpočtu	D [m]	HRR [kW]	Heskestad [m]	Thomas [m]
Methanol	4,51	5440,00	2,73	4,45
Ethanol	4,51	6432,00	3,24	4,12
Butan	4,51	57033,31	14,17	11,26
Benzen	4,51	54535,72	13,84	11,87
Hexan	4,51	52914,82	13,61	10,90
Heptan	4,51	71570,65	15,95	13,18
Xylen	4,51	58646,15	14,38	12,29
Acetone	4,51	16921,61	6,94	7,61
Dioxan	4,51	7545,60	3,75	4,60
Diethylether	4,51	44537,73	12,40	11,87
Benzín	4,51	34329,60	10,72	8,37
Kerosen (Petrolej)	4,51	26956,80	9,31	7,38
Nafta	4,51	31965,56	10,29	8,05
JP-4	4,51	35496,00	10,93	8,69
JP-5	4,51	37124,86	11,21	9,00
Topný olej	4,51	22221,66	8,27	6,91
Ropa	4,51	22833,53	8,41	6,72
Mazací olej	4,51	27485,62	9,41	7,38



Obr. 13 Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 4x4 m

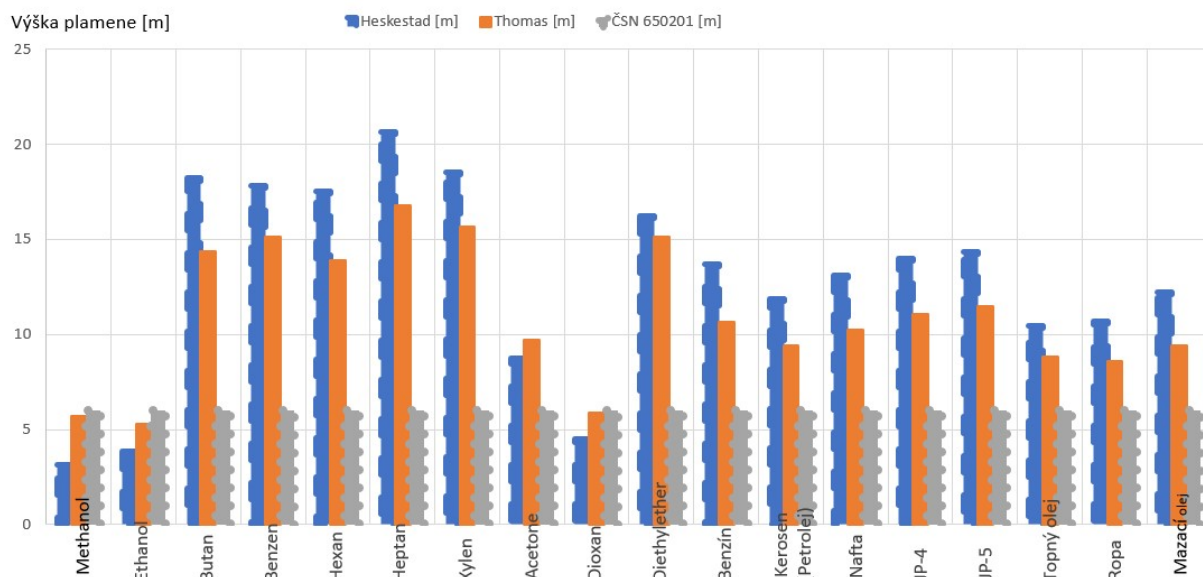
V grafu byla znázorněna hodnota 6 m, které představuje normovou minimální započitatelnou hodnotu výšky plamene dle normového řešení [5]. Výškové rozdíly jsou patrné, pouze tři kapalné hořlaviny se nachází pod normovou výškou plamene.

Pro požární scénář hoření hořlavé kapaliny o rozměrech 8x4 m se graf mírně mění a výšky plamene se dostávají ve většině nad normovou hodnotu.

Tab. 7 Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 8x4 m

Výsledné hodnoty výpočtu	D [m]	HRR [kW]	Heskestad [m]	Thomas [m]
Methanol	6,38	10880,00	3,17	5,66
Ethanol	6,38	12864,00	3,84	5,24
Butan	6,38	114067,20	18,26	14,33
Benzen	6,38	109072,00	17,82	15,10
Hexan	6,38	105849,03	17,53	13,87
Heptan	6,38	144018,55	20,68	16,77

Xylen	6,38	117488,55	18,55	15,63
Acetone	6,38	33849,42	8,73	9,68
Dioxan	6,38	15091,20	4,52	5,86
Diethylether	6,38	91957,23	16,21	15,10
Benzín	6,38	68659,20	13,71	10,65
Kerosen (Petrolej)	6,38	53913,60	11,84	9,39
Nafta	6,38	63935,90	13,14	10,24
JP-4	6,38	70992,00	13,98	11,06
JP-5	6,38	74301,27	14,36	11,45
Topný olej	6,38	44463,14	10,48	8,79
Ropa	6,38	45667,20	10,66	8,56
Mazací olej	6,38	56749,66	12,22	9,39

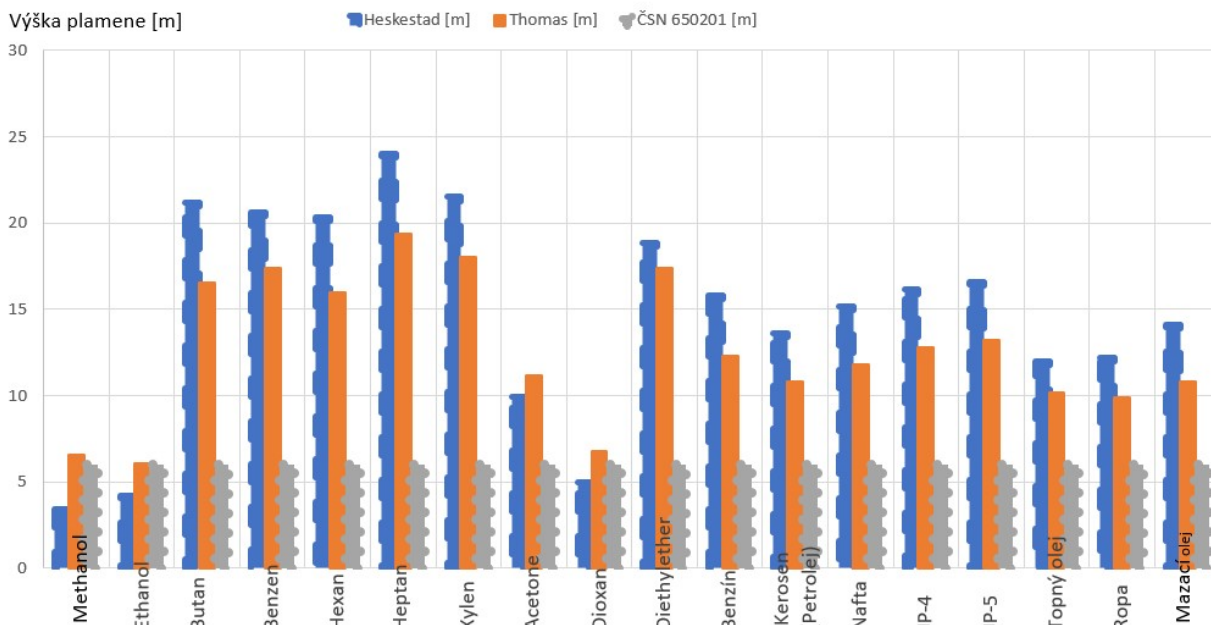


Obr. 14 Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 8x4 m

Při požární scénáři velikosti jímky 12x4 m se výška plamene zvyšuje, avšak hodnoty pro dioxan, ethanol a methanol se téměř nemění.

Tab. 8 Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 12x4 m

Výsledné hodnoty výpočtu	D [m]	HRR [kW]	Heskestad [m]	Thomas [m]
Methanol	7,82	16320,00	3,41	6,51
Ethanol	7,82	19296,00	4,19	6,03
Butan	7,82	171100,80	21,16	16,50
Benzen	7,82	163608,00	20,64	17,38
Hexan	7,82	158774,34	20,30	15,97
Heptan	7,82	216180,97	24,01	19,31
Xylen	7,82	176252,89	21,51	18,00
Acetone	7,82	50774,38	9,95	11,14
Dioxan	7,82	22636,80	5,00	6,74
Diethylether	7,82	138949,81	18,83	17,38
Benzín	7,82	102988,80	15,80	12,27
Kerosen (Petrolej)	7,82	80870,40	13,61	10,81
Nafta	7,82	95903,99	15,14	11,79
JP-4	7,82	106488,00	16,12	12,73
JP-5	7,82	111455,59	16,57	13,18
Topný olej	7,82	66695,89	12,01	10,12
Ropa	7,82	68500,80	12,23	9,85
Mazací olej	7,82	85750,24	14,12	10,81



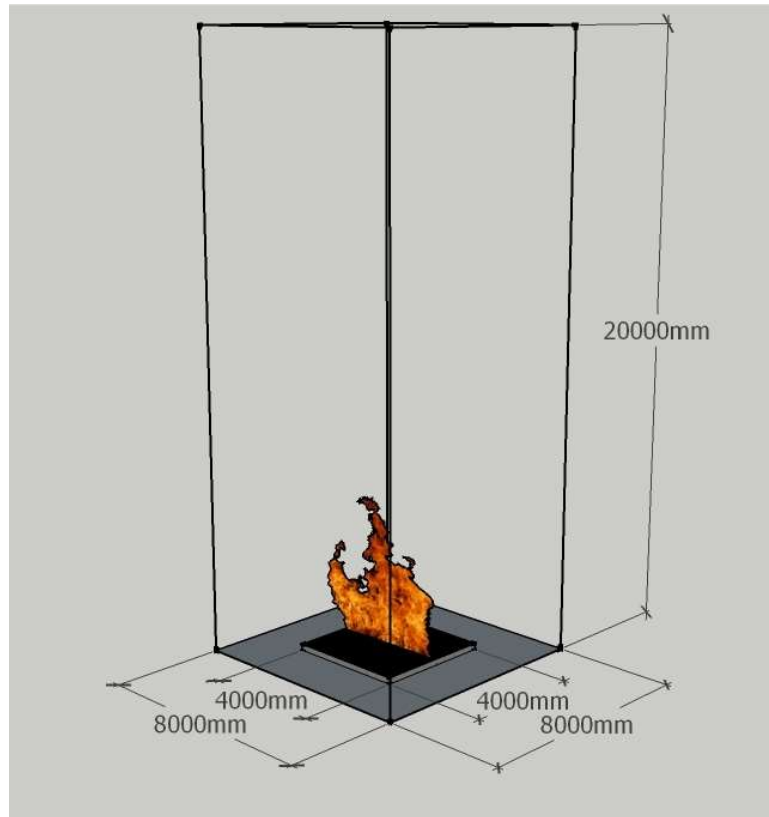
Obr. 15 Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímkou 12x4 m

Dle grafu je zřejmé, že hodnoty výšky plamene mohou být při výpočtu až čtyřikrát větší než normově určená započitatelná hodnota výšky plamene. Jedná se však o porovnání s výpočtovými modely dle eurokódu a výsledné numerické řešení se může lišit. Pro porovnání s numerickým modelem je nutno nejdříve zkontrolovat, zda je požár dobře vymodelován, a zda výsledné hodnoty odpovídají chování plošného požáru.

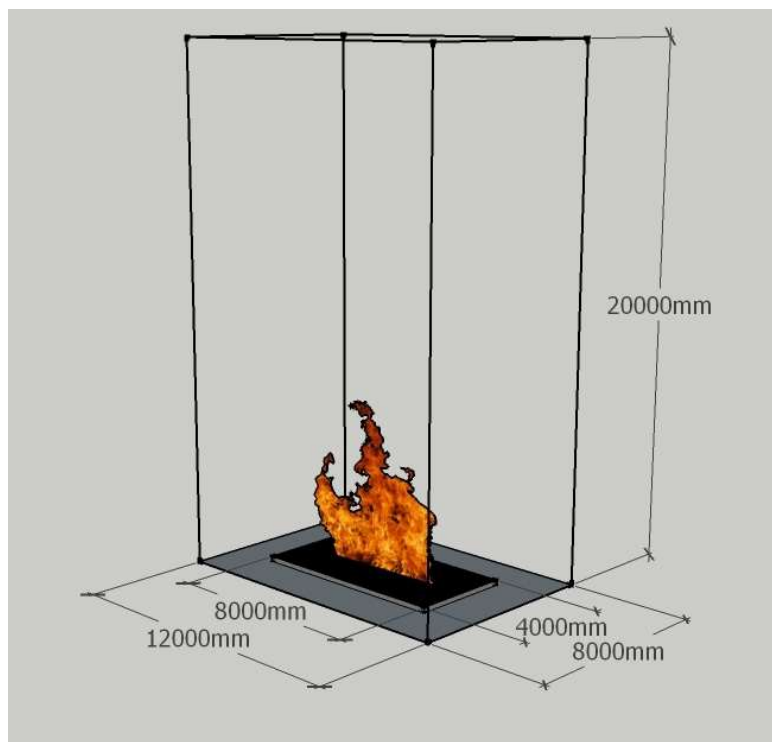
### 3.3 Numerické řešení výšky plamene

#### 3.3.1 Požární scénáře

Jsou použity tři požární scénáře podobné jako při analytickém řešení viz. 3.2.1, liší se tedy pouze zvětšující se stranou ohraničené oblasti hoření kapaliny. Pro zkrácení výpočetního času byl modelován pouze prostor, ve kterém se nachází ohraničená hořlavá kapalina. Jeho ohraničující stěny bylo uvažováno jako zcela otevřené tudíž netvoří hranici.

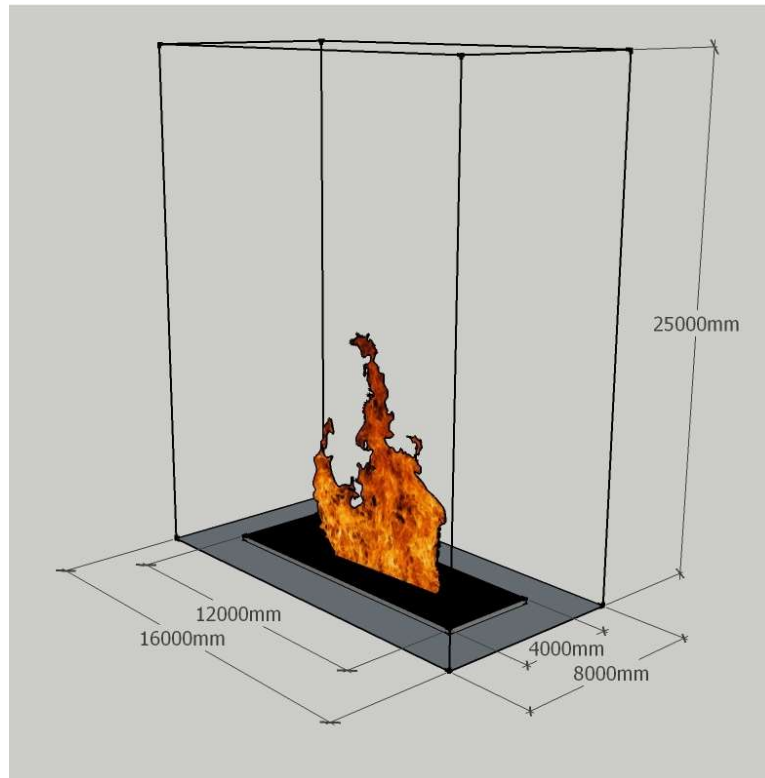


Obr. 16 Schéma prvního matematického modelu – jímka 4x4 m



Obr. 17 Schéma druhého matematického modelu – jímka 8x4 m





Obr. 18 Schéma třetího matematického modelu – jímka 12x4 m

### 3.3.2 Software

Pro matematické CFD simulace je použit software FDS ve verzi 6.5.2. Software FDS je vyvíjen Národním institutem standardů a technologie v USA (NIST = angl. National Institute of Standards and Technology). FDS pracuje na základě numerických výpočtů Navierovy-Stokesovy rovnice pro nízké rychlosti toku tekutin [30].

Software nedisponuje pre-procesorem a zdrojový kód je obvykle psán v textovém souboru, ve kterém byly vytvořeny informace ohledně výpočetní oblasti, pevných objektech, otevřenosti/uzavřenosti ploch, vlastností jednotlivých materiálů a výstupů. Jako vizualizační nástroj byl použit software Smokeview.

### 3.3.3 Výpočetní síť

Pro tři různé požární scénáře jsou vytvořeny tři výpočetní sítě. Výpočetní síť u prvního požárního scénáře obsahuje 20 000 buněk. Výpočetní síť u druhého požárního scénáře obsahuje 80 000 buněk a výpočetní síť u třetího požárního scénáře obsahuje 150 000 buněk.

Za účelem zkrácení výpočetního času je výpočetní síť zmenšena a kopíruje hrany ohraničující plochy hoření kapaliny. Všechny výpočetní sítě mají rozměry jedné výpočetní buňky 200 x 200 x 200 mm.

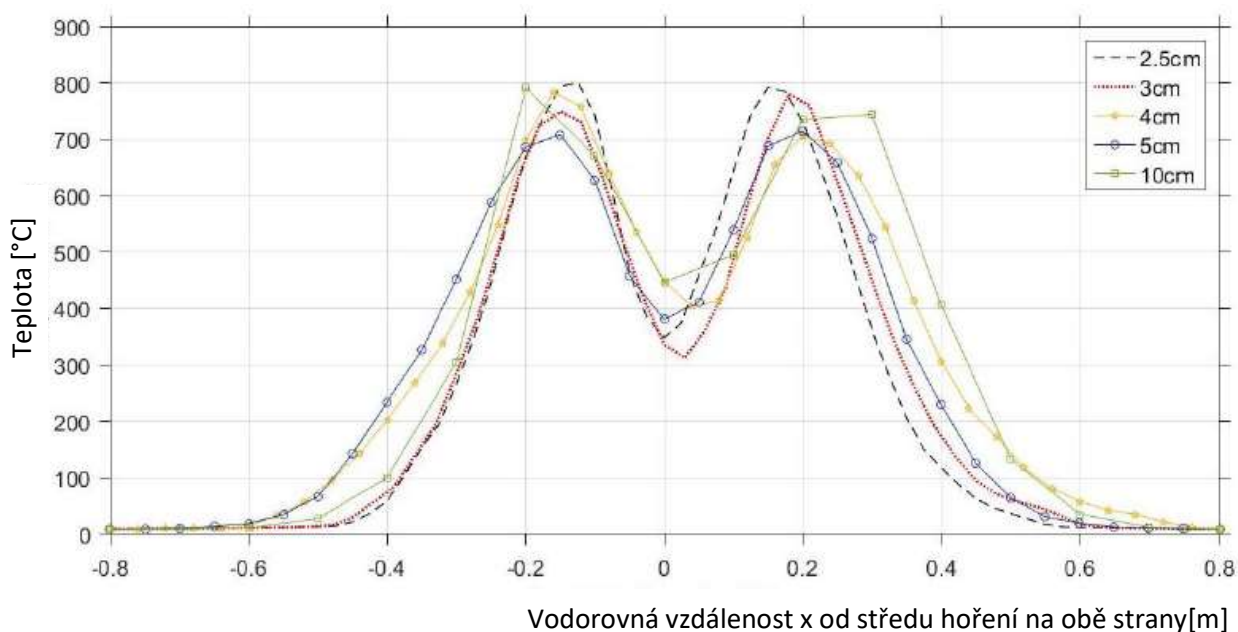
### 3.3.4 Citlivostní analýza velikosti výpočetní sítě

Pro analýzu vlivu velikosti výpočetní sítě je uvažováno pět různě jemných výpočetních sítí. Jednotlivé jemnosti výpočetní sítě jsou znázorněny v tabulce níže.

Tab. 9 Tabulka jemnosti sledovaných výpočetních sítí

Velikost výpočetních buněk			Počet buněk řešeného matematického modelu
x [mm]	y [mm]	z [mm]	
100	100	100	16 000
50	50	50	128 000
40	40	40	250 000
30	30	30	583 737
25	25	25	1 024 000

Je sledována teplota plamene ve výšce 500 mm nad hladinou hořlavé kapaliny a mění se jednou horizontální souřadnicí. Se zjemňující se výpočetní sítí jsou lépe vypočteny fyzikální a chemické reakce.



