

NÁVRH SLOUPU VYSTAVENÉHO LOKÁLNÍMU POŽÁRU





NÁVRH SLOUPU VYSTAVENÉHO LOKÁLNÍMU POŽÁRU

Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru

Francis P., Baddoo N., Hanus F., Thauvoye Ch.,
Cábová K., Lišková N., Sokol Z., Wald F.

Vydalo České vysoké učení technické v Praze
Zpracovala Fakulta stavební ČVUT

První vydání, 2018

ISBN 978-80-01-06475-7 (tištěná verze)

ISBN 978-80-01-06476-4 (online)



PŘEDMLUVA

Publikace byla připravena v rámci projektu Výzkumného fondu pro uhlí a ocel Evropské unie Temperature assessment of a vertical steel member subjected to localised fire – Valorisation (LOCAFI-plus) (contract 754072). Na projektu LOCAFI-plus se podílely organizace:

| | |
|---|---|
| Arcelormittal Belval & Differdange SA Luxembourg | Tallinna Tehnikaulikool Estonsko |
| Centre Technique Industriel de la Construction Métallique Francie | Univerza V Ljubljani Slovinsko |
| Universitatea Politehnica Timisoara Rumunsko | Instytut Techniki Budowlanej Polsko |
| Universite de Liège Belgie | Universitat Politecnica de Valencia Španělsko |
| University Of Ulster UK | Technická Univerzita V Kosiciach Slovenská republika |
| Universita Degli Studi Di Trento Itálie | Staalinfocentrum – Infosteel Belgie |
| Česke Vysoké Učení Technické v Praze Česká republika | Miskolci Egyetem Maďarsko |
| Stichting Bouwen met Staal Nizozemsko | Tampere University of Technology Finsko |
| Universidade de Aveiro Portugalsko | The Steel Construction Institute UK |
| Bauforumstahl ev Německo | SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB Švédsko |

K přípravě této publikace významně přispěli:

Phil Francis, SCI
Nancy Baddoo, SCI
Francois Hanus, ArcelorMittal
Christophe Thauvoye, CTICM

Materiály lokalizovali do prostředí České republiky:

Kamila Cábová, ČVUT v Praze, kap. 4, A, C
Nikola Lišková, ČVUT v Praze, kap. 5, E
Zdeněk Sokol, ČVUT v Praze, kap. B
František Wald, ČVUT v Praze, kap. 1, 2, 3, F

Obrázky připravily kolegové z CTICM. Lektorovali Marek Pokorný, ČVUT v Praze, Antoním Uhlíř, ASTRON.

Monografie vznikla s finanční podporou Výzkumného fondu uhlí a oceli. Kromě šíření za účelem výzkumu a soukromého studia smí být publikace reprodukována, ukládána nebo předávána pouze s předchozím písemným svolením vydavatele v souladu s podmínkami licencí vydaných Licenční agenturou pro autorská práva podle zákona o autorských právech a patentové ochraně.

Autoři věnovali velkou pozornost tomu, aby zajistili, že veškeré údaje a informace obsažené v dokumentu jsou v době zveřejnění aktuální. Autoři a oponenti nenesou odpovědnost za nesprávnou interpretaci údajů a škody vzniklé nebo související s jejich použitím. S opravami kontaktujte laskavě Katedru ocelových a dřevěných konstrukcí, ČVUT v Praze.