Obr. 19 Graf výsledných teplot jednotlivých výpočetních sítí

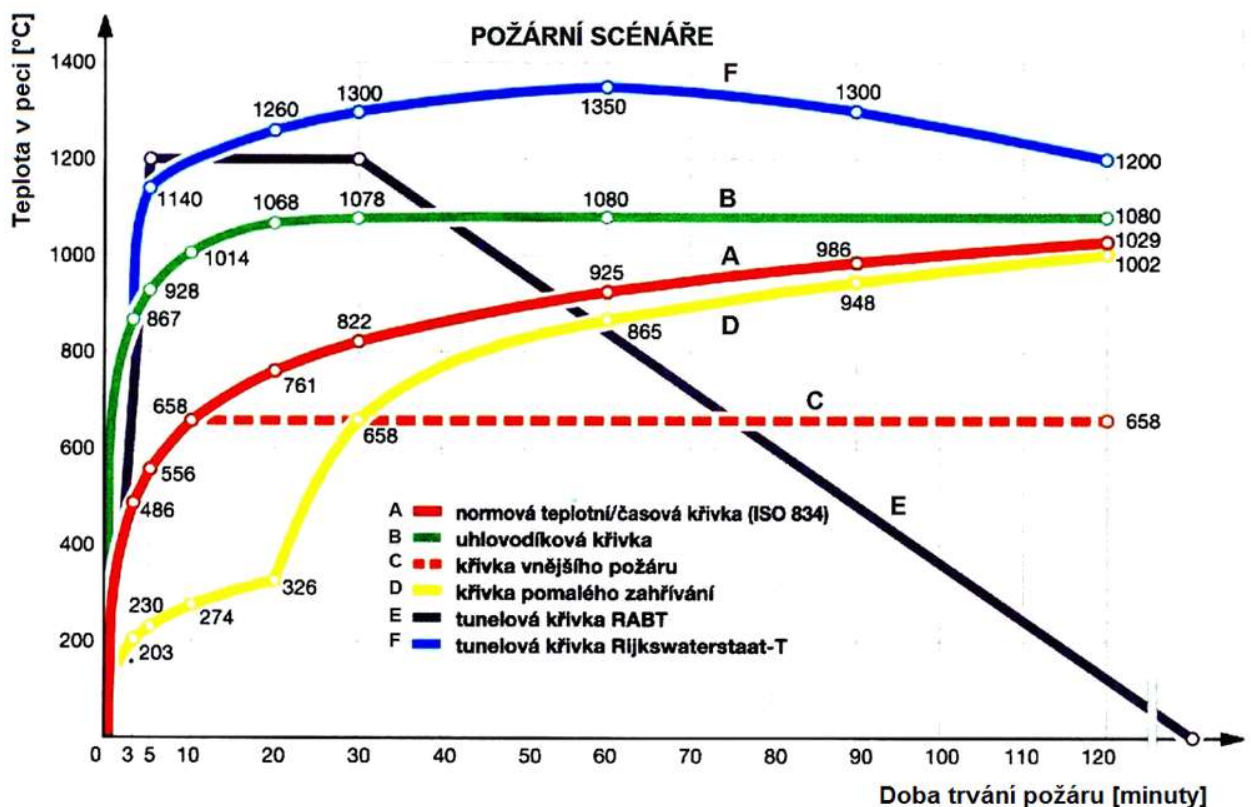
Zajímavým výsledkem z grafu výše je, že čím menší je velikost jednotlivých početních buněk tím je menší teplotní profil. To by mohlo být způsobeno detekcí a opravou chyb, v modelování v malém

měřítka, kterou program FDS disponuje. Spalování je v FDS potlačeno, pokud potenciální uvolňování tepla ze spalování není schopné zvýšit teplotu reakční směsi nad kritickou teplotu plamene [31].

### 3.3.5 Teplotní křivky

Základní teplotní křivky jsou pouze funkcemi času. Jedná se tedy o nejkonzervativnější popis průběhu požáru. Mezi přirozené modely požáru patří zjednodušené modely (parametrické teplotní křivky, lokální požáry) a zdokonalené modely.

Zjednodušené modely jsou založeny na specifických fyzikálních parametrech s omezenou oblastí použití. Při požáru v požárním úseku se předpokládá rovnoměrné rozdělení teploty jako funkce času, kde se teploty plynů mají stanovit na základě fyzikálních parametrů, které uvažují alespoň hustotu požárního zatížení a podmínky odvětrání. Při lokálních požárech se předpokládá nerovnoměrné rozdělení teploty, tzn., že celkové vzplanutí (flashover) požárního úseku je nepravděpodobné. Zdokonalené modely požáru mají uvažovat s vlastnostmi plynů, hmotnostní výměnou a energetickou výměnou.



Obr. 20 Graf používaných teplotních křivek, Převzato: [32]

### 3.3.6 Rychlost uvolňování tepla při hoření hořlavých kapalin

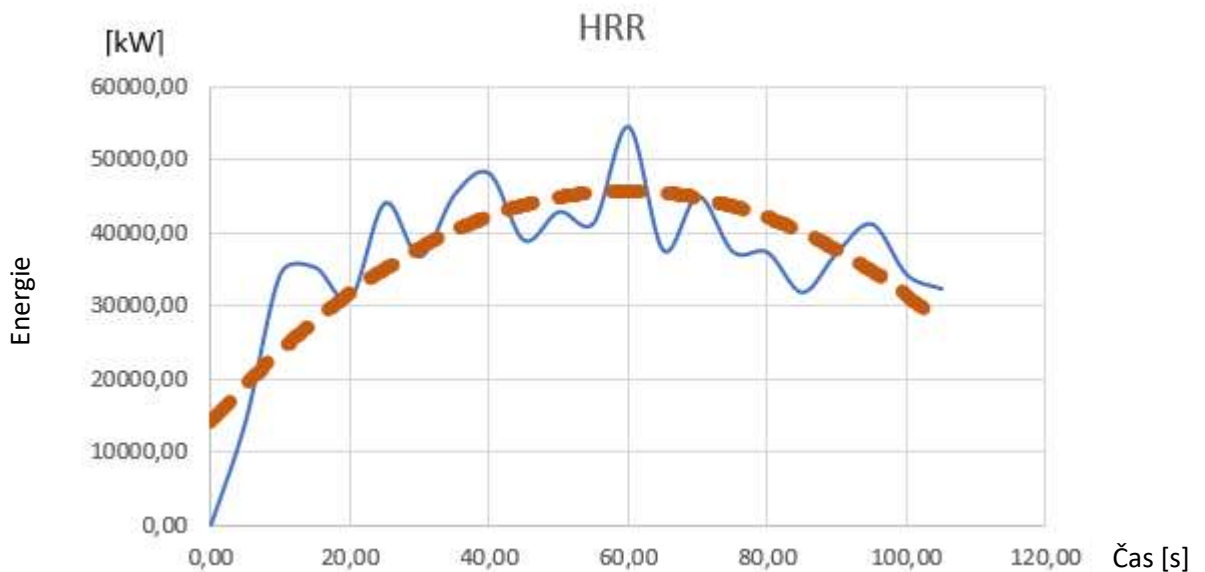
Jak již bylo zmíněno, každá hořlavá kapalina se chová při požáru odlišně, pro zjištění rychlosti uvolňování tepla bylo použito zjednodušené metody při využití rovnice:

$$Q = m'' * \Delta H_{c,eff} * (1 - e^{-k\beta * D}) * A_{pool} \quad (15)$$

kde:	$m''$	hmotnostní rychlost spalování	[kg/m <sup>2</sup> -sec]
	$\Delta H_{c,eff}$	spalné teplo látky	[kJ/kg]
	$k\beta$	empirická konstanta	[-]
	$A_{pool}$	plocha ohraničené hořlavé kapaliny	[m <sup>2</sup> ]

Při výpočtu požáru zjednodušenou metodou bylo vypočítáno, že maximální hodnota rychlosti uvolňování tepla pro heptan je  $Q_{hept} = 44\,156\text{ kW}$ , pro výpočet bylo uvažováno s hořením jímky 4x4 m a hloubkou heptanu 0,1 m, tedy 1600 l heptanu.

Pro porovnání se zjednodušenou metodou jsou výsledky matematického modelu v programu FDS. Výsledný graf interpretuje hodnoty při výpočtu v hrubé i jemné síti. Výsledné hodnoty byly proloženy polynomem třetího řádu pro lepší porovnání.

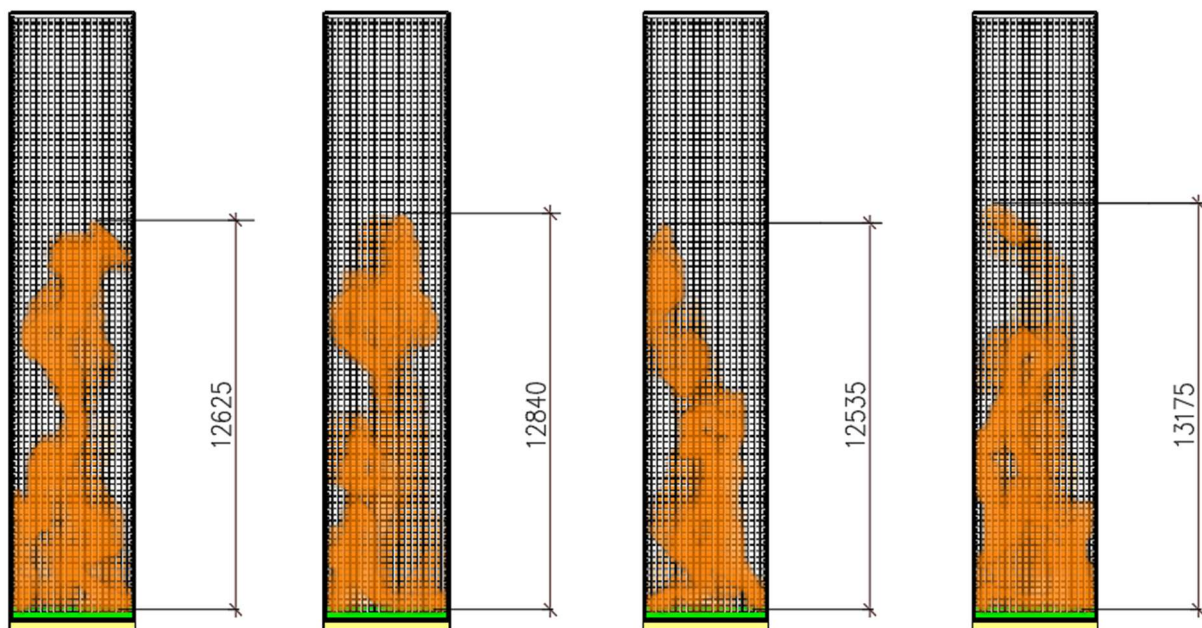


Obr. 21 Výsledný graf rychlosti uvolňování tepla, plná čára – výsledné hodnoty HRR z programu FDS, čárkovaná čára – proložení výsledných hodnot polynomem

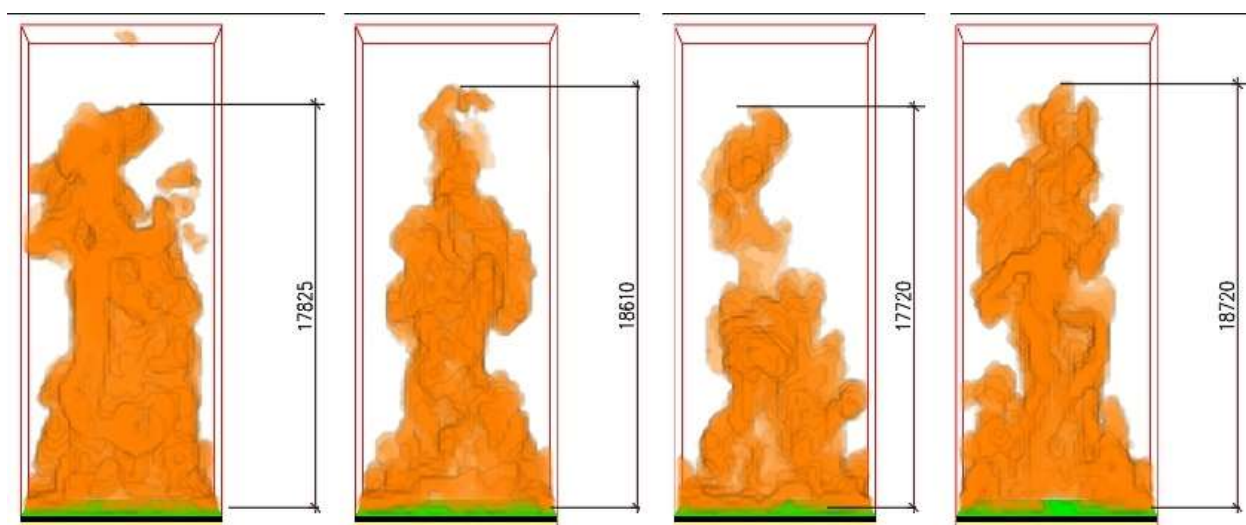
Výpočtem pomocí zjednodušené metody a přesným matematickým modelem bylo dosaženo velice dobré shody při výpočtu rychlosti uvolňování tepla. Vyskytují se pouze neshody s maximální hodnotou HRR. To je však způsobeno tím, že zjednodušená metoda zohledňuje pouze obecné principy hoření a reakce, kdežto experiment uvažuje reálné hoření při konkrétních podmínkách. Při výpočtu zjednodušenou metodou nevstupují do výpočtu materiálové charakteristiky ale pouze spalné teplo. Ostatní modely HRR zde nejsou popisovány, protože nejsou součástí diplomové práce.

### 3.3.7 Výška plamene plošného požáru – numerické řešení

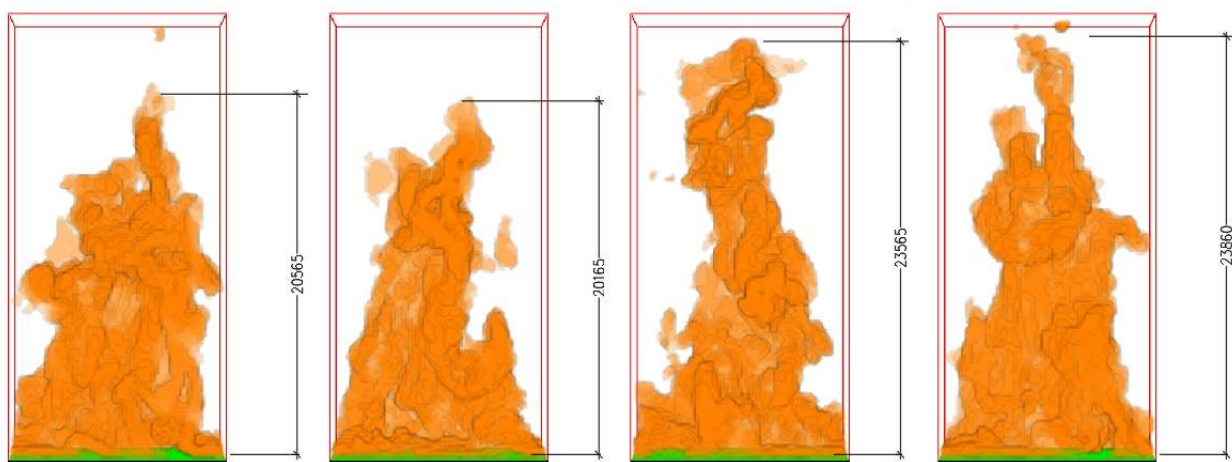
Výsledkem matematického modelu hoření plošného požáru je grafický výstup výšky plamene. Graficky je vyznačena maximální výška plamene.



Obr. 22 Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 4x4 m v čase  $t= 624$  s



Obr. 23 Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 8x4 m v čase  $t= 624$  s



Obr. 24 Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 12x4 m v čase  $t = 624$  s

### 3.4 Výsledné výšky plamene pomocí numerického řešení a porovnání s analytickým řešením

V tabulce níže je provedeno porovnání výsledných výšek plamenů pomocí matematického modelu a pomocí dvou metod využívaných v eurokódu.

Tab. 10 Porovnání výšky plamene při využití metody Heskestad, Thomas a při použití výpočtu pomocí matematického modelu

Plocha požáru	Výška plamene [m]				Průměrná výška plamene [m]	Heskestad [m]	Thomas [m]	Průměrná výška plamene obou metod [m]	Výška plamene dle normy [4] [m]
	12,63	12,84	12,54	13,18					
4x4 [m]	12,63	12,84	12,54	13,18	12,79	13,31	11,20	12,25	6,00
8x4 [m]	17,83	18,61	17,72	18,72	18,22	20,68	16,77	18,73	6,00
12x4 [m]	20,66	20,17	23,57	23,86	22,06	24,01	19,31	21,66	6,00

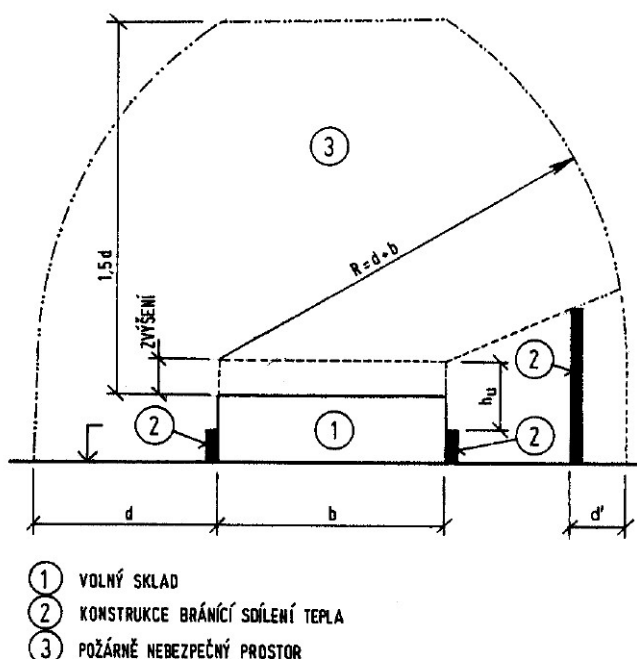
Při řešení podle českých norem by při tomto řešení byla využita norma ČSN 650201 a zároveň norma ČSN 730804, na kterou předchází norma odkazuje [5, 6]. Norma stanovuje, že při řešení požárně nebezpečného prostoru je výška plamene při vysoké hustotě tepelného toku rovna 6 m.

Je tedy zřejmé, že výška plamene řešením normovým přístupem není v některých případech ideální. Z databáze PTCH je zřejmé, že různé hořlavé kapaliny vykazují jiné požárně technické charakteristiky, a tudíž se chovají rozdílně při hoření. Zcela dramaticky se u různých typů hořlavých kapalin mění výška plamene při hoření.

## 4 Porovnání výsledků analýzy sálavého toku

### 4.1 Požárně nebezpečný prostor od ohraničených hořlavých kapalin

Jedná se o vzdálenosti představující oblast, ve které hrozí přenos požáru na sousední objekt, konstrukci či požární úsek. Vymezuje oblast na jejíž hranici je intenzita tepelného toku tak malá, že nemůže dojít k šíření požáru [1].



Obr. 25 Schéma požárně nebezpečného prostoru (řez) (převzato z ČSN 730804 [4])

Následující text se věnuje velikosti požárně nebezpečného prostoru při řešení pomocí různých metod.

### 4.2 Popis řešeného případu

Za účelem experimentálního výzkumu byl uvažován prostor, v němž se nachází ohraničená hořlavá kapalina. Velikost ohraničené hořlavé kapaliny byl různý a byly sledovány tři scénáře. Jedná se o tři různě velké ohraničené plochy hořlavé kapaliny. První případ byla jímka rozměrů 4x4 m, druhým případem jímka velikosti 8x4 m a třetím případem jímka o rozměrech 12x4 m.

U každého požárního scénáře byla sledována hustota tepelného sálavého toku, a tedy její kritická hodnota  $18,5 \text{ kW/m}^2$ . Zkoumána byla hlavně vzdálenost a tvar ohraničení touto kritickou hodnotou.

## **4.2.1 Řešení požárně nebezpečného prostoru pomocí různých teplotních křivek požáru**

Pro analýzu velikosti požárně nebezpečného prostoru jsou sledovány tři typy křivek požáru, a to tedy Normová teplotní křivka, Uhlovodíková teplotní křivka a Křivka vnějšího požáru. Normová křivka je sledována z důvodu své univerzality, Uhlovodíková teplotní křivka by se měla používat pro hoření hořlavých kapalin a Křivka vnějšího požáru je sledována z důvodu hoření ve venkovním prostředí.

Pro výpočet odstupové vzdálenosti je použit program VOV [33]. Jedná se o výpočetní program pro velikost odstupových vzdáleností, jehož hlavním benefitem je pro mě možnost určení, dle jaké křivky požáru mají být odstupové vzdálenosti vypočteny.

### **4.2.1.1 Normová teplotní křivka**

Při řešení případů pomocí normové teplotní křivky je vytvořeno grafické porovnání velikostí odstupových vzdáleností pro tři požární scénáře. Grafické výstupy jsou znázorněny v Příloze 3.

### **4.2.1.2 Uhlovodíková teplotní křivka**

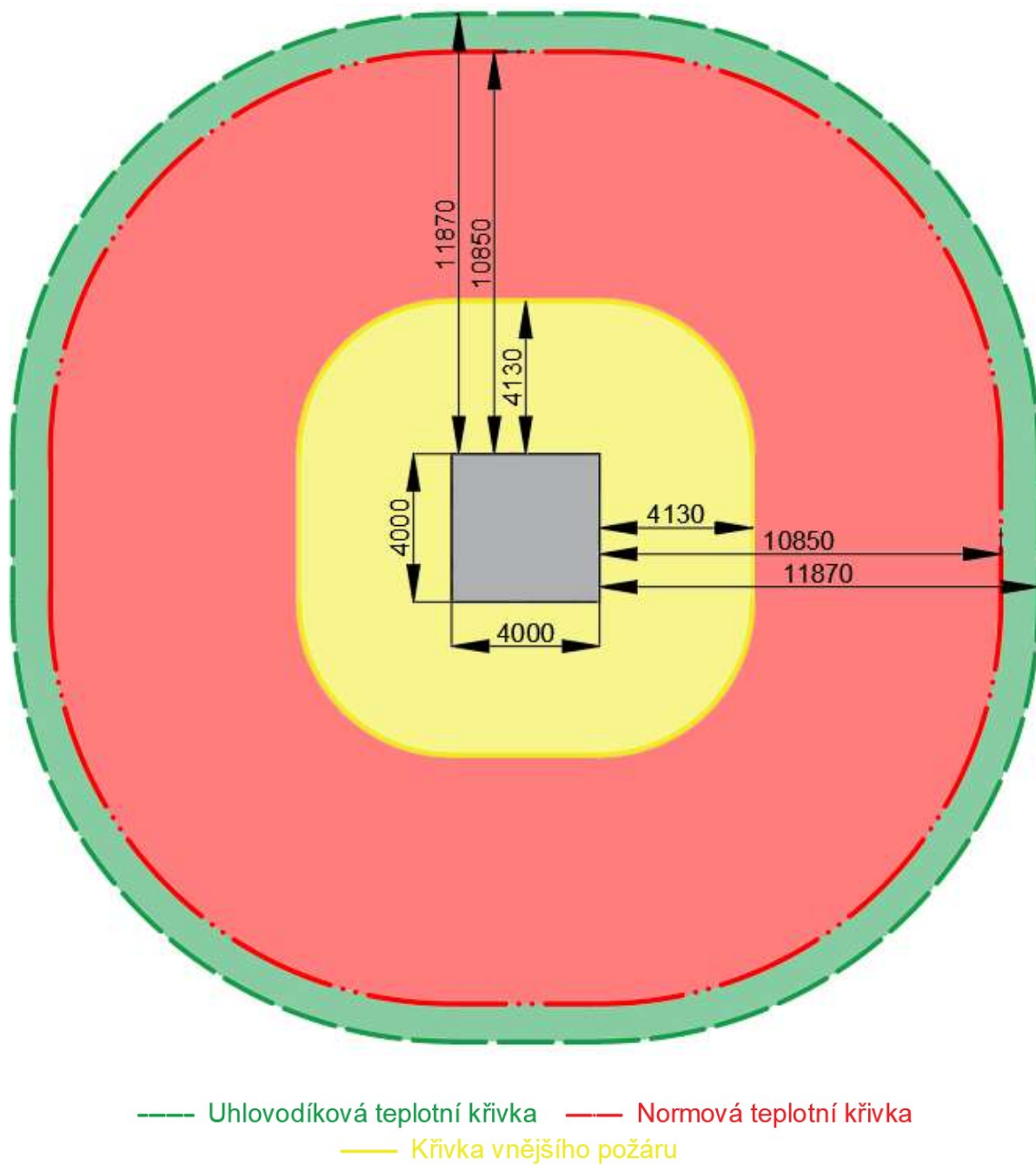
Při řešení případů pomocí uhlovodíkové teplotní křivky je vytvořeno grafické porovnání velikostí odstupových vzdáleností pro tři požární scénáře. Jednotlivé grafické výstupy jsou znázorněny v Příloze 4.