Obsah

| | | |
|---|--|----|
| 1 | ÚVOD | 6 |
| | 1.1 Rozsah | 6 |
| | 1.2 Evropské návrhové normy | 6 |
| | 1.3 Národní předpisy pro požární návrh | 6 |
| 2 | ÚVOD DO POŽÁRNÍHO NAVRHOVÁNÍ | 7 |
| | 2.1 Zabránění prostorovému kolapsu | 7 |
| | 2.2 Evropské návrhové normy | 7 |
| 3 | LOKÁLNÍ POŽÁRY | 10 |
| | 3.1 Modely lokálního požáru | 10 |
| | 3.2 Zkoušky a validace | 11 |
| 4 | MODEL OHŘÍVÁNÍ SLOUPU S PLAMENEM VE TVARU KUŽELE | 19 |
| | 4.1 Princip řešení | 19 |
| | 4.2 Nástroj pro modelování tepelného toku z lokálního požáru | 20 |
| | 4.3 Teplota segmentu sloupu | 25 |
| 5 | NÁVRH SLOUPU | 28 |
| | 5.1 Verifikace | 28 |
| | 5.2 Zatížení | 28 |
| | 5.3 Únosnost | 29 |
| | 5.4 Výpočet únosnosti pomocí MKP | 31 |
| 6 | LITERATURA | 32 |
| | PŘÍLOHA A MODEL OHŘEVU SLOUPU PODLE PROJEKTU LOCAFI | 34 |
| | A.1 Princip řešení | 34 |
| | A.2 Sloup mimo oblast požáru | 34 |
| | A.3 Sloup uvnitř požáru | 44 |
| | A.4 Celkový tepelný tok přijatý částí sloupu | 45 |
| | PŘÍLOHA B APLIKACE METODY NA SLOUP MIMO OBLAST POŽÁRU | 46 |
| | B.1 Zadání | 46 |
| | B.2 Předběžná analýza | 46 |
| | B.3 Výpočet tepelného toku | 47 |
| | PŘÍLOHA C ALTERNATIVNÍ MODEL OHŘEVU SLOUPU | 54 |
| | C.1 Model teploty sloupu | 54 |
| | C.2 Řešené příklady | 61 |
| | C.2.1 Požár obráběcího stroje | 61 |
| | C.2.2 Požár vysokozdvížného vozíku | 64 |
| | C.2.3 Požár skladu provozních olejových náplní | 66 |
| | C.3 Validace modelu na zkušebnímu objektu AM Ostrava | 69 |
| | C.3.1 Zkušební objekt | 69 |
| | C.3.2 Příprava požárního experimentu | 70 |
| | C.3.3 Osazení měřících zařízení | 71 |
| | C.3.4 Průběh experimentu | 73 |
| | C.3.5 Předpověď teplot | 75 |
| | C.3.5.1 Teplota plynu v požárním úseku | 75 |

| | | |
|-------------------------------------|---|-----|
| C.3.5.2 | Studie citlivosti numerického modelu teploty sloupu | 76 |
| C.3.5.3 | Validace modelu - vliv vzdálenosti sloupu od požáru | 81 |
| PŘÍLOHA D VRSTEVNICE TEPELNÉHO TOKU | | 84 |
| PŘÍLOHA E ŘEŠENÉ PŘÍKLADY | | 109 |
| E.1 | Průmyslová budova | 109 |
| E.1.1 | Požární scénář | 109 |
| E.1.2 | Vstupní data pro program OZone | 110 |
| E.1.3 | Výsledky programu OZone | 111 |
| E.2 | Kancelářská budova | 112 |
| E.2.1 | Požární scénář | 112 |
| E.2.2 | Výpočet pomocí vrstevnic tepelného toku | 113 |
| E.2.3 | Vstupní data pro program OZone | 114 |
| E.2.4 | Výsledky programu | 115 |
| E.2.5 | Návrh sloupu | 116 |
| E.3 | Otevřená garáž | 120 |
| E.3.1 | Požární scénář | 120 |
| E.3.2 | Vstupní data do programu OZone | 121 |
| E.3.3 | Výsledky OZone | 122 |

1 ÚVOD

1.1 Rozsah

Monografie představuje metodu pro stanovení teploty sloupu vystaveného lokálnímu požáru. Metoda odpovídá evropským návrhovým normám EN1993-1-x. Dále monografie uvádí postup pro stanovení požární odolnosti ocelového sloupu. Výpočet vede na přesnější a ekonomičtější řešení než při použití tabulek. Monografie obsahuje:

- Obecný úvod do požárního navrhování včetně výběru návrhových scénářů a výpočetních modelů.
- Pokyny pro návrh lokálního požáru včetně shrnutí materiálů evropského výzkumného projektu LOCAFI.
- Návrhový model pro lokální požáry.
- Popis konstrukčních nástrojů dostupných pro modelování lokálních požárů, od zjednodušené analýzy pomocí grafů až po pokročilé modely konečnými prvky.
- Shrnutí návrhu požární odolnosti konstrukce ocelových sloupů.
- Příklady návrhu pro skutečné požární scénáře.

1.2 Evropské návrhové normy

Evropské návrhové normy, Eurokódy EN 1990 - EN 1999, umožňují návrh budov a inženýrských staveb a stavebních výrobků. Pro stanovení požární odolnosti ocelových a ocelobetonových prvků lze využít:

- ČSN EN 1990 Eurokód 0: Zásady navrhování konstrukcí^[1];
- ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru^[2];
- ČSN EN 1993-1-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru^[3];
- ČSN EN 1994-1-2 Eurokód 4: Navrhování ocelobetonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru^[4];

Každá část je doplněna národní přílohou, která přináší národně určené:

- dílčí součinitele spolehlivosti;
- metody řešení a
- informativní přílohy.

Národní příloha může obsahovat odkazy na publikace, které obsahují doplňující informace, které nejsou v rozporu s normou (NCCI) a mohou být uživateli k užitku. Pokyny uvedené v národní příloze se vztahují na stavby v dané zemi.

1.3 Národní předpisy pro požární návrh

V jednotlivých evropských zemích se národní požární předpisy liší. Projektant musí znát předpisy v zemi, ve které bude konstrukce umístěna a řešení konzultovat s příslušnými kontrolními a schvalovacími orgány. Návod k postupu vedoucí k získání souhlasu schvalovacích orgánů s použitím pokročilého požárního návrhu v jednotlivých evropských zemích je dostupný na adrese www.locafi.eu.

2 ÚVOD DO POŽÁRNÍHO NAVRHOVÁNÍ

Požár představuje vážnou hrozbu pro lidské životy. Je proto třeba, aby budovy byly navrženy a zkonstruovány tak, aby v případě požáru byla jejich stabilita zachována po dostatečně dlouhou dobu, aby bylo možné evakuovat osoby a zahájit opatření vedoucí k uhašení požáru. Požární návrh konstrukcí zahrnuje takové principy návrhu, které zajistí bezpečnost osob ve všech pravděpodobných požárních scénářích. Požární návrh obvykle řeší:

- bezpečnou evakuaci osob,
- minimalizaci rizika vzniku požáru,
- lokalizaci požáru v místě jeho vzniku,
- zastavení šíření požáru do jiných částí budovy nebo vně budovy,
- zajištění aktivní požární ochrany,
- zajištění proti zřícení budovy.

Opatření vedoucí k minimalizaci škod při požáru tvoří významnou část nákladů na stavbu. Nadměrná pasivní požární ochrana vede k nevhodným řešením bez účinku na požární bezpečnost budovy. Vyžaduje se vyvážené řešení, které poskytuje klientovi požadovanou ochranu za minimální cenu.

Informace o požárním řešení jsou shrnuty např. v publikacích^[5, 6, 7, 8].

Monografie přináší modely, které předpovídají teplotu sloupů při působení lokálního požáru. Pro známou teplotu lze poté určit požární odolnost prvku.

2.1 Zabránění prostorovému kolapsu

Zabránění prostorovému kolapsu budovy je jedním ze základních cílů požárního návrhu konstrukce. Prostorové zřícení představuje náhlou katastrofickou ztrátu stability konstrukce. Požární ochrana izoluje nosné prvky a zabráňuje jejich ohřevu nad kritickou teplotu. V řadě případů lze prokázat, že konstrukce je schopna požáru odolat bez požární ochrany.

Výběr tloušťky požární ochrany vyžaduje zohlednění:

- a) závažnosti požáru a předpokládaný nárůst teploty v prvku,
- b) vlastností materiálu protipožární ochrany,
- c) teploty, na kterou se může chráněný prvek zahřát před jeho zhroucením, zaveden termín „kritická teplota“.