### **4.2.1.3 Křivka vnějšího požáru**

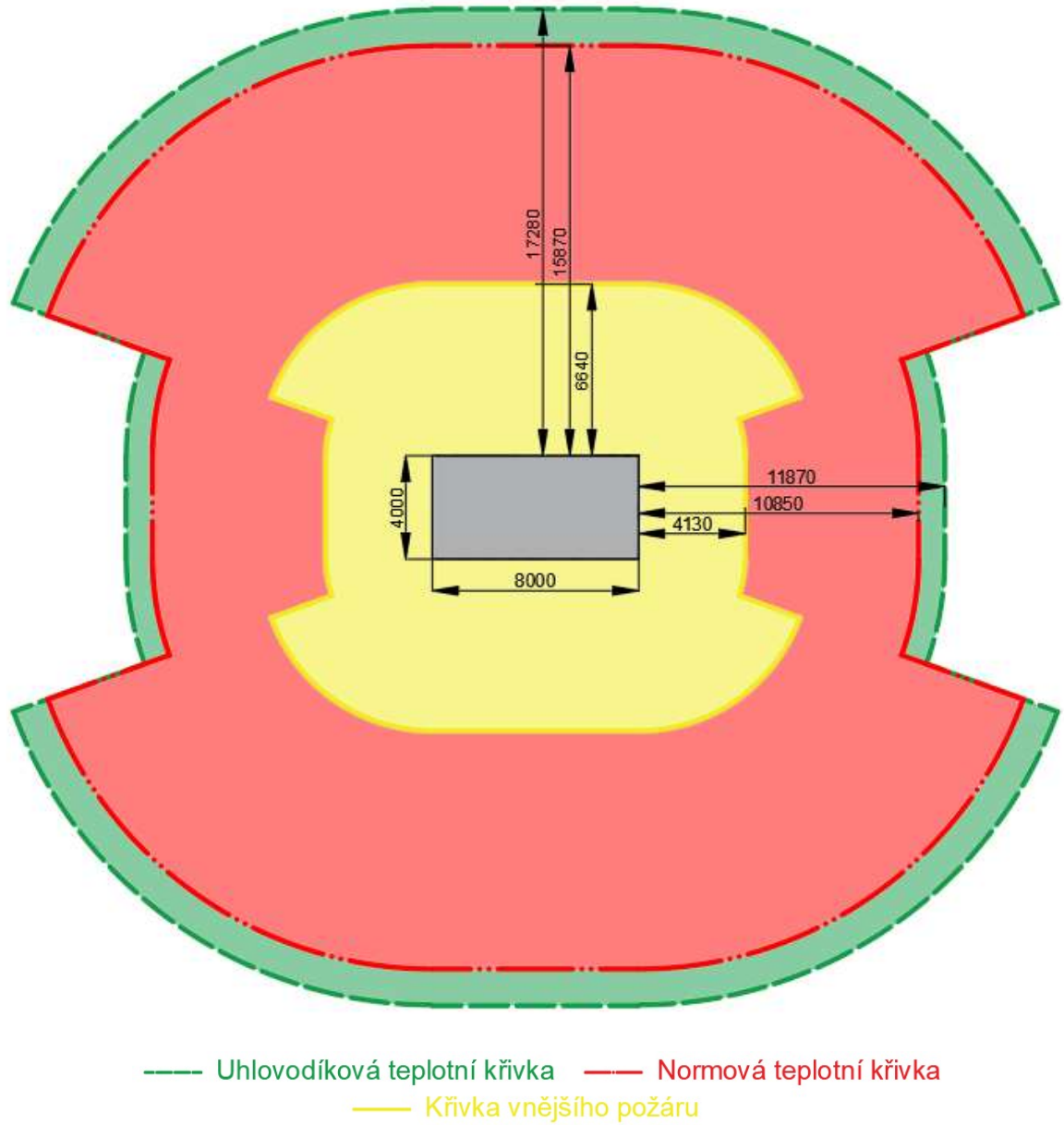
Při řešení případů pomocí křivky vnějšího požáru je vytvořeno grafické porovnání velikostí odstupových vzdáleností pro tři požární scénáře. Jednotlivé grafické výstupy jsou znázorněny v Příloze 5.



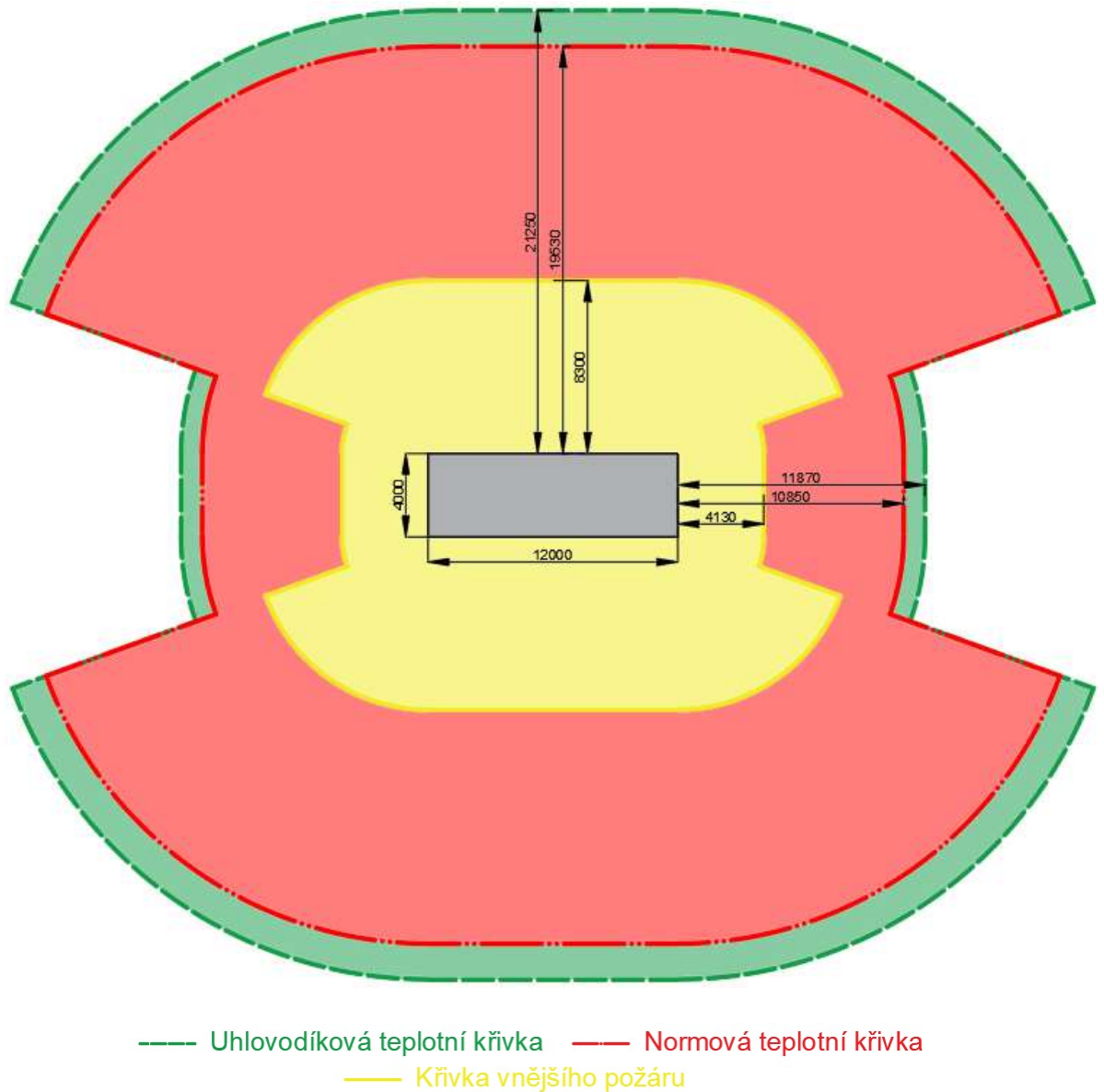
#### 4.2.2 Grafické porovnání řešených odstupů dle teplotních křivek



Obr. 26 Schéma porovnání velikosti odstupů dle teplotních křivek – požár 4x4 m



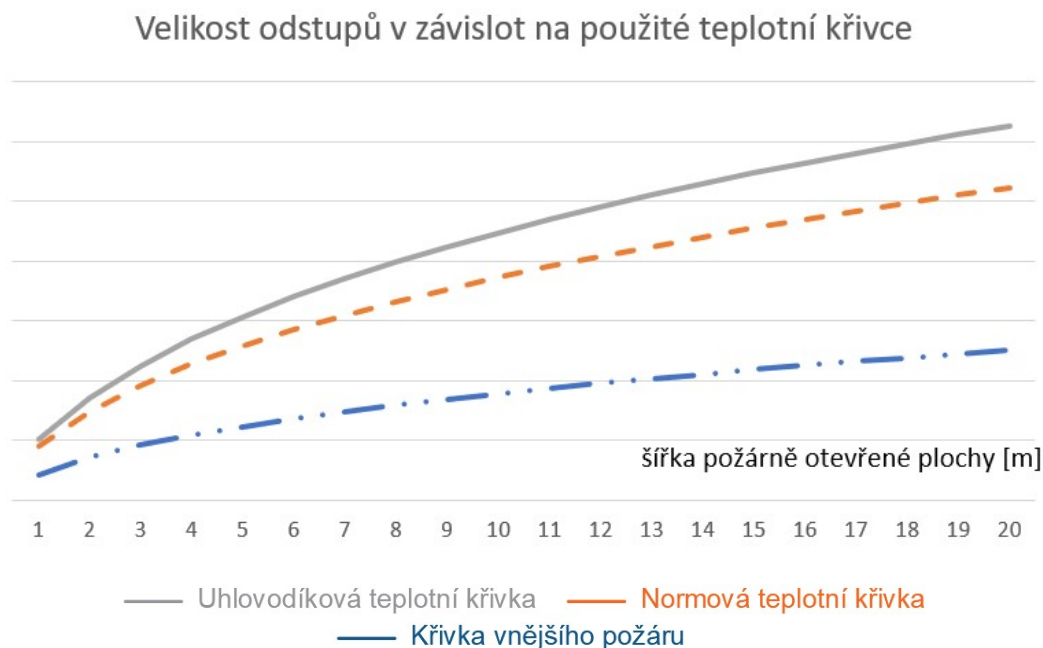
Obr. 27 Schéma porovnání velikosti odstupu dle teplotních křivek – požár 8x4 m



Obr. 28 Schéma porovnání velikosti odstupů dle teplotních křivek – požár 12x4 m

V porovnání výše můžete vidět, jak se liší u jednotlivých teplotních křivek odstupové vzdálenosti.

Normová teplotní křivka vykazuje podobné velikosti odstupových vzdáleností jako při řešení dle uhlovodíkové teplotní křivky.



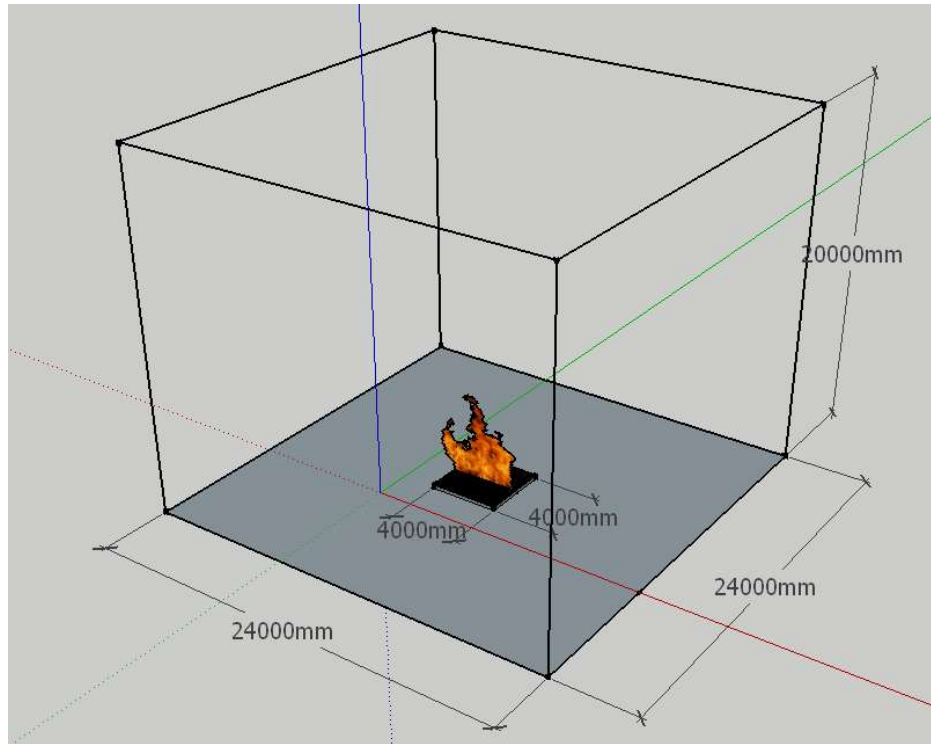
Obr. 29 Graf rozdílů velikosti odstupů vůči použité teplotní křivce při konstantní výšce plamene 6 m

Z grafu je jasné, že se zvětšující se šířkou požárně otevřené plochy se zvětšuje odstupová vzdálenost, avšak při zvětšení šířky požárně otevřené plochy dojde ke zvětšení plochy, na které dochází k odhořívání. Již v předchozí kapitole je probrána změna výšky plamene v rámci zvětšování plochy odhořívání. Z logického pohledu by tedy bylo příhodné, aby se zvětšující šířkou požárně otevřené plochy zvětšovala i výška požárně otevřené plochy. S tímto řešením normo neuvažuje, a to vidím jako velký nedostatek.

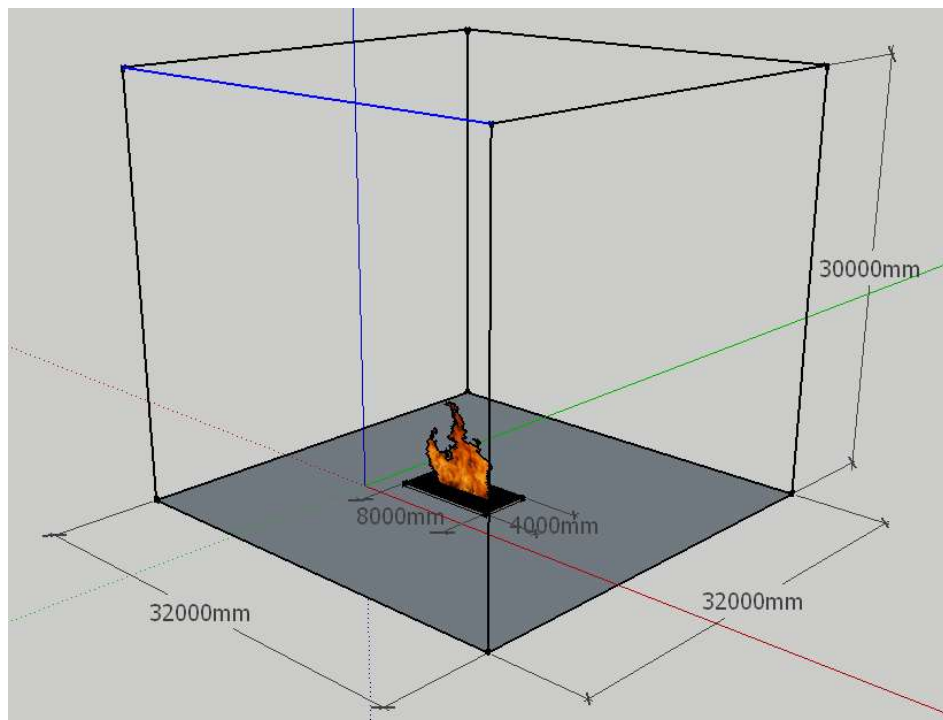
### 4.3 Výpočetní matematický model

Pro matematický model byly využity tři požární scénáře viz. 3.2.1. Avšak nyní bylo sledováno chování sálavého toku v okolí požáru, tudíž ve výpočtu byl zahrnut i prostor přiléhající okolo jímky.

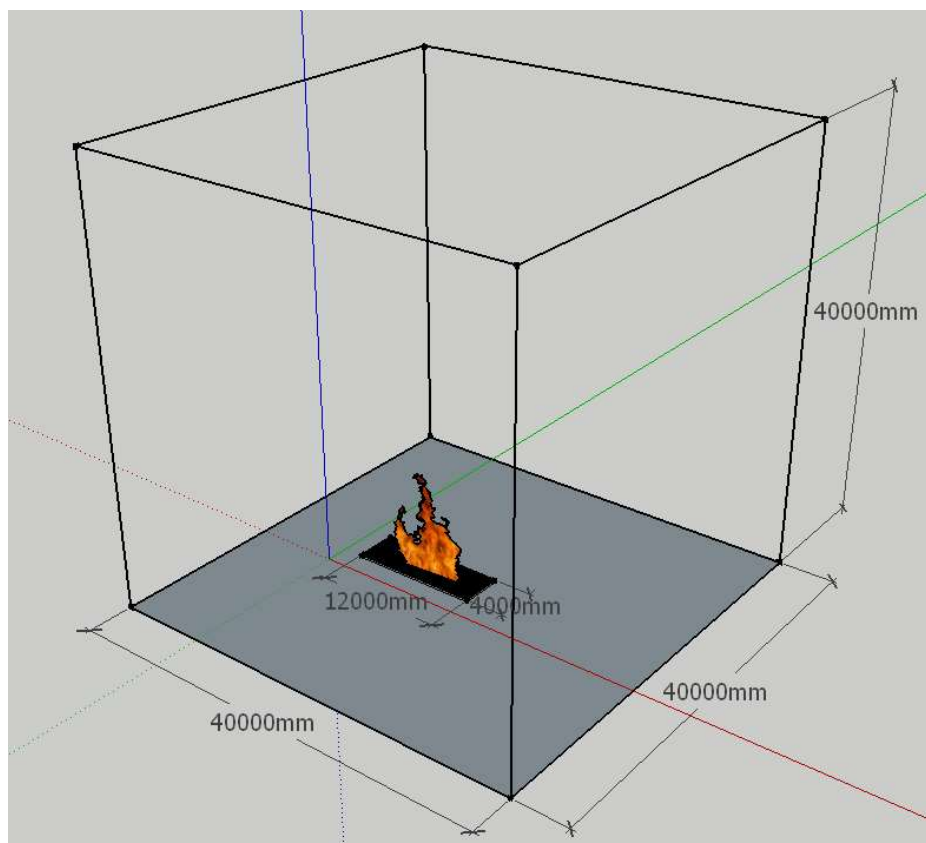
### 4.3.1 Požární scénáře



Obr. 30 Požární scénář s jímkou o rozměrech 4x4 m



Obr. 31 Požární scénář s jímkou o rozměrech 8x4 m



Obr. 32 Požární scénář s jímkou o rozměrech 12x4 m

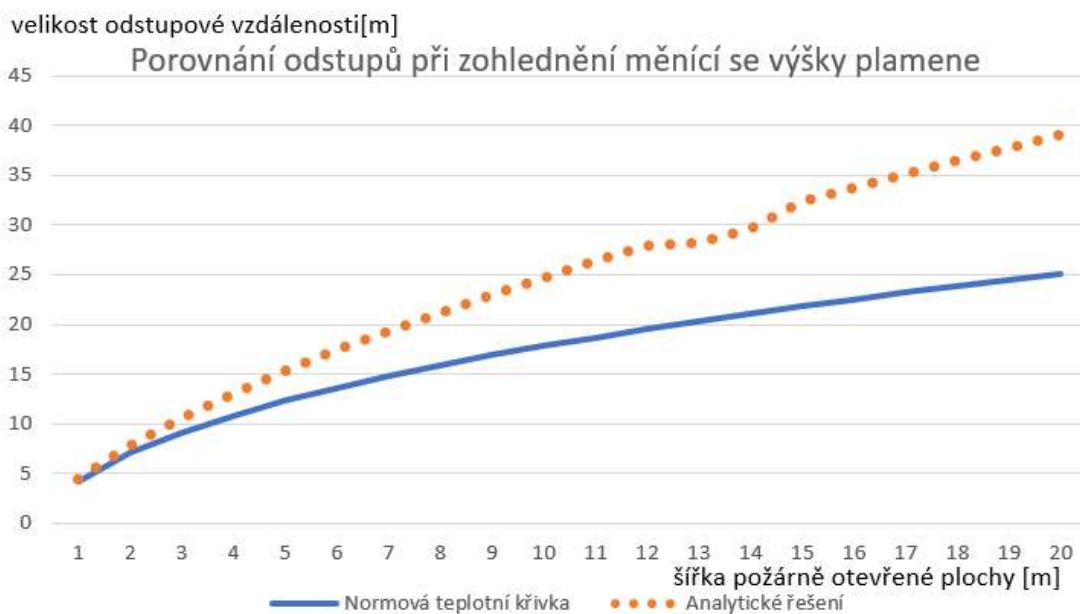
### 4.3.2 Výpočetní síť

Pro tři různé požární scénáře byly vytvořeny tři výpočetní sítě. Výpočetní síť u prvního požárního scénáře obsahuje 1 440 000 buněk. Výpočetní síť u druhého požárního scénáře obsahuje 3 840 000 buněk a výpočetní síť u třetího požárního scénáře obsahuje 8 000 000 buněk.

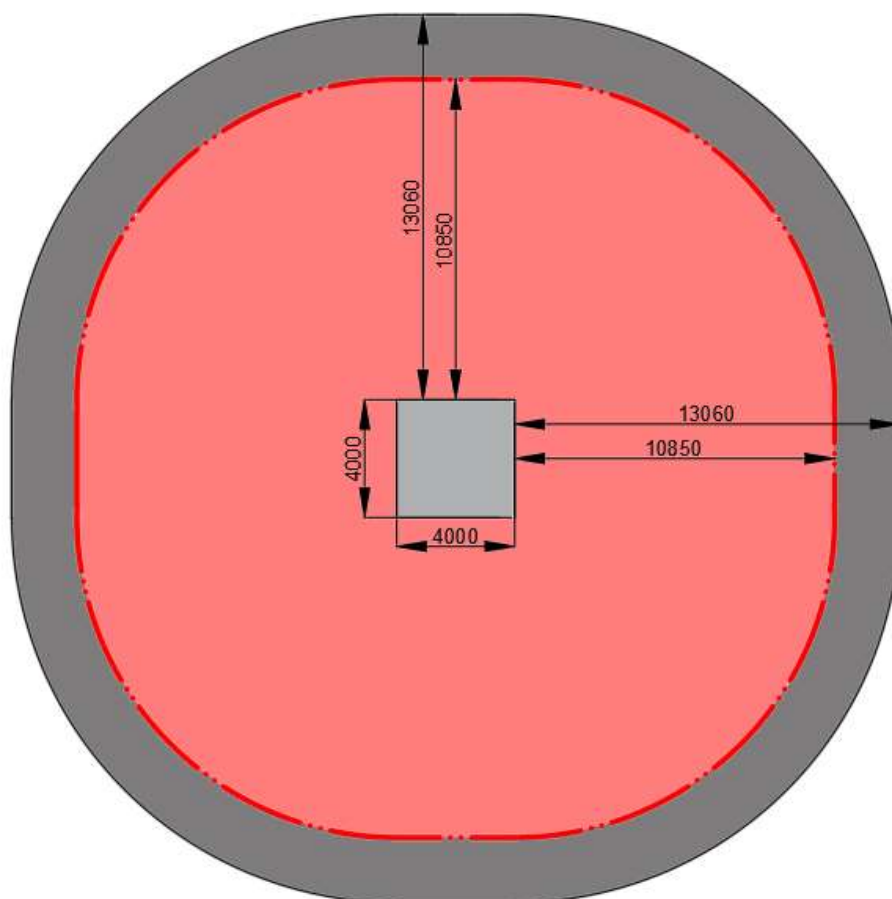
Všechny výpočetní sítě mají rozměry jedné výpočetní buňky 200 x 200 x 200 mm.

#### 4.3.2.1 Porovnání výstupu analytického řešení s normovým přístupem

Porovnání uvažuje případ, kdy se pomocí analytického výpočtu metodou Thomas vypočte výška plamene při změně velikosti nádrže, na které odhořívá hořlavá kapalná látka a výsledná výška plamene se uvažuje v dalším výpočtu velikosti odstupu. Je to tedy rozdílné řešení oproti normovému, kdy se uvažuje neměnná výška plamene a pouze se liší šířka sálavé plochy. Dostávám se k mnohem většímu odstupovému vzdálenostem. Vzhledem k tomu, že se dostávám k větším odstupovým vzdálenostem vzniká okolo plochy, kde odhořívá hořlavá kapaliny, větší požárně nebezpečný prostor.



Obr. 33 Graf vlivu zohlednění proměnlivé výšky plamene pomocí výpočtu analytickým modelem (Thomas) vůči šířce požárně otevřené plochy

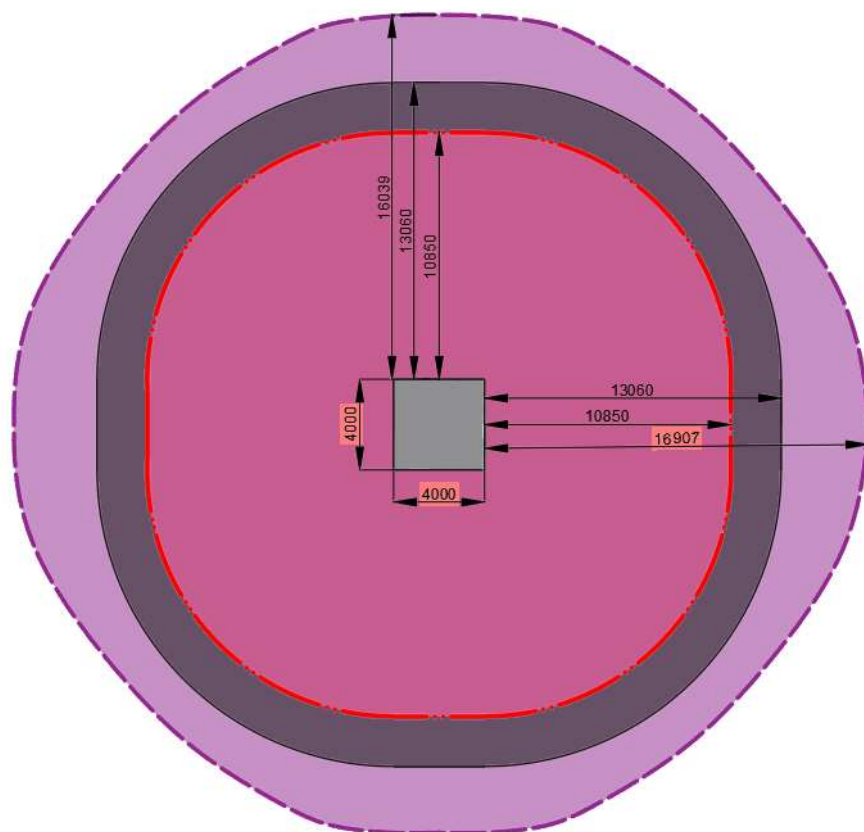


— Analytické řešení s proměnlivou výškou plamene — Normová teplotní křivka

Obr. 34 Schéma rozdílu velikosti odstupové vzdálenosti při zohlednění stanované výšky plamene dle výpočtového modelu Thomas

Analytickým řešením je myšlen výpočet výšky plamene podle výpočetní metody Thomas a následně vypočten odstup programem VOV s vložení výšky plamene stanovenou metodou Thomas.

Pokud porovnáme matematický model s normovým řešením a s numerickým řešením, výsledek je následující.

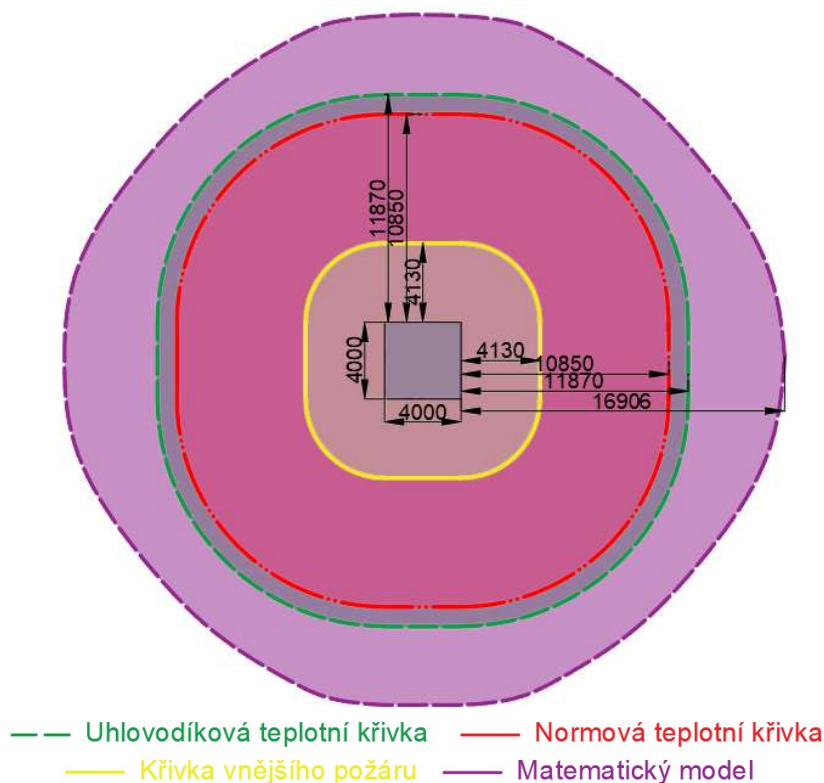


— Numerické řešení s proměnlivou výškou plamene — Normová teplotní křivka  
 ---- Velikost odstupů podle matematického modelu

Obr. 35 Schéma porovnání velikostí odstupů s matematickým modelem pro požár jímky o rozměrech 4x4 m

Při výpočtu pomocí matematického modelu v programu FDS je odstupová vzdálenost oproti normovému a numerickému řešení větší. Je však řešen půdorysný průmět největší plochy s kritickým sálavým tokem. Vzhledem k tomu, že hustota sálavého toku netvoří válcový tvar je nutné sledovat i tvar požárně nebezpečného prostoru v řezové rovině. Celkový tvar požárně nebezpečného prostoru se může lišit v ohledu na typ hořlavé kapaliny, jak jsem již popisoval výše, závisí na požárně technických charakteristikách dané kapaliny a také na rozměrech ohraničené plochy, na které probíhá odhořívání hořlavé kapaliny.



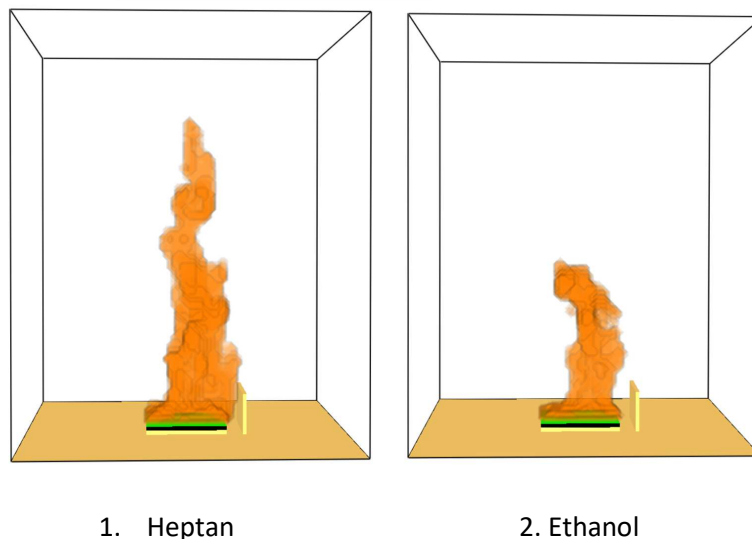


Obr. 36 Schéma porovnání velikosti odstupu při využití normových křivek požáru a matematického modelu

#### 4.4 Řešení požárně nebezpečného prostoru v řezové rovině – matematický model

Normový přístup neřeší závislost velikosti ohraničené plochy, na které dochází k odhořívání a výšce plamene, přitom je zcela očividné, že velikost plochy, na které může dojít k hoření hraje důležitou roli při určování výšky plamene.

Avšak velikost plochy, na které může odhořívát hořlavá kapaliny nemá větší vliv než požárně technické charakteristiky kapaliny, která je použita k hoření. Výška plamene se může lišit až osminásobně v závislosti na požárně technických charakteristikách dané hořlavé kapaliny. Je tedy zřejmé, že typ hořlavé kapaliny a s tím spojená výška plamene bude rozhodovat o velikosti a tvaru odstupové vzdálenosti.

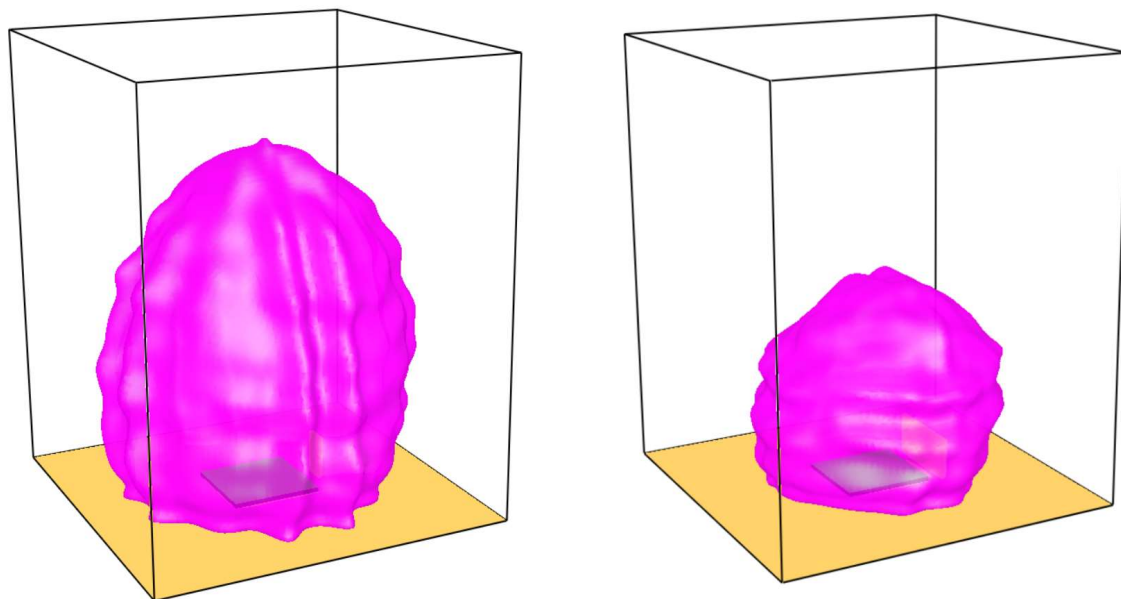


Obr. 37 Schéma vlivu velikosti plamene na použité hořlavé kapalině

V Obr. 38 je znázorněn rozdíl výšky plamene při matematické simulaci hoření heptanu a ethanolu. Při hoření heptanu výška plamene dosáhla maximální hodnoty 15,76 m. U hoření ethanolu dosahovala maximální výška plamene 6,82 m.

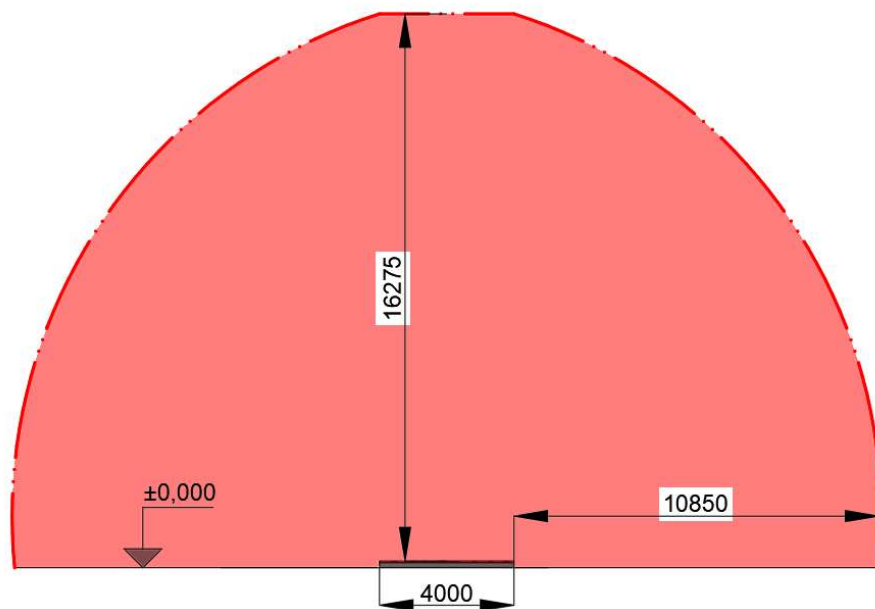
Pokud ve stejném matematickém modelu budu řešit požárně nebezpečný prostor u modelu s hořením ethanolu, a tedy menší výškou plamene bude požárně nebezpečný prostor menší, než u modelu hoření heptanu budou výsledné velice odlišné a požárně nebezpečný prostor u hoření ethanolu bude mnohem menší než při hoření heptanu, který dosahuje vyšší hodnot výšky plamene.

Tento rozdíl vzniká hlavně díky rozdílné hmotnostní rychlosti spalování a také díky odlišným hodnotám spalného tepla, v podstatě ethanol odhořívá pomaleji a nevzniká tolik energie jako při spalování heptanu.

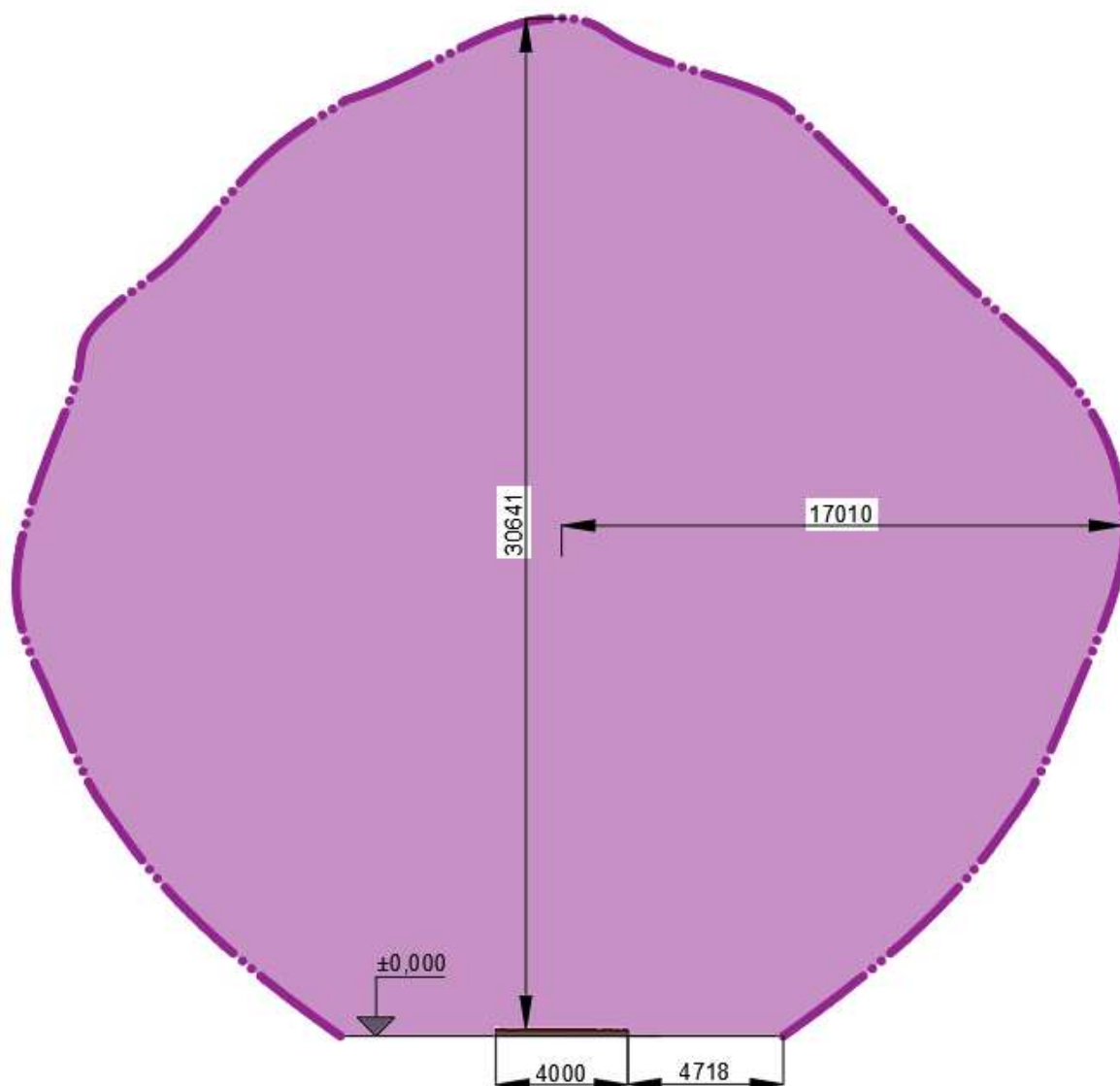


Obr. 38 Schéma porovnání požárně nebezpečného prostoru při hoření heptanu (vlevo) a ethanolu (vpravo) v čase  $t = 450$  s

Pro porovnání a zřejmé rozdíly jsem graficky vyhodnotil tři různé případy velikosti jímky, ve které dochází k odhořívání hořlavé kapaliny.