Pravidla pro stanovení požární odolnosti konstrukce jsou uvedena v evropských návrhových normách, viz kapitola 2.2.

2.2 Evropské návrhové normy

Postup požárního návrhu konstrukce je předepsán v čl. 2.1 normy ČSN EN 1991-1-2 ve čtyřech po sobě jdoucích krocích:

- volba požárního scénáře,
- modelování požáru,
- popis rozvoje teploty v konstrukčních prvcích (pro ocelové konstrukce v ČSN EN 1993-1-2),
- popis mechanického chování konstrukce vystavené požáru (pro ocelové konstrukce v ČSN EN 1993-1-2).

2.2.1 Požární návrhové scénáře

Výběr požárního scénáře popisuje čl. 2.2 ČSN EN 1991-1-2. Nejjednodušší řešení je představa rozvoje tepla v požárním úseku podle nominální normové křivky. Pro většinu běžných požárních úseků je křivka vhodným a jednoduchým řešením.

Pro řadu budov jako je např. letiště či jiné velké otevřené prostory je nominální normová křivka nepoužitelná. V tomto případě je vhodné využít pokročilý model požáru založený na energetické bilanci. Tento postup zohledňuje vlastnosti materiálu, který hoří, a velikost požárního úseku a ventilační podmínky. Výběr vhodného požárního scénáře a návrhového modelu je základem vhodného návrhu.

2.2.2 Prostorový požár

Prostorový požár nastává při celkovém vzplanutí všech hořlavých materiálů nacházejících se v požárním úseku vlivem velkého tepelného toku, při tzv. „flashoveru“. Předpokládá se, že uvnitř úseku je teplota plynu rovnoměrně rozložena. Příklad prostorového požáru z požární zkoušky na experimentálním objektu je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Prostorový požár

Nominální normová teplotní křivka

Změnu teploty v prostoru a čase lze popsat nominální normová teplotní křivkou podle ČSN EN 1991-1-2: 2004. Křivka je referenční a nepopisuje konkrétní požární scénář. Nezahrnuje vliv materiálových vlastností konstrukcí požárního úseku, ventilace, ale požárního zatížení. Křivka byla vyvinuta před 140 lety pro zkoušení prvků v peci. Pro jednoduchost se začala používat k popisu teploty po prostorovém vzplanutí.

Nominální normová teplotní křivka vyjadřuje závislost teploty na čase. Je dána vztahem:

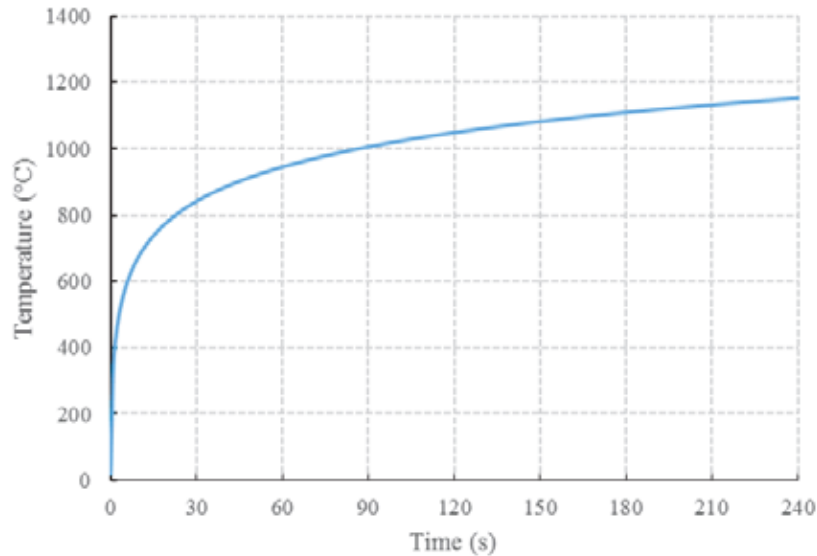
$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

kde

θ_g je teplota plynu v požárním úseku ve °C

t je čas v min

Obrázek 2.2 zobrazuje závislost teploty na čase podle nominální normové teplotní křivky.