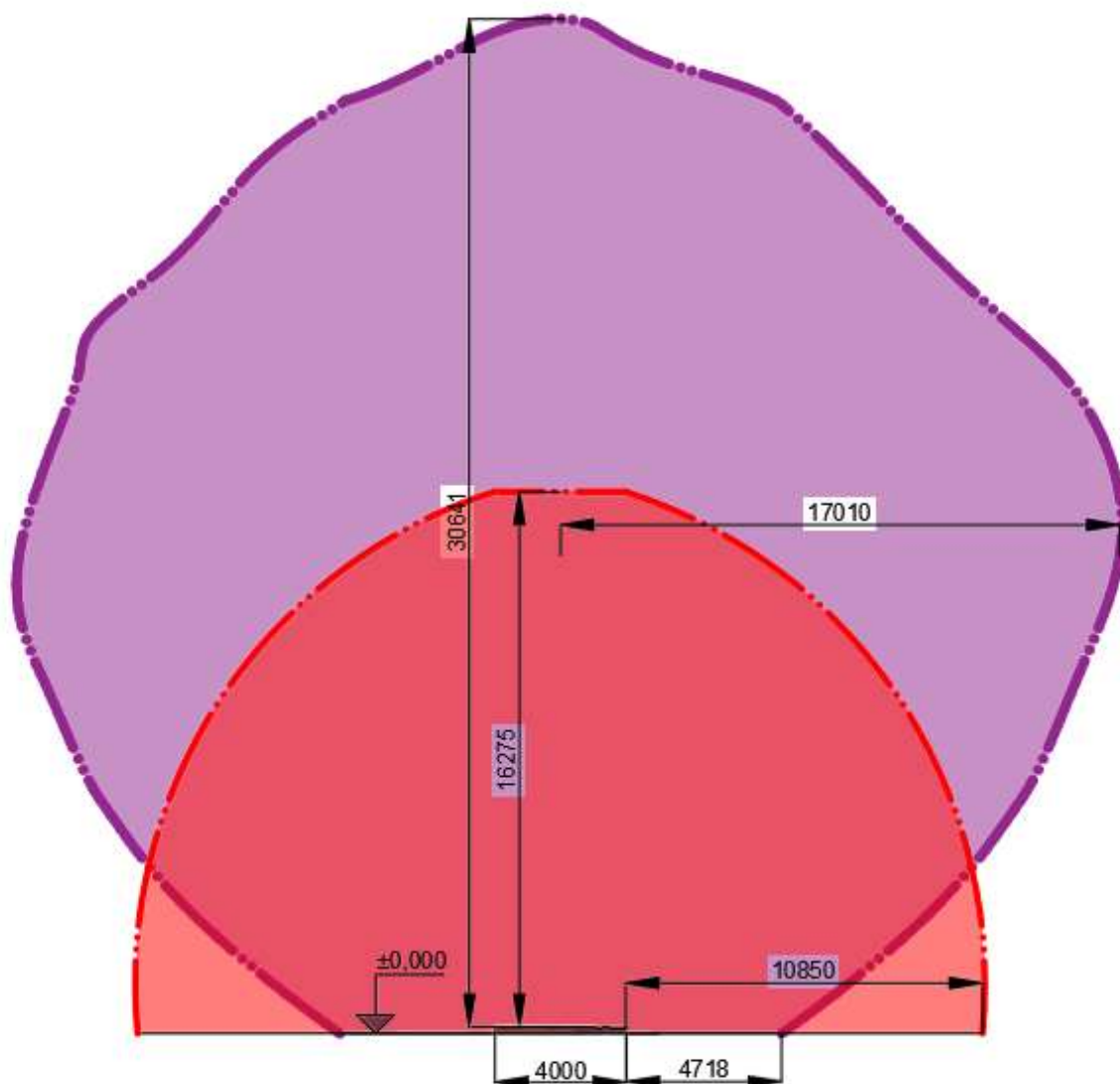


Obr. 39 Schéma požárně nebezpečného prostoru v řezu při normovém řešení pro požár velikosti 4x4 m



Obr. 40 Schéma požárně nebezpečného prostoru v řezu při výpočtu pomocí matematického modelu hoření pro požár velikosti 4x4 m

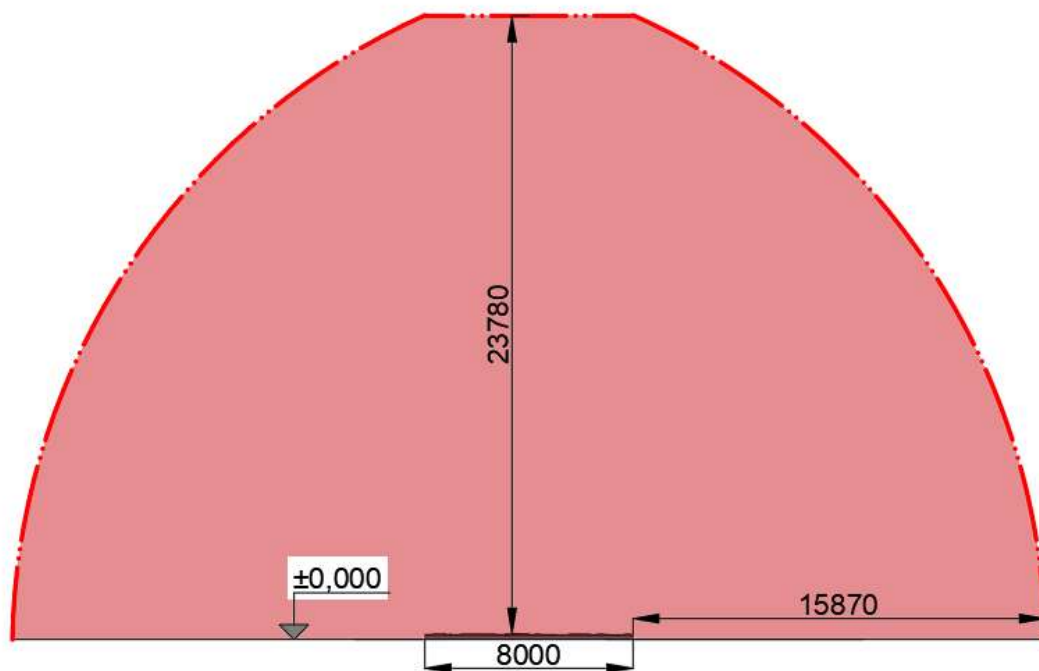
Jak jde vidět ze schémat požárně nebezpečný prostor výpočtem pomocí matematického modelu je mnohem větším než při řešení normovým přístupem. Avšak na schématech je vidět, že normový přístup uvažuje požárně nebezpečný prostor víceméně půlkruhového tvaru, kdežto výsledky z matematického modelu tvoří odlišný tvar.



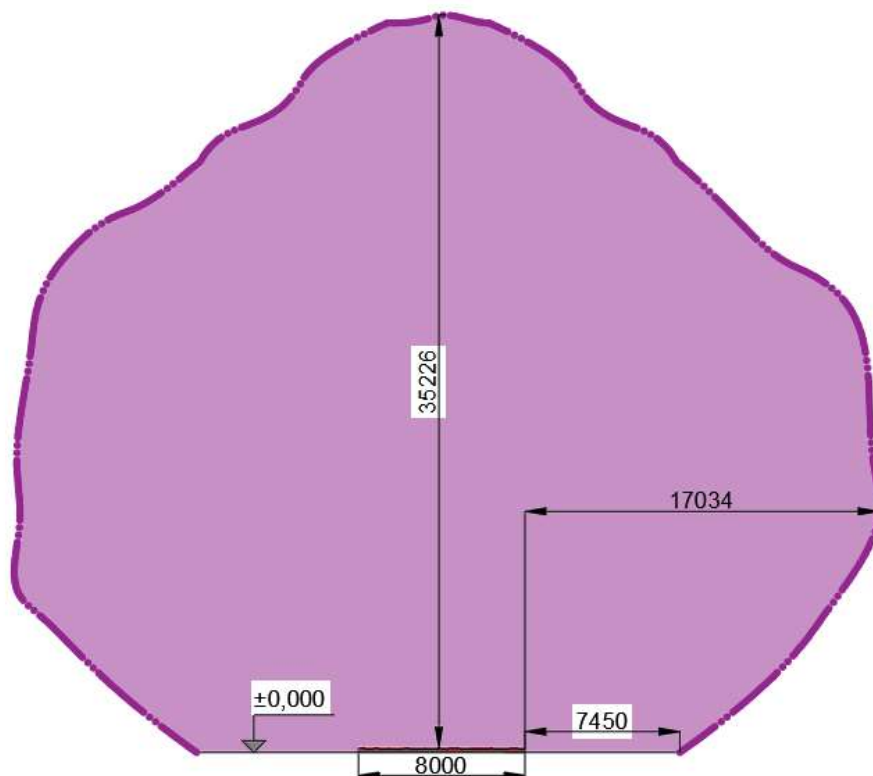
- Normová teplotní křivka
- Velikost odstupu podle matematického modelu

Obr. 41 Schéma porovnání velikosti a tvaru požárně nebezpečného prostoru pro hoření jímky o rozměrech 4x4 m

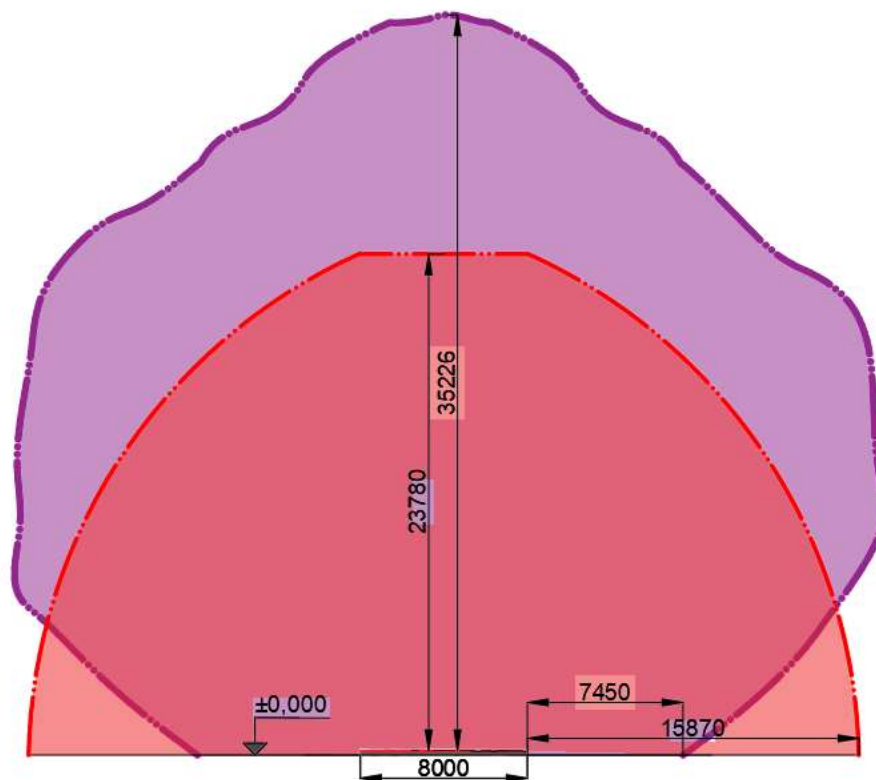
Dále je řešeno, jak se velikost mění při řešení situace s větší jímkou s hořlavou kapalinou.



Obr. 42 Schéma požárně nebezpečného prostoru při řešení jímky o rozměrech 8x4 m dle normového přístupu



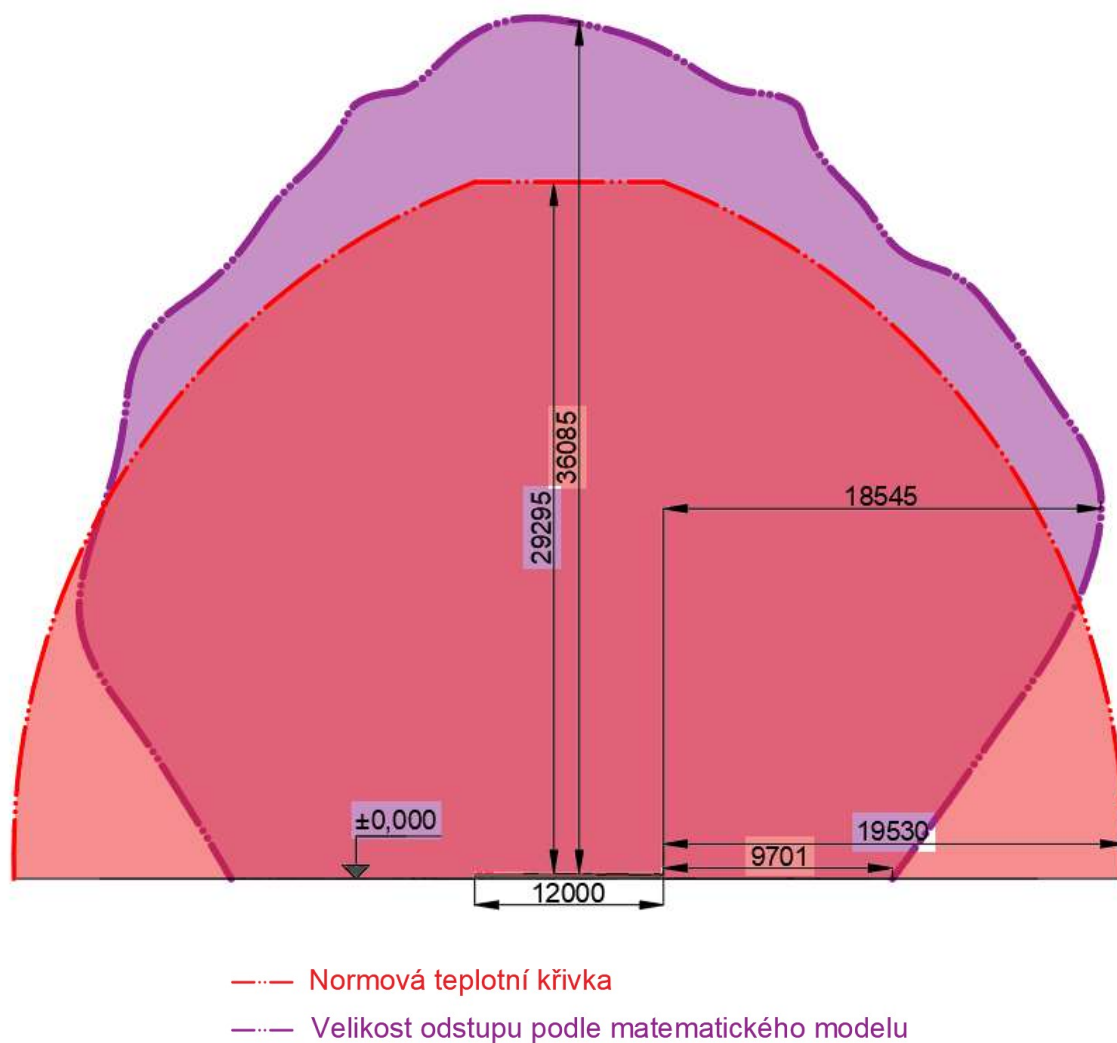
Obr. 43 Schéma výsledku velikosti požárně nebezpečného prostoru při hoření jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 8x4 m při využití matematického modelu



- Normová teplotní křivka
- Velikost odstupu podle matematického modelu

Obr. 44 Schéma porovnání požárně nebezpečných prostorů řešených dle normového přístupu a výpočtem pomocí matematického modelu

Z porovnání v obrázku je zřetelné, že půdorysná vzdálenost požárně nebezpečného prostoru od hrany jímky se přibližuje vzdálenosti z matematického modelu. Při uvažování, že se při zvětšování jímky zvětšuje výška plamene se zároveň zvětšuje velikost požárně nebezpečného prostoru, zejména ve vertikálním směru, v horizontálním směru se velikost odstupu taktéž zvětšuje, avšak ne tak razantně, logicky plamen hoří vzhůru, a tudíž bude větší složka sálavého tepla vyzařovat ve směru plamene.

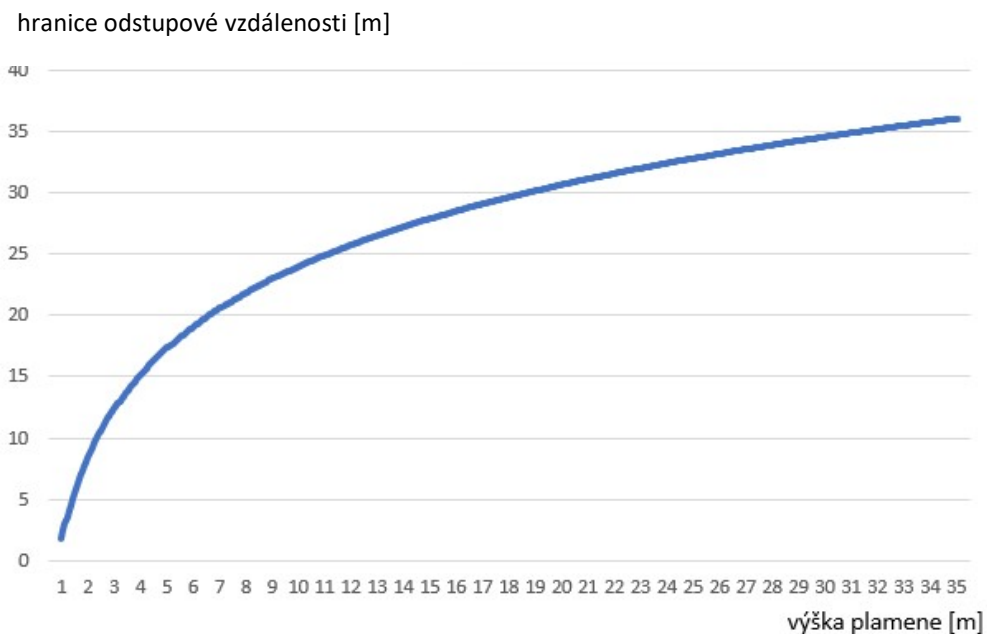


Obr. 45 Schéma porovnání velikosti odstupu pro hoření jímky velikosti 12x4 m

#### 4.4.1 Vliv velikosti plamene na velikost požárně nebezpečného prostoru

Jak jsem již zmiňoval, velikost plamene ovlivňuje velikost požárně nebezpečného prostoru. Byly provedeny výpočty měnící se velikosti jímky hoření s hořlavou kapalinou pro zjištění vzájemného vlivu. Pro vytvoření závislosti byly vypočteny simulace pro měnící se velikost plochy jímky od 1 m<sup>2</sup> až po plochu velikosti 35 m<sup>2</sup>.





Obr. 46 Graf závislosti výšky plamene a svislé vzdálenosti odstupů od hladiny hořlavé kapaliny

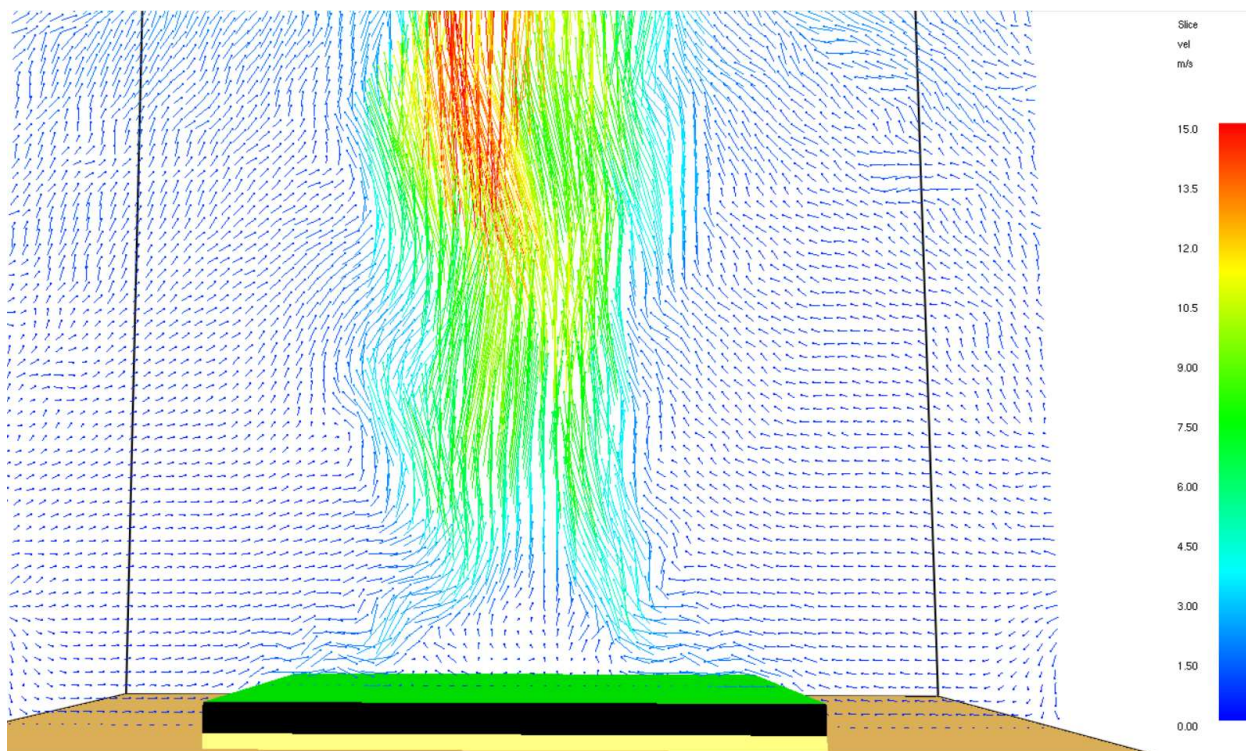
Z výsledných hodnot byla vyvozena závislost mezi jednotlivými hodnotami, odpovídá rovnici:

$$H_{PNP} = 9,6145 * \ln(H_f) + 1,8356 \quad (16)$$

kde:  $H_{PNP}$  vertikální vzdálenosti odstupů [m]

$H_f$  výška plamene [m]

Výše uvedený vztah byl vyvozen z vypočtených hodnot z matematických modelů, vztah je platný pro hoření heptanu. Vztah je pro odhořívání na ploše od 1 m<sup>2</sup> do plochy 35 m<sup>2</sup>. Dle grafu závislosti je jasně vidět, že velký vliv na velikost odstupů mají plošné požáry na menších plochách, kde se výrazně mění výška plamene, a kde dochází k většímu promíchání vzduchu s hořlavými výparů a je podpořeno hoření.

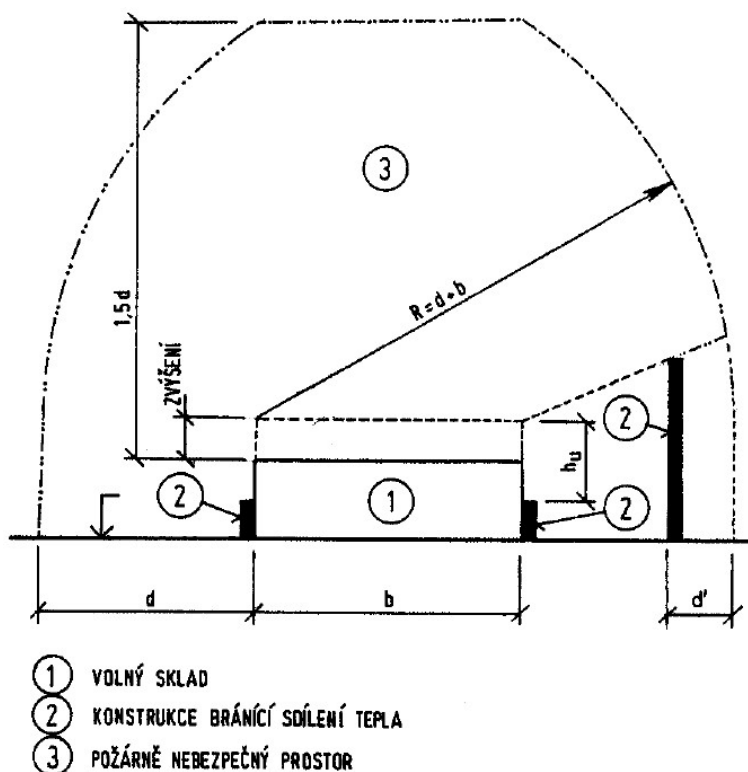


Obr. 47 Znáznornění chování okolního vzduchu při hoření hořlavé kapalné látky  $t=340$  s

S postupně se zvětšující se plochou plošného požáru se zvětšuje i výška plamene, avšak pro extrémně velké plošné požáry už v okolí požáru není dostatek vzduchu pro mísení s hořlavými parami a podpoření hoření.

#### 4.5 Řešení požárně nebezpečného prostoru při využití clonící stěny

V případě, kdy se v blízkosti ohraničené plochy hořlavé kapaliny, na které může vzniknout požár nachází sousední objekt, který chceme chránit před účinky tepelného sálavého toku a zamezit tak šíření požáru. Pro tento účel je možné vytvořit takzvanou clonící stěnu, která bude omezovat tepelný sálavý tok. Pro obecný popis lze říci, že se jedná o konstrukci bránící sdílení tepla.



Obr. 48 Schéma použití konstrukce bránící sdílení tepla dle norem, Převzato: [5]

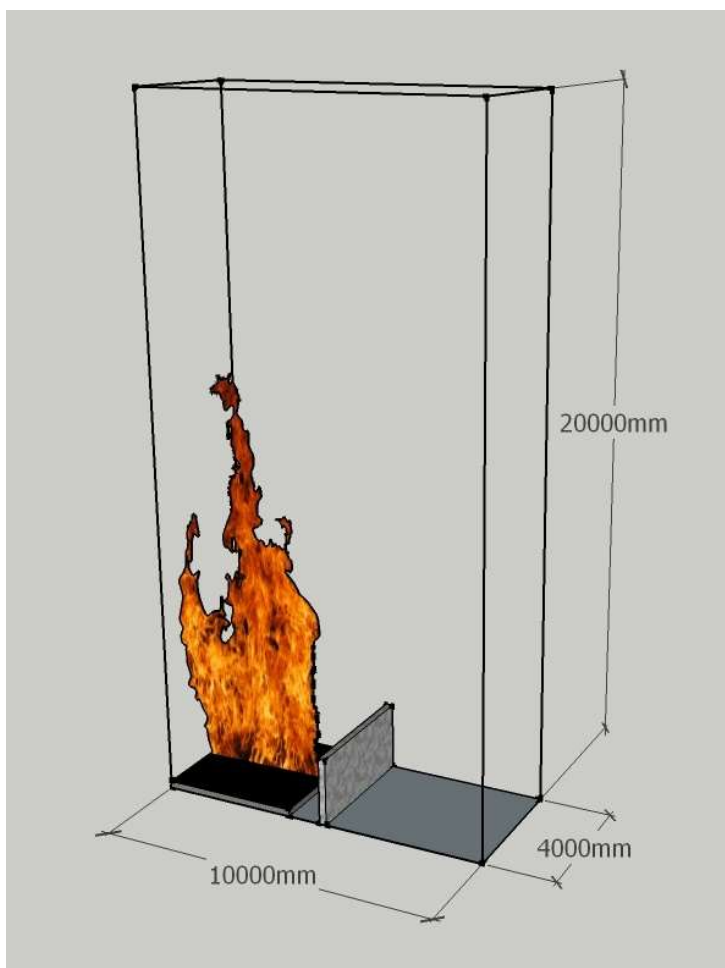
Pro podrobnější analýzu byly řešeny případy s měnící se výškou clonící stěny. Byla pozorována změna velikosti požárně nebezpečného prostoru, a tedy hranici sálavého toku o hodnotě  $18,5 \text{ kW/m}^2$ . Hraniční oblast byla vykreslena a následně parametricky porovnána a byla zjištěna závislost velikosti požárně nebezpečného prostoru vůči výšce clonící stěny. Velikost požárně nebezpečného prostoru byla měřena v nejhorsším místě, a tedy v místě, kde požárně nebezpečný prostor vystupoval nejdále za clonící stěnu.

## 4.6 Popis řešeného případu

Za účelem výzkumu byl uvažován prostor, v němž se nachází hořlavá kapalina na ohraničené ploše a clonící stěna. Velikost plochy ohraničené hořlavé kapaliny byl totožný pro všechny výpočty, avšak byla proměnlivá výška clonící stěny.

Pro podrobnější analýzu byly řešeny případy s měnící se výškou clonící stěny. Byla pozorována změna velikosti požárně nebezpečného prostoru, a tedy hranici sálavého toku o hodnotě  $18,5 \text{ kW/m}^2$ . Hraniční oblast byla vykreslena a následně parametricky porovnána a byla zjištěna závislost velikosti požárně nebezpečného prostoru vůči výšce clonící stěny. Velikost požárně nebezpečného prostoru byla

měřena v nejhorším místě, a tedy v místě, kde požárně nebezpečný prostor vystupoval nejdále za clonící stěnu.

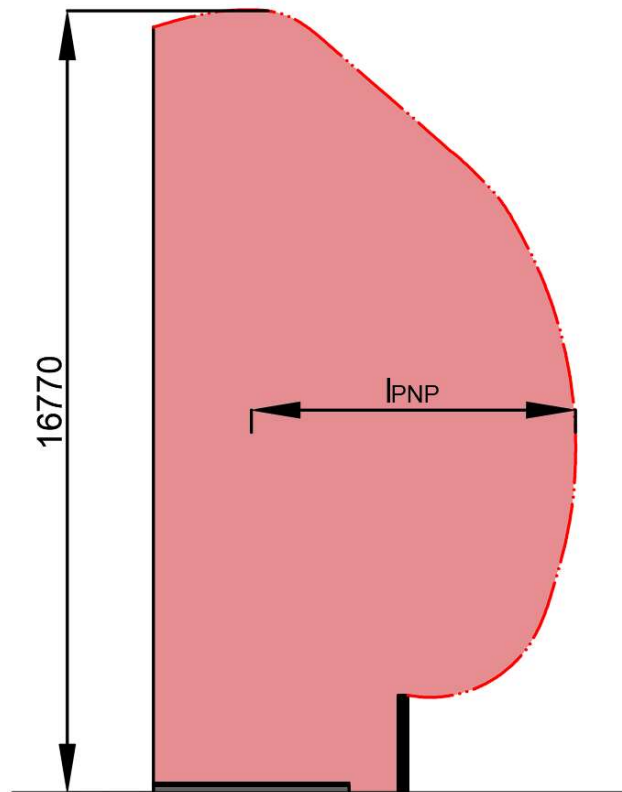


Obr. 49 Schéma řešeného matematického modelu

Dalším sledovaným jevem bylo chování sálavé složky v prostoru horní hrany clonící stěny. Byl tedy zkoumán tvar sálavého toku, zda sálání pokračuje pod jistým úhlem dále do volného prostoru, či se ohýbá a sálání pokračuje i za clonící stěnu.

Analýzou výpočtů několika matematických modelů s různými hořlavými kapalinami bylo zjištěno, že požárně nebezpečný prostor dosahuje největších vzdáleností uprostřed výšky plamene.

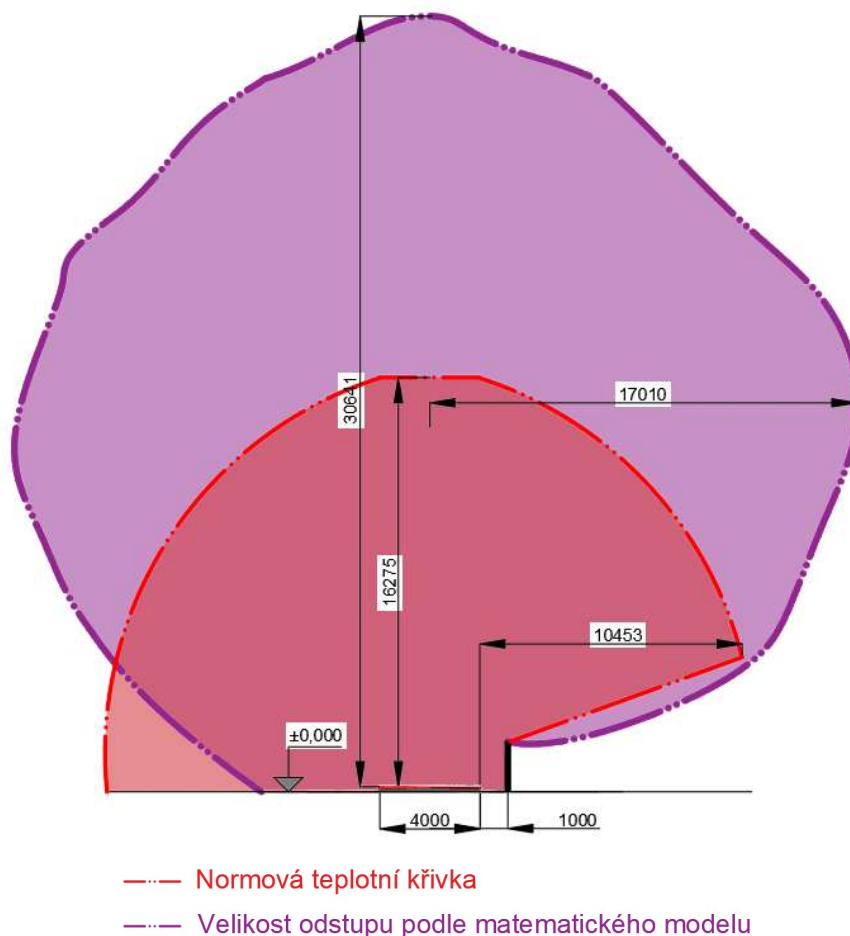
Vzdálenost se však liší u různých hořlavých kapalin. Maximální horizontální vzdálenost hranice sálavého toku s hodnotou  $18,5 \text{ kW/m}^2$  lze vyjádřit ve zjednodušených vztazích díky znalosti výšky plamene výpočtem zjednodušenou metodou dle metody Heskestad nebo Thomas.



— Velikost odstupe podle matematického modelu

Obr. 50 Schéma výřezu části požárně nebezpečného prostoru pro požár na ploše 4x4 m

Z obrázku je zřejmé, že díky clonící stěně se požárně nebezpečný prostor nenachází v části za clonící stěnou, avšak obrázek je pouze řezová rovina v prostoru požárně nebezpečný prostor obtéká clonící stěnu i ze stran v závislosti na šířce clonící stěny.



Obr. 51 Schéma porovnání řešení s výpočtem a normovým přístupem pro požár na ploše 4x4 m

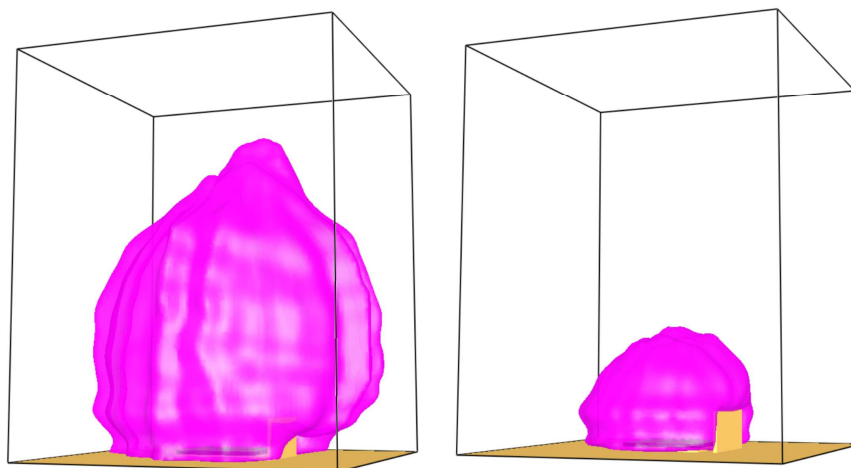
Dle ČSN 73 0804 je v závislosti na poměru vzdálenosti místa instalace, vůči požadovanému odstupu, stanovena požární odolnost vnější konstrukce, které zasahuje do požárně nebezpečného prostoru. Norma předpokládá, že clonící stěna je vystavena podmínkám odpovídajícím tepelnému působení normového diagramu vnějšího požáru.

Avšak většina stavebních materiálů není v praxi požárně odzkoušena na normový diagram vnějšího požáru, využívá se tedy při hodnocení odolnosti konstrukce méně příznivý normový požár z vnitřní strany.

Základní princip vychází ze stanovení odstupových vzdáleností podrobným způsobem (vycházejících z norem ČSN 73 0802 a ČSN 73 0804), dále z výpočtu polohového součinitele  $\Phi$ . Výpočet sálavé plochy podléhá pravidlům dle přílohy G ČSN EN 1991-1-2 [34] a zároveň z útlumu radiace za okrajem sálavé plochy.

V praxi však nastávají další varianty zastínění, stínící konstrukce může být snížena, a tudíž se tepelný sálavý tok ohýbá přes její horní hranu a postupuje dále do prostoru. Další problém může nastat v umístění stínící konstrukce v půdorysném průmětu.

Jak bylo již zmiňovááno v předchozím textu, v normách není dostatečně řešen typ hořlavé kapaliny a s tím spojená výška plamene od hořlavé kapaliny.



Obr. 52 Schéma iso-plochy hustoty kritického sálavého toku pro hoření heptanu (vlevo) a ethanolu (vpravo) v čase  $t = 414$  s

Ze schématu je zřejmé, že při větší výšce plamene je potřeba jako clonící stěnu použít konstrukci, která bude mít větší rozměry. Pro analýzu chování hustoty tepelného sálavého toku v půdorysném průmětu byly porovnány různé případy šířky clonící stěny vymodelované v matematickém modelu. Bylo řešeno pět různých variant, viz. Tab. 12.

Tab. 11 Tabulka variant řešených případů proměnlivé šířky clonící stěny

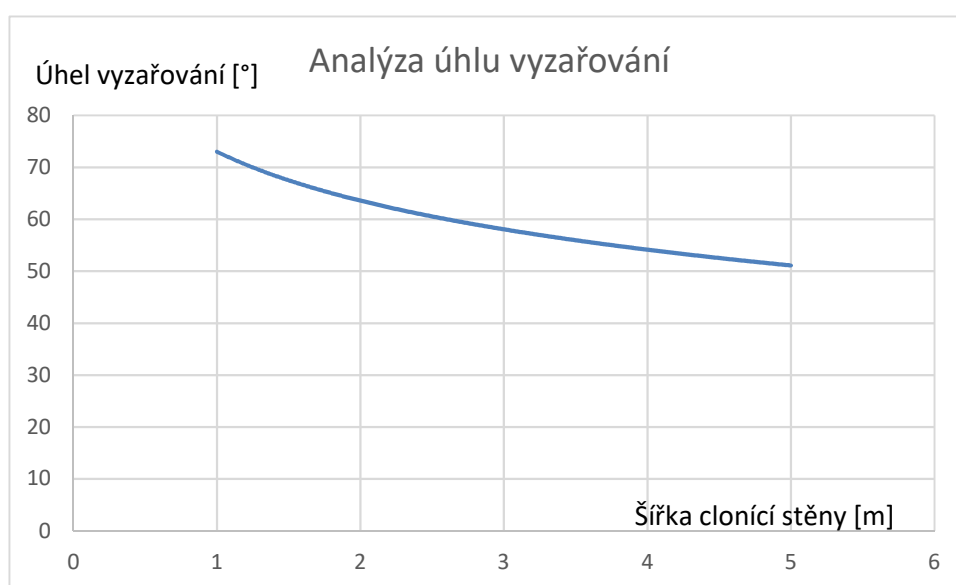
	Výška clonící stěny [m]	Šířka clonící stěny [m]	Tloušťka clonící stěny [m]
1	2	1	0,2
2	2	2	0,2
3	2	3	0,2
4	2	4	0,2
5	2	5	0,2

Dalším sledovaným jevem je chování tepelného sálavého toku u hran stínící konstrukce. Při řešení normovým způsobem by byl předpoklad, že tepelný sálavý tok se šíří dále za stínící stěna na spojnici nejnvýše položeného bodu ohraničené plochy hořlavé kapaliny a horní hrany stínící stěny.

Tento předpoklad je velice zjednodušený a výsledný tvar sálavého tepelného toku se liší. Tepelný sálavý tok se v místě ukončení stínící konstrukce ohýbá a sálání tak pokračuje i za stínící konstrukci pod jistým úhlem.

Při analýze bylo tedy uvažováno hoření hořlavé kapaliny na ploše 4x4 metru a různé šířky clonící stěny dle tabulky výše. Bylo simulováno hoření heptanu a ethanolu, aby byla pokryta hořlavá kapalina, která dosahuje velkých výšek plamen a hořlavá kapalina, které se s hodnotami výšky plamene nachází na opačné straně.

Celkem bylo tedy nasimulováno deset požárních scénářů, z výsledků byl následně analyzován vzájemný vztah mezi šířkou clonící stěny a velikosti úhlu, pod kterým sálavý tok pokračuje za clonící stěnu. Výsledný úhel pod, kterým sálání pokračuje za hranu clonící stěny se v případech totožných rozměru stěny, avšak jiné hořlavé kapaliny, víceméně nelišil. Ve dvou případech se hodnoty úhlu neshodovaly, a to pouze o dva stupně.



Obr. 53 Graf závislosti úhlu vyzařování vůči šířce clonící stěny

Úhel, pod kterým sálání vyzařuje za hranu clonící stěny je závislé na šířce clonící stěny a lze ho vyjádřit vztahem:

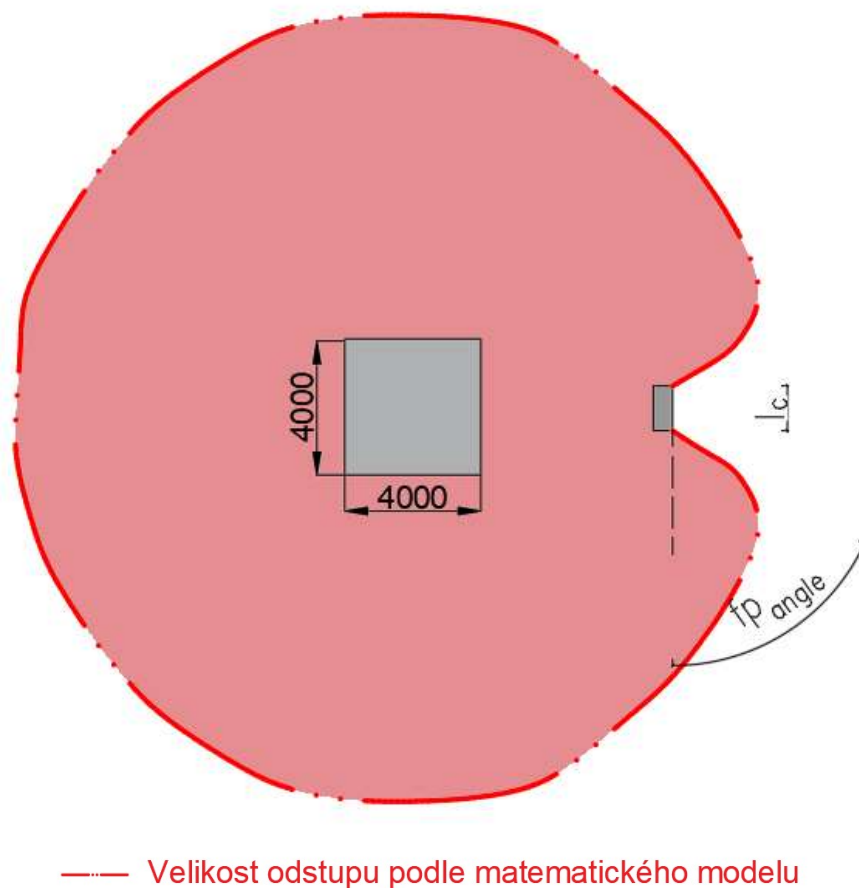
$$f_{p_{angle}} = -7,694 * \ln(l_c) + 65,367 \quad (19)$$

kde:  $f_{p_{angle}}$  úhel vyzařování sálavého toku za hranu konstrukce [°]

$l_c$  šířka clonící stěny [m]

Vztah byl vyvozen z výsledných hodnot matematických modelů. Rovnice je platná pro hoření heptanu a ethanolu a pro případy kdy šířka clonící stěny nepřesahuje za kraj odstupové vzdálenosti v půdorysném průmětu. Velikost úhlu se zmenšuje se zvětšující se šířkou clonící stěny. Pokud by byla šířka stěny rovna dvojnásobku  $l_{PNP}$ , a byla by umístěna v ose ohraničené plochy hořlavé kapaliny, již by sálání nebylo schopno obtékat clonící stěnu z boku stěny. Toto řešení by zamezilo výskytu veškerému sálavému toku za bočními hranami clonící stěny.





Obr. 54 Schéma úhlu vyzařování okolo clonící stěny

## 5 Závěr a doporučení

Diplomová práce se zabývá analýzou sálavého toku při hoření hořlavých kapalin a je rozdělena na tři hlavní kapitoly „**Současný stav poznání**“, „**Analýza sálavého toku při hoření hořlavých kapalin**“ a „**Porovnání výsledků analýzy sálavého toku**“.

Kapitola „Současný stav poznání“ se zabývá teorií hoření hořlavých kapalin. Nahlíží na základní požárně technické charakteristiky a dále vysvětluje parametry, které ovlivňují hoření kapalin.