Obrázek 2.2 Nominální normová teplotní křivka

Další modely požáru

Použití nominální normové křivky většinou vede k návrhu požární ochrany, která je ekonomicky přijatelná pro většinu běžných konstrukcí. Některé návrhy však mohou vyžadovat podrobnější a realističtější analýzu, což může vést k nižším návrhovým teplotám konstrukčních prvků.

Závažnost požáru v požárním úseku ovlivňuje:

- typ hořlavého materiálu s jeho hustotou a rozložením v požárním úseku,
- velikost a geometrie prostoru,
- podmínky ventilace a proudění vzduchu.

Závislost teploty na čase v požárním úseku lze alternativně modelovat pokročilými analytickými modely. Příloha A normy ČSN EN 1991-1-2 popisuje parametrickou teplotní křivku. Příloha D zónový energetický model a modelování pomocí dynamiky tekutin (CFD, z angl. Computational Fluid Dynamics), viz kap. 2.2.4. Pokročilé modely pro výpočet teploty plynu zahrnují geometrii prostoru, podmínky ventilace, vliv tepelných vlastností ohraničujících konstrukcí, rychlosti odhořívání a hustoty požárního zatížení.

2.2.3 Lokální požáry

U prostorového požáru se předpokládá, že teplota plynu se rovnoměrně zvětšuje. U relativně malých požárních úseků s rovnoměrně rozloženým požárním zatížením je tento předpoklad správný. V případě větších prostor, zvláště pokud je požární zatížení rozloženo na malé omezené ploše, je předpoklad velmi konzervativní a zcela nerealistický. V těchto případech lze využít analýzu dynamiky plynů nebo analytické modely lokálních požárů.

2.2.3 Analýza dynamiky plynů

Požár představuje složitou směs fyzických jevů, které lze popsat chemicky a/nebo fyzikálně, tj. energeticky. V dynamické analýze plynů (CFD) se energeticky popisují jednotlivé jevy v malých objemech a po časových úsecích se numericky integrují po celém požárním úseku. CFD lze použít k modelování různých požárních scénářů, plně rozvinutých požárů, lokálních požárů i požárů mimo budovy.

Obtížná pro přesný popis požáru je turbulence, kterou nelze deterministicky počítat v žádném měřítku. Pro přiblížení popisu skutečnosti a zrychlení náročných výpočtů se používají poloempirické modely. Rozsah modelů je velký a pečlivá volba nejvhodnějšího modelu pro danou situaci je obtížná. Z těchto důvodů CFD provádí pouze požární specialisté s dostatečnou praxí.

Úvod k CFD technikám modelování požárů lze nalézt v *Guide to the advanced fire safety engineering of structures*^[9] a v *Modelování dynamiky požáru v budovách*^[10].

3 LOKÁLNÍ POŽÁRY

Jak již bylo zmíněno výše, normativní pravidla návrhu konstrukcí obvykle předpokládají vznik prostorového požáru s rovnoměrnou teplotou v celém prostoru požárního úseku. Takový předpoklad není ale realistický pro velké požární úseky. Pokročilé návrhové modely požáru umožňují uživateli vzít v úvahu skutečné chování požárů, tedy i požár, který často setrvává jako lokální. V těchto případech je zásadní pochopit chování lokálního požáru a způsob, jak ovlivňuje ostatní oblasti požárního úseku.