Druhá hlavní kapitola „Analýza sálavého toku při hoření hořlavých kapalin“ se zabývá matematickým modelováním. Třetí kapitola „Porovnání výsledků analýzy sálavého toku“ se zabývá porovnáním výsledků matematických modelů a normového řešení. Chování sálavého toku při požáru hořlavých kapalin závisí podstatně na typu hořlavé kapaliny. Jelikož každá hořlavá kapalina má jiné požárně technické charakteristiky, liší se proces hoření a tím i chování sálavého toku u jednotlivých hořlavých kapalin. Sálavý tok je spjat s výškou plamene, proto se značná část práce soustředila na výšku plamene při hoření hořlavé kapaliny.

Od plamene vystupuje do okolí tepelný sálavý tok a tvoří tak požárně nebezpečný prostor. Při využití analytických modelů a matematického modelu byly vypočteny podobné výšky plamene, avšak normové řešení výšky plamene nezahrnuje oproti předchozím řešením změnu velikosti ohraničené plochy, na které dochází k hoření, a tak uvažuje výšku plamene neměnnou s měnící se velikostí nádrže. Normová hodnota výšky plamene je platná pro hoření methanolu a ethanolu na ohraničené ploše 8x4 m. Porovnání výšky plamene při výpočtu pomocí analytických modelů a normovým způsobem vykazovalo veliké rozdíly, zejména u výšky plamene, vlivem změn požárně technických charakteristik jednotlivým hořlavých kapalin. Normové řešení není na straně bezpečné, chybí zohlednění různých typů hořlavých kapalin a s nimi měnících se požárně technických charakteristik.

Při analýze velikosti odstupové vzdálenosti v závislosti na použité teplotní křivce se ukázalo, že použití uhlovodíkové teplotní křivky vykazuje největší odstupovou vzdálenost, což je zřejmé již z průběhu grafu teplotní křivky. Naopak při využití křivky vnějšího požáru je odstupová vzdálenost nejmenší. Rozdíl mezi velikostí odstupu při použití uhlovodíkové teplotní křivky a normové teplotní křivky se výrazně neliší.

Analogií tvorby odstupových vzdáleností byl porovnán vliv změny velikosti odstupové vzdálenosti při zahrnutí měnící se výšky plamene vypočtenou pomocí analytických modelů. Normové řešení nezahrnuje ve výpočtu změnu výšky plamene a uvažuje výšku plamene neměnnou. Rozdíl ve velikosti odstupové vzdálenosti je mnohem větší při dosažení stanovené výšky plamene dle výpočtové metody Thomas namísto deterministicky stanovené hodnoty 6 m.

V následném porovnání společně s výsledky z matematického modelu je velikost odstupové vzdálenosti větší než při analytické i normovém řešení. Při analýze tepelného sálavého toku v řezové rovině se výrazně liší tvar odstupové vzdálenosti vůči normovému řešení, ačkoliv je normový tvar konzervativnější ve spodní části sálání, výsledná hodnota vzdálenosti dosahujícího kritické hodnoty tepelného sálavého toku je odlišná. Zejména její svislá vzdálenosti se markantně liší. Avšak se zvětšující se velikostí nádrže se rozdíly snižují, nicméně tvar odstupové vzdálenosti je stále odlišný.

Pro použití konstrukce bránící sdílení tepla je normovým přístupem dostatečně popsána požární odolnost takto řešené konstrukce. Bohužel její vliv na omezení šíření tepelného sálavého toku společně s potřebnými rozměry a umístěním clonící stěny není náležitě popsán. Taktéž není popsáno chování tepelného sálavého toku u okrajů clonící stěny. Byl vyvozen vztah pro úhel vyzařování tepelného sálavého toku za líc stěny a analyzoval tvar kritického sálavého toku v řezu. Znalost velikosti úhlu vyzařování sálavého toku za líc stěny je základem pro stanovení požárně nebezpečného prostoru. Vztah je platný pro hoření heptanu a ethanolu a při uvažování šířky clonící stěny, která nepřesahuje hranice požárně nebezpečného prostoru.

Doporučením do praxe je zejména přehodnocení deterministicky stanovené hodnoty výšky plamene. A je doporučeno provést podrobnější analýzu a případné zpracování této analýzy do normy.

Na diplomovou práci lze navázat například analýzou vlivu hoření hořlavé kapaliny s ohledem na tlakové podmínky a vnější vlivy prostředí jako je například vítr. Dále by bylo pragmatické sledovat vliv výšky plamene s ohledem na různé typy hořlavých kapalin.

## Seznam obrázků

Obr. 1	Schéma mezí výbušnosti, Převzato: [12] .....	18
Obr. 2	Popis zón hoření hořlavé kapaliny, Převzato: [16] .....	19
Obr. 3	Rychlost spalování vzhledem k thermochemickým vlastnostem hořlavých kapalin, Převzato: [16] .....	21
Obr. 4	Schéma kónického kalorimetru, Převzato: [23].....	22
Obr. 5	Schéma rovnováhy energie hoření kapalných látek, Převzato: [25] .....	23
Obr. 6	Schéma poklesu teploty vůči vzdálenosti od povrchu, Převzato: [16].....	24
Obr. 7	Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 4x4 m.....	27
Obr. 8	Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 8x4 m.....	28
Obr. 9	Požární scénář jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 12x4 m .....	28
Obr. 10	Graf závislosti ohraničené plochy hoření a výšky plamene dle modelu Heskestad .....	30
Obr. 11	Graf závislosti ohraničené plochy hoření a výšky plamene dle modelu Thomas .....	31
Obr. 12	Graf porovnání obou výpočetních modelů výšky plamene .....	32
Obr. 13	Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 4x4 m .....	35
Obr. 14	Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 8x4 m .....	36
Obr. 15	Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 12x4 m .....	38
Obr. 16	Schéma prvního matematického modelu – jímka 4x4 m .....	39
Obr. 17	Schéma druhého matematického modelu – jímka 8x4 m.....	39
Obr. 18	Schéma třetího matematického modelu – jímka 12x4 m .....	40
Obr. 19	Graf výsledných teplot jednotlivých výpočetních sítí .....	41
Obr. 20	Graf používaných teplotních křivek, Převzato: [32] .....	42
Obr. 21	Výsledný graf rychlosti uvolňování tepla, plná čára – výsledné hodnoty HRR z programu FDS, čárkovaná čára – proložení výsledných hodnot polynomem .....	43
Obr. 22	Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 4x4 m v čase t= 624 s....	44
Obr. 23	Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 8x4 m v čase t= 624 s....	44
Obr. 24	Výsledné hodnoty výšky plamene od plošného požáru o rozměrech 12x4 m v čase t= 624 s..	45
Obr. 25	Schéma požárně nebezpečného prostoru (řez) (převzato z ČSN 730804 [4]).....	46
Obr. 26	Schéma porovnání velikosti odstupů dle teplotních křivek – požár 4x4 m .....	48

Obr. 27	Schéma porovnání velikosti odstupů dle teplotních křivek – požár 8x4 m .....	49
Obr. 28	Schéma porovnání velikosti odstupů dle teplotních křivek – požár 12x4 m .....	50
Obr. 29	Graf rozdílů velikosti odstupů vůči použité teplotní křivce při konstantní výšce plamene 6 m	51
Obr. 30	Požární scénář s jímkou o rozměrech 4x4 m .....	52
Obr. 31	Požární scénář s jímkou o rozměrech 8x4 m .....	52
Obr. 32	Požární scénář s jímkou o rozměrech 12x4 m .....	53
Obr. 33	Graf vlivu zohlednění proměnlivé výšky plamene pomocí výpočtu analytickým modelem (Thomas) vůči šířce požárně otevřené plochy .....	54
Obr. 34	Schéma rozdílů velikosti odstupové vzdálenosti při zohlednění stanované výšky plamene dle výpočtového modelu Thomas .....	54
Obr. 35	Schéma porovnání velikostí odstupů s matematickým modelem pro požár jímky o rozměrech 4x4 m .....	55
Obr. 36	Schéma porovnání velikosti odstupů při využití normových křivek požáru a matematického modelu .....	56
Obr. 37	Schéma vlivu velikosti plamene na použité hořlavé kapaliny .....	57
Obr. 38	Schéma porovnání požárně nebezpečného prostoru při hoření heptanu (vlevo) a ethanolu (vpravo) v čase $t = 450$ s .....	58
Obr. 39	Schéma požárně nebezpečného prostoru v řezu při normovém řešení pro požár velikosti 4x4 m .....	58
Obr. 40	Schéma požárně nebezpečného prostoru v řezu při výpočtu pomocí matematického modelu hoření pro požár velikosti 4x4 m .....	59
Obr. 41	Schéma porovnání velikosti a tvaru požárně nebezpečného prostoru pro hoření jímky o rozměrech 4x4 m .....	60
Obr. 42	Schéma požárně nebezpečného prostoru při řešení jímky o rozměrech 8x4 m dle normového přístupu .....	61
Obr. 43	Schéma výsledku velikosti požárně nebezpečného prostoru při hoření jímky s hořlavou kapalinou o rozměrech 8x4 m při využití matematického modelu .....	61
Obr. 44	Schéma porovnání požárně nebezpečných prostorů řešených dle normového přístupu a výpočtem pomocí matematického modelu .....	62
Obr. 45	Schéma porovnání velikosti odstupů pro hoření jímky velikosti 12x4 m .....	63
Obr. 46	Graf závislosti výšky plamene a svislé vzdálenosti odstupů od hladiny hořlavé kapaliny .....	64
Obr. 47	Znázornění chování okolního vzduchu při hoření hořlavé kapalné látky $t = 340$ s .....	65
Obr. 48	Schéma použití konstrukce bránící sdílení tepla dle norem, Převzato: [5] .....	66
Obr. 49	Schéma řešeného matematického modelu .....	67
Obr. 50	Schéma výřezu části požárně nebezpečného prostoru pro požár na ploše 4x4 m .....	68

---

Obr. 51	Schéma porovnání řešení s výpočtem a normovým přístupem pro požár na ploše 4x4 m .....	69
Obr. 52	Schéma iso-plochy hustoty kritického sálavého toku pro hoření heptanu (vlevo) a ethanolu (vpravo) v čase $t = 414$ s.....	70
Obr. 53	Graf závislosti úhlu vyzařování vůči šířce clonící stěny.....	71
Obr. 54	Schéma úhlu vyzařování okolo clonící stěny .....	72
Obr. 55	Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 4x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky.....	92
Obr. 56	Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 8x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky.....	92
Obr. 57	Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 12x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky.....	93
Obr. 58	Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 4x4 m. ....	94
Obr. 59	Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 8x4. ....	94
Obr. 60	Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 12x4 m .....	95
Obr. 61	Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 4x4 m .....	96
Obr. 62	Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 8x4 m .....	96
Obr. 63	Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 12x4 m .....	96

## Seznam tabulek

Tab. 1	Tabulka závislosti teploty vzplanutí na obsahu alkoholu ..... <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
Tab. 2	Třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin [5] .....	15
Tab. 3	Vybrané korelace mezi výškou plamene a rychlostí uvolňování tepla dle literatur .....	20
Tab. 4	Tabulka výsledných výšek plamene od jednotlivých zkoumaných požárů .....	30
Tab. 5	Tabulka výsledných výšek plamene od jednotlivých zkoumaných požárů .....	32
Tab. 6	Tabulka hodnot požárně technických charakteristik potřebných pro výpočet výšky plamene	33
Tab. 7	Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 4x4 m .....	34
Tab. 8	Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 8x4 m .....	35
Tab. 9	Výsledné hodnoty výšky plamene při výpočtu s různými hořlavými kapalinami pro požární scénář o rozměrech 12x4 m .....	37
Tab. 10	Tabulka jemnosti sledovaných výpočetních sítí .....	41
Tab. 11	Porovnání výšky plamene při využití metody Heskestad, Thomas a při použití výpočtu pomocí matematického modelu .....	45
Tab. 12	Tabulka variant řešených případů proměnlivé šířky clonící stěny .....	70
Tab. 13	Databáze požárně technických charakteristik .....	83

## Seznam vztahů

Vztah 1:	Výpočet množství tepla, které se uvolní za časovou jednotku	16
Vztah 2:	Výpočet množství tepla, odvedeného ze směsi za časovou jednotku	16
Vztah 3:	Korelace mezi výškou plamene a rychlostí uvolňování tepla	17
Vztah 4:	Korelace mezi výškou plamene a rychlostí uvolňování tepla	17
Vztah 5:	Korelace mezi výškou plamene a rychlostí uvolňování tepla	17
Vztah 6:	Rychlost spalování	18
Vztah 7:	Výpočet HRR	19
Vztah 8:	Výpočet výhřevnosti	20
Vztah 9:	Výpočet HRR dle metody Heskestad	26
Vztah 10:	Výpočet průměru požáru pro metodu Heskestad	26
Vztah 11:	Výpočet výšky plamene pomocí metody Heskestad	26
Vztah 12:	Výpočet HRR dle metody Thomas	27
Vztah 13:	Výpočet průměru požáru pro metodu Thomas	28
Vztah 14:	Výpočet výšky plamene pomocí metody Thomas	28
Vztah 15:	Výpočet HRR	40
Vztah 16:	Závislost výšky plamene a svislé vzdálenosti odstupu	62
Vztah 17:	Výpočet horizontální vzdálenosti požárně nebezpečného prostoru	66
Vztah 18:	Výpočet konstanty pro výpočet horizontální vzdálenosti PNP	66
Vztah 19:	Výpočet úhlu vyzařování sálavého toku za hranu clonící stěny	70



## Literatura

- [1] ČESKO a HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR. *Konspiky odborné přípravy jednotek PO*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 978-80-86111-89-6.
- [2] REICHEL, Vladimír. *Zbraňujeme škodám. Navrhování požární bezpečnosti staveb. Svazek 16: Česká státní pojišťovna, 1979.*
- [3] ČSN 73 0802 – *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*. Praha: ÚNMZ, 05/2009 + Z1 (02/2013) + Z2 (07/2015).
- [4] POKORNÝ, Marek, Petr HEJTMÁNEK, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. *Požární bezpečnost staveb: sylabus pro praktickou výuku*. 2018. ISBN 978-80-01-06394-1.
- [5] ČSN 73 0804. *Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty, 2010 + Z1:2013 + Z2:2015*. Praha: ÚNMZ.
- [6] ČSN 65 0201 *Hořlavé kapaliny – Prostory pro výrobu, skladování a manipulaci 08/2003 + Z1 (02/2006) 2003*. Praha: ÚNMZ
- [7] *Boverket's building regulations - mandatory provisions and general recommendations, BBR. 2011.*
- [8] CARLSSON, Emil. *EXTERNAL FIRE SPREAD TO ADJOINING BUILDINGS - A review of fire safety design guidance and related research. 5051*. Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering, Lund University. 1999.
- [9] BOBEK, Ondřej. *Experimentální ověření požární otevřenosti slaměných stěn. Praha 2018. Diplomová práce (Ing.). České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra konstrukce pozemních staveb.*
- [10] GREAT BRITAIN. *The Building Regulations 2010. coming into effect April 2007. Approved document B, Volume 1, Approved document B, Volume 1,.* 2013. ISBN 978-1-85946-488-5.
- [11] *Extract from the New Zealand Building Code: Clauses C1-C6 Protection from Fire. B.m.: Department of Building and Housing, nedatováno.*
- [12] DOLEŽAL, Zdeněk. *Preventivní opatření proti nebezpečným vlastnostem hořlavých kapalin. B.m.: Ústřední výbor ČS svazu požární ochrany Praha, 1964.*
- [13] ČSN EN ISO 2592 – *Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření – Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda 05/2004*. Praha: ÚNMZ.
- [14] ČSN EN ISO 2719 – *Stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho – Martense. 02/2017 + Opr. 1 05/2017*. Praha: ÚNMZ.
- [15] KATEŘINA ORLÍKOVÁ a Petr ŠTROCH. *Chemie procesů hoření. SPBI Spektrum. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1999. ISBN 80-86111-39-3.*
- [16] VALI, Alireza. *Transport phenomena within liquid phase of a laboratory-scale circular methanol pool fire. Alberta 2014. Doctor od Philosophy (Ph.D.). University of Alberta, Department of Mechanical Engineering.*
- [17] DRYSDALE, Dougal. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.

- [18] G. Cox, R. Chitty, *Some source-dependent effects of unbounded fires*, *Combustion and Flame*, 60(3) (1985) 219-232.
- [19] P.H. Thomas, *The size of flames from natural fires*, *Symposium (International) on Combustion*, 9 (1963) 844-859.
- [20] E.E. Zukoski, B.M. Cetegen, T. Kubota, *Visible structure of buoyant diffusion flames*, *Symposium (International) on Combustion*, 20 (1984) 361-366.
- [21] D. Drysdale, *Introduction to fire dynamics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [22] H.C. Hottel, *Review: Certain laws governing the diffusive burning of liquids*, *Fire Research Abstracts and Reviews*, 1 (1959) 41-43.
- [23] FILIPI, Bohdan. *Nauka o materiálu. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava*, 2003.
- [24] A. Nakakuki, *Heat transfer in hot-zone-forming pool fires*, *Combustion and Flame*, 109(3) (1997) 353-369.
- [25] T. Inamura, K. Saito, K.A. Tagavi, *A study of boilover in liquid pool fires supported on water. part II: Effects of in-depth radiation absorption*, *Combustion Science and Technology*, 86(1-6) (1992) 105-119.
- [26] H.D. Ross, *Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels*, *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1) (1994) 17-63.
- [27] F.A. Williams, *Mechanisms of fire spread*, *Symposium (International) on Combustion*, 16(1) (1977) 1281-1294.
- [28] SKARSBO, Lars. *An Experimental Study of Pool Fires and Validation of Different CFD Fire Models*. Bergen Norway: Department of Physics and Technology, University of Bergen, 2011.
- [29] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 2nd ed. Quincy, Mass. : Boston, Mass: National Fire Protection Association ; Society of Fire Protection Engineers, 1995. ISBN 978-0-87765-354-7.
- [30] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Randall MCDERMOTT, Jason FLOYD, Craig WEINSCHENK a Kristopher OVERHOLT. *Fire Dynamics Simulator User's Guide. Sixth. B.m.: NIST – National Institute of Standards and Technology and VTT Technical Research Centre of Finland*, 2017.
- [31] J.A. Fay, "Model of large pool fires", *J. Hazard. Mater.* 136 (2006) 219–232.
- [32] In: Tzbinfo [online]. Praha [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/obalove-konstrukce-nizkoenergetickych-staveb/8974-pozarni-odolnost-obvodovych-sten-pro-pasivni-domy-s-vyuzitim-slamenych-baliku-jako-tepelne-izolace>
- [33] VOV - *Calculation of Fire Separation Distances*. Martin Benýšek, Radek Štefan, 2017
- [34] *European standard, Eurocode 1, EN 1991-1-2, Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. 2002.
- [35] *Bezpečnostní listy*. Praha: Penta s.r.o, 2016.

- [36] KISLINGER, Radek. *Požárně technické charakteristiky a technické informace pro potřeby ZPP*. Praha: Ministerstvo vnitra, Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2015. ISBN 978-80-86466-72-9.
- [37] *Bezpečnostní list – Methanol*. Neratovice: Lach-Ner, s.r.o., 2016.
- [38] *Bezpečnostní list – Motorová nafta*. Bratislava: SLOVNAFT, a.s., 2016.

## Příloha 1 – Databáze požárně technických charakteristik

Požárně technické charakteristiky hořlavých kapalin jsou základní potřebnou charakteristikou pro hoření hořlavých kapalin. Pro lepší orientaci a rychlost porovnání a zjištění PTCH jednotlivých kapalin byla vytvořena databáze PTCH [35–38].

Tab. 12 Databáze požárně technických charakteristik

PTCH						Výbušnost [%]			
		pH	Bod tání/Bod tuhnutí [°C]	Bod varu [°C]	Bod vzplanutí [°C]	dolní mez	horní mez	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Teplota vznícení [°C]
Acetaldehyd	bezbarvý	5	-123	20,4	-39	4	60	780	185
Aceton	bezbarvý	-	-95,35	56,24	-18	2,6	13	789	603
Acetonitril	bezbarvý	-	-46	81	2	4,4	16	786	525
Acetylceeton	bezbarvý	6	-23	140	38	1,7	11,4	970	350
Acetylchlorid	bezbarvý	-	112	52	5	7,3	19	1100	-
Amoniak	nažloutlá	12	-57,5	37,7	-	1516	2528	907	650
Anilin	nažloutlá	8,8	-6	184	70	1,3	23	1022	-
Benzaldehyd	bezbarvý	5,9	-26	178	64	1,4	8,5	1045	-
Benzylalkohol	bezbarvý	-	-	205	101	1,3	13	1050	-
Benzylchlorid	bezbarvý	-	-43	179,3	67	1,1	14	1100	-
Brom	červenohnědá	-	-7,2	58,8	-	-	-	3120	-
Brombenzen	bezbarvý	-	-31	156	51	-	-	1490	-
Bromoform	bezbarvý	-	5	149	-	-	-	2890	-
Cyklohexan	bezbarvý	-	6	81	-18	1,2	8,3	780	260
Cyklohexanol	bezbarvý	6,5	25	160	68	12	2	945	-
Cyklohexanon	bezbarvý	6,6	-	153	44	1,3	9,4	946	420
Dibutylether	bezbarvý	5,2	-95	139	25	0,9	8,5	767	-

Diethanolamin	-	11	27	268	176	1,6	10,6	1097	-
Diethylenglykol	bezbarvý	5	-10	242	138	1,6	10,8	1116	-
Diethylether	bezbarvý	-	-117,6	34,5	-45	1,9	36	710	-
Dichlormethan	bezbarvý	-	-95	40	-	13	22	1325	-
Dimethylsulfát	bezbarvý	-	-32	188	83	3,6	-	1333	-
Ethanol	bezbarvý	7	-117	78	17	3,5	15	790	-
Ethanolamin	bezbarvý	12	10	69	92,1	2,5	17	1012	91
Ethylenglykol	bezbarvý	5	-13	197,4	111	3,2	15,3	1110	410
Ethylester kyseliny octové	bezbarvý	-	-83	77	-4	2,1	11,5	900	-
Ethylmethylketon	-	5,5	-86	79	-1	1,8	11,5	800	-
Formaldehyd	bezbarvý až bíle zakalený	6,7	-	100	56	7	73	-	-
Hexan	bezbarvý	-	-20	65	-28	-	-	670	-
Hydrazin hydrát	bezbarvý	-	-	-	-	-	-	1010	-
Hydrazin monohydrát	-	11	-60	117	73	3,5	99,9 9	1029	-
Hydrochinon	bezbarvý	3,7	172	285	165	-	-	1332	-
Chlorbenzen	bezbarvá až nažloutlá	-	-45	132	28	1,3	11	1106	590
Chloroform	bezbarvý	-	-61,3	61	-	-	-	1480	-
Isoamylalkohol	bezbarvý	7	-117	131	43	1,2	8	809	-
Isobutylalkohol	bezbarvý	7	-108	106	28	1,6	12	802	-
Isooktan	bezbarvý	-	-107	99	-12	1	6	-	-
Isopropylalkohol	bezbarvý	7	-89,5	81,4	12	2	12,7	789	-
Kyselina akrylová	bezbarvý	2,1	13	141	46	3,9	19,8	1050	-
Kyselina bromovodíková	bezbarvá až nažloutlá	-	-11	126	-	-	-	1490	-

Kyselina DL-mléčná	bezbarvá až nažloutlá	-	16	122	110	-	-	1210	-
Kyselina dusičná	bezbarvá až nažloutlá	<1	-32	121	-	-	-	1400	-
Kyselina fluorovodíková	bezbarvá až nažloutlá	-	-	112	-	-	-	1130	-
Kyselina chloristá	bezbarvý	-	-18	198,7	-	-	-	1670	-
Kyselina jodovodíková	žlutá	-	-	127	-	-	-	1710	-
Kyselina mravenčí	bezbarvý	2,2	-	101	59	38	12	1190	-
Kyselina o-fosforečná	bezbarvý	1,5	21	158	-	-	-	1685	-
Kyselina octová	bezbarvý	1	17	116	39,5	4,05	16,0 19	1050	-
Kyselina olejová	bezbarvý	-	10	360	189	-	-	-	-
Kyselina peroxyoctová	bezbarvý	-	-	-	54,5	-	-	1166	-
Kyselina propionová	bezbarvý	2,5	-20	140	54	2,9	12,1	999	513
Kyselina sírová	bezbarvý	<1	3	-	-	-	-	1830	-
Kyselina thoglykolová	bezbarvý	1	-	100	130	-	-	-	-
m-Kresol	bílá	5	31	200	86	-	-	1034	-
Methylalkohol	bezbarvý	-	-98	65	11	5,5	44	791	455
Methylester kyseliny octové	bezbarvý	-	-98	56	-13	3,1	16	934	-
Morfolin	bezbarvý	11	-5	124	31	-	-	1000	-
n-Butylalkohol	bezbarvý	7	-90	116	35	1,5	9,4	810	355
n-Heptan	bezbarvý	-	-90	96,5	-4	1	7	684	220
n-Hexan	bezbarvý	-	-95	67,5	-22	1,2	7,7	659	-

n-Pentan	bezbarvý	-	-130	35	-49	1,4	8,3	626	-
n-Propylalkohol	bezbarvý	8,5	-127	97	22	2,1	13,7	804	-
N,N-Dimethylanilin	žlutá	7,4	2	193	75	-	-	956	-
Nitrobenzen	bezbarvá až nažloutlá	8	5	211	88	1,8	40	1200	480
Nitromethan	bezbarvý	6,4	-29	97	36	7,3	-	1136	418
Peroxid vodíku 30%	bezbarvý	2	-	106	-	-	-	1110	-
Petrolether	bezbarvý	-	-	44	-43	1,1	7,5	658	392
Propylenglykol	bezbarvý	6	-59	185	99	2,4	17,4	1035	
Pyridin	bezbarvý	8,5	-42	115	17	1,7	12,4	-	550
Rtuť	stříbrnošedá	-	-38,67	356,6	-	-	-	13550	-
sek-Butylalkohol	bezbarvý	-	-115	98,5	23	1,7	9,8	808	-
Sirouhlík	bezbarvý	-	-	46	-30	1,3	50	1263	-
terc-Butylalkohol	bezbarvý	-	23	83	11	2,4	8	-	-
terc-Butylmethylether	bezbarvý	-	-108,6	55,3	-28	1,5	8,5	740	460
Tetrahydrofuran	bezbarvý	-	7	66	-17	1,8	11,8	-	321
Tetrachlorethylen	bezbarvý	-	-	-22,3	121	-	-	1620	-
Thionyl chlorid	bezbarvá až nažloutlá	-	-	-105	76	-	-	1635	-
Toluen	bezbarvý	-	-94,5	110	6	1,1	7,1	866	-
Triethanolamin	bezbarvá až nažloutlá	11	21,2	360	179	3,6	7,2	1120	-
Triethylamin	bezbarvý	13	-115	88	-12	1,2	8	-	230
Xylen	bezbarvý	-	-34	135	25	1	7	867	-

## Příloha 2 – Vzor zdrojového kódu numerického modelu

&HEAD CHID='Pool fire 4x4', TITLE='Pool Fire 4x4' /

&MESH IJK = 80, 100, 200, XB= 2,6, -4, 6, 0, 20, COLOR='BLACK'/ síť

&TIME T\_END=100./ konec

&VENT MB = 'XMIN', SURF\_ID = 'OPEN'/

&VENT MB = 'XMAX', SURF\_ID = 'OPEN'/

&VENT MB = 'YMIN', SURF\_ID = 'OPEN'/

&VENT MB = 'YMAX', SURF\_ID = 'OPEN'/

&VENT MB = 'ZMAX', SURF\_ID = 'OPEN'/

&VENT MB = 'ZMIN', SURF\_ID = 'INERT'/

Hoření

&REAC ID='N-HEPTANE'

FYI='N-Heptane, C\_7 H\_16'

C=7

H=16

SOOT\_YIELD=0.01 / defaulte je 0 ale je dáno 0.01 kvůli kouři ve smokeview

&OBST XB=2,6, 2,6, 0.1,0.3, SURF\_ID6='STEEL SHEET', 'STEEL SHEET', 'STEEL SHEET', 'STEEL SHEET', 'INERT',  
'N-HEPTANE POOL'/

&OBST XB=2,6, 2,6, 0,0.1, SURF\_ID='PLATFORM'/ podklad nadrze

&OBST XB=2,6, 1, 1.2, 0, 1, SURF\_ID='INERT'/clonící stěna

&MATL ID = 'N-HEPTANE FUEL'

EMISSIVITY = 1.0

NU\_SPEC = 0.97



```
    SPEC_ID                                ='N-HEPTANE'  
  
    HEAT_OF_REACTION    = 316.6  
  
    HEAT_OF_COMBUSTION = 44590  
  
    CONDUCTIVITY        = 0.14  
  
    SPECIFIC_HEAT       = 2.24  
  
    DENSITY              = 684.  
  
    BOILING_TEMPERATURE  = 98.5  
  
    ABSORPTION_COEFFICIENT = 187.5/  
  
&MATL ID = 'STEEL'  
  
    EMISSIVITY    = 1.0  
  
    DENSITY       = 7850.  
  
    CONDUCTIVITY = 45.8  
  
    SPECIFIC_HEAT = 0.46 /  
  
&MATL ID='FIREBRICK',  
  
    CONDUCTIVITY = 1.01,  
  
    SPECIFIC_HEAT = 1.05,  
  
    DENSITY = 1915./  
  
&SURF ID = 'N-HEPTANE POOL',  
  
    COLOR = 'GREEN',  
  
    MATL_ID = 'N-HEPTANE FUEL'  
  
    THICKNESS = 0.1/  
  
&SURF ID='PLATFORM',  
  
    MATL_ID='FIREBRICK',  
  
    THICKNESS= 0.1/
```

```
&SURF ID    = 'STEEL SHEET'  
  
    COLOR    = 'BLACK'  
  
    MATL_ID  = 'STEEL'  
  
    THICKNESS = 0.01 /  
  
&DUMP DT_PL3D=1,DT_DEVC=5,DT_HRR=5,DT_SLCF=2, DT_BNDF=5,  
  
WRITE_XYZ=.TRUE.,  
  
PLOT3D_QUANTITY(1)='TEMPERATURE',  
  
PLOT3D_QUANTITY(2)='MASS FRACTION', PLOT3D_SPEC_ID(2)='OXYGEN',  
  
PLOT3D_QUANTITY(3)='U-VELOCITY',  
  
PLOT3D_QUANTITY(4)='W-VELOCITY',  
  
PLOT3D_QUANTITY(5)='HRRPUV'/  
  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/  
  
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/  
  
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.5/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.6/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.7/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.8/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.9/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.1/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.2/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.3/  
  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.4/
```

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.6/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.7/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.8/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=1.9/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.1/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.2/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.2/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.3/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.4/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.6/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.7/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.8/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2.9/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=3/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=3.5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=4/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=4.5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=2/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBY=2.5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBY=5/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBX=5/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=4/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4/

&ISOF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', VALUE(1)=18.5/

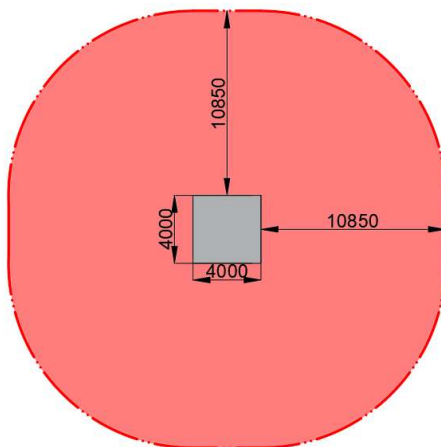
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBX=4, VECTOR=.TRUE. /

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', PBY=4, VECTOR=.TRUE. /

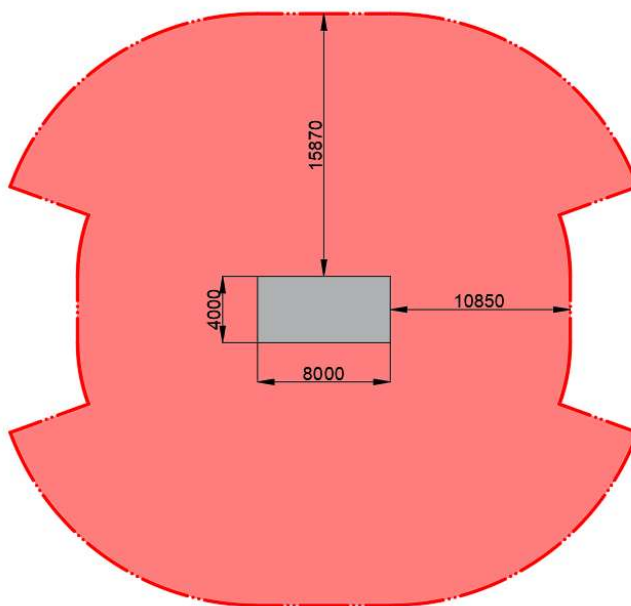
&TAIL /

## Příloha 3 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle normové teplotní křivky

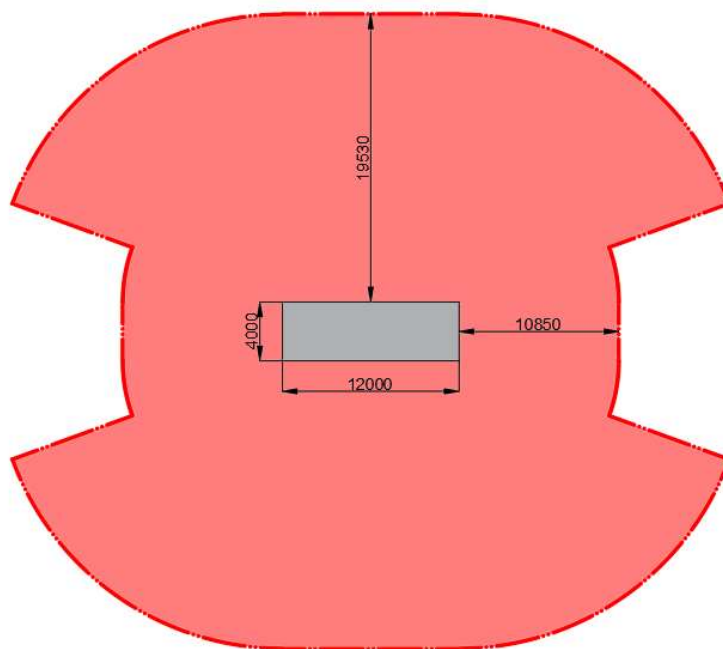
Při řešení případů pomocí normové teplotní křivky byla uvažována výška plamene normovým způsobem, a tedy výška požárně otevřené plochy činila 6 m. Pro tři požární scénáře jsem vytvořil jednotlivá schémata.



Obr. 55 Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 4x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky



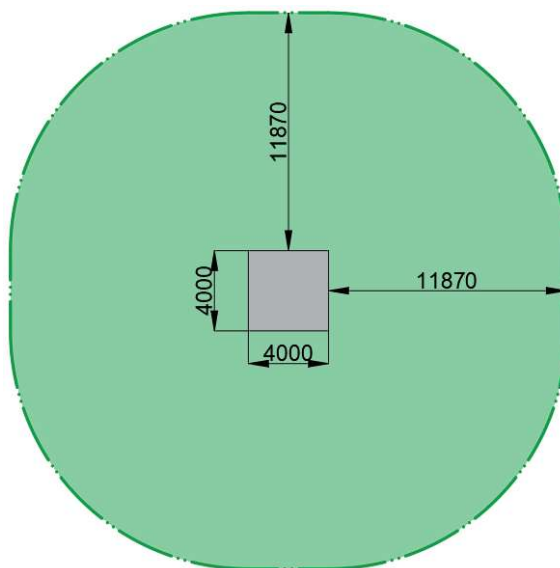
Obr. 56 Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 8x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky



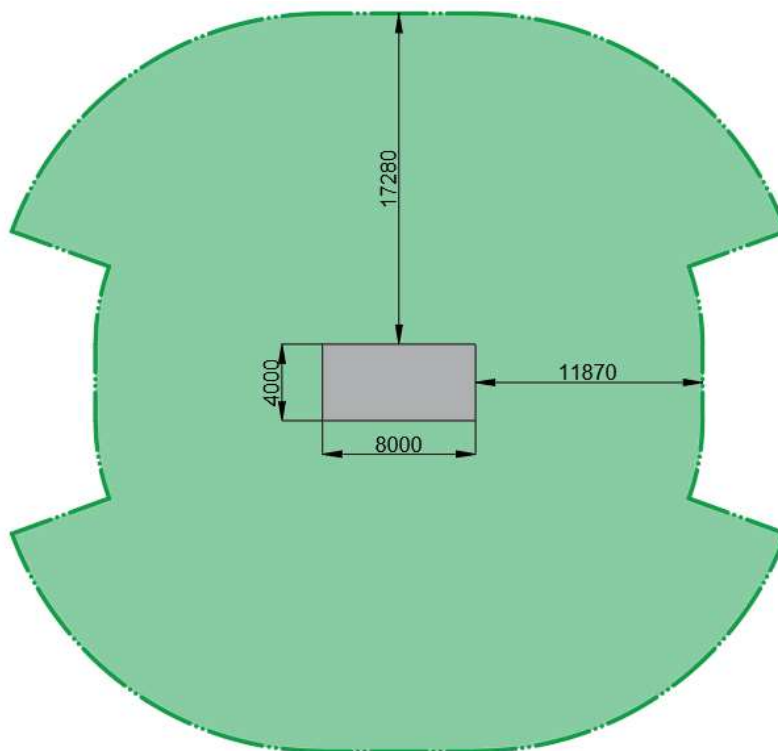
Obr. 57 Schéma velikosti odstupové vzdálenosti při hoření jímky velikosti 12x4 m při využití výpočtu podle normové teplotní křivky

Jak si můžete všimnout odstupovou vzdálenost ovlivňuje velikost požárně otevřené plochy. Požárně otevřená plocha je u hoření hořlavých kapalin dána šířkou strany ohraničené oblasti, na které může kapalina odhořívát a výškou plamene. Průběh hoření je určen normovou křivkou požáru.

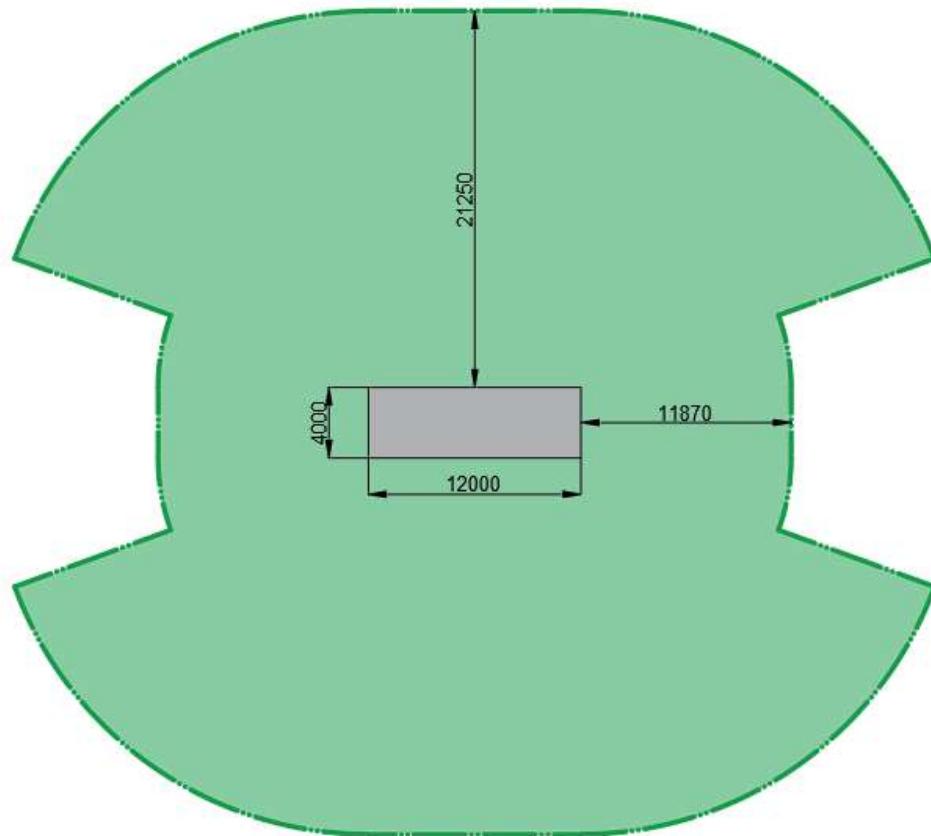
## Příloha 4 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle uhlovodíkové teplotní křivky



Obr. 58 Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 4x4 m



Obr. 59 Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 8x4



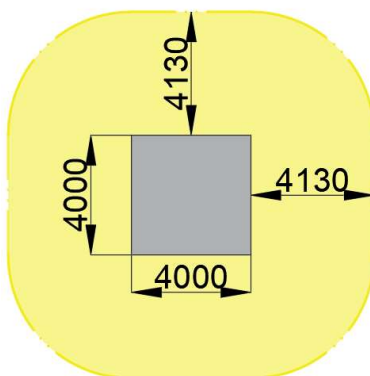
Obr. 60 Schéma požárně nebezpečného prostoru při užití uhlovodíkové křivky – požár na ploše 12x4 m

Při využití uhlovodíkové teplotní křivky se požárně nebezpečný prostor nachází nejvzdáleněji, odpovídá to průběhu samotné křivky, dosahuje maximálních teplot a má nejstrmější růst teplot.

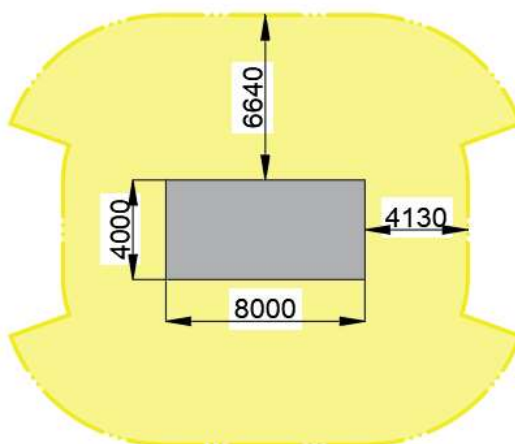
Uhlovodíková křivka se používá při posuzování hoření, kdy může dojít k dostatečnému přísunu kyslíku a může tak způsobit rychlejší vzrůst teplot. Využívá se například při posuzování hoření v tunelech.



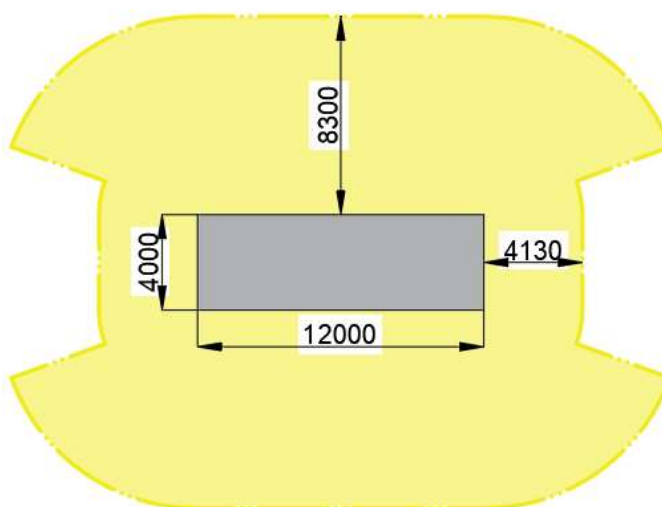
## Příloha 5 – Grafické výsledky řešení odstupových vzdáleností podle křivky vnějšího požáru



Obr. 61 Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 4x4 m



Obr. 62 Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 8x4 m



Obr. 63 Schéma velikosti odstupu při využití křivky vnějšího požáru – požár na ploše 12x4 m

Křivka vnějšího požáru uvažuje požární zatížení zvnějšku a zohledňuje přitom obecně nižší teploty ve srovnání s požárem uvnitř budov.