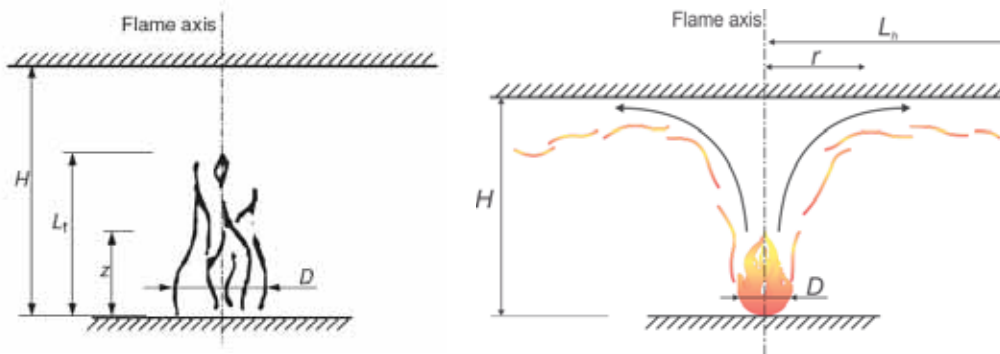


Obrázek 3.1 Zkouška zahřívání sloupu lokálním požárem

3.1 Modely lokálního požáru

Analytické modely lokálního požáru jsou uvedeny v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2 ^[2]. Příloha uvádí výpočet délky plamene a teploty nad ním. Je založena na pracích Heskestad^[11] a Hasemi^[12], které popisují vztah mezi velikostí požáru, definovanou rychlostí uvolňování tepla a průměrem požáru, a dalšími parametry jako je výška plamene a vnitřní teplota požáru.

Požáry, které zasahují úroveň stropu se šíří ve vodorovném směru. Model tuto skutečnost zohledňuje při výpočtu rozložení teploty uvnitř požárního úseku. Obrázek 3.2 ukazuje obě situace.



Obrázek 3.2 Geometrie lokálního požáru, (vlevo plameny nezasahují strop, vpravo zasahují)

Model v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2 neudává hodnoty teploty nebo tepelného toku přijaté prvky v dané vzdálenosti od zdroje požáru. Metoda uvažuje emisivitu plamene hodnotou 1,0, která je v porovnání s výsledky experimentů provedených v rámci projektu LOCAFI příliš konzervativní. V rámci projektu LOCAFI byl model přílohy C pro lokální požáry zdokonalen. Prostřednictvím experimentů, numerických a analytických prací byla navržena zdokonalená metoda, která zahrnuje vliv lokálního požáru na svislé prvky.

Zdokonalený model je uveden v kapitole 4 a podrobně popsán v příloze A. Oddíl 3.2 popisuje zkoušky pro validaci modelu.

3.2 Zkoušky a validace

3.2.1 Zkoušky na Univerzitě v Liège

První skupina 24 zkoušek v rámci projektu LOCAFI byla uskutečněna na Univerzitě v Liège. Podrobné informace o testech je možné nalézt v dokumentu Deliverable 6 projektu LOCAFI^[13].

Během experimentů byly zkoušeny dva druhy hořlavých kapalin tak, aby byla dosažena stejná rychlost uvolňování tepla (HRR). Použité kapaliny byly N heptan a nafta.

Testy byly prováděny se sloupem ve středu požáru a bez sloupu. Potvrdilo se, že přítomnost sloupu nemá významný vliv na HRR.

Hořlavá kapalina byla umístěna v pánvích pěti průměrů od 600 mm do 2200 mm. Každý průměr byl zkoušen s N-heptanem a naftou. Palivo bylo dodáváno do nádrže stálou rychlostí. Řešení umožnilo stálé HRR o velikosti 500 kW/m².

Hodnota HRR pro zkoušky v Liège byla vypočtena pomocí rovnice (3.1), kde 675 kg/m³ je hustota paliva a 44 000 kJ/kg měrné teplo, viz LOCAFI deliverable D7^[15].

$$HRR = \frac{Flow}{60} \times \frac{675}{1000} \times 44000 \quad (3.1)$$

Tabulka 3.1 shrnuje provedené zkoušky.



Obrázek 3.3 Přidávání paliva při zkoušce s pánví o průměru 2 m, viz LOCAFI Deliverable 15^[14]

Tabulka 3.1 Shrnutí zkoušek na Univerzitě v Liège

| Zkouška | Průměr (m) | Palivo | Změřené HRR (kW) |
|---------|------------|--------|------------------|
| 1 | 0,6 | Nafta | 185 |
| 2 | 0,6 | Heptan | 173 |
| 3 | 0,6 | Nafta | 154 |
| 4 | 0,6 | Heptan | 149 |
| 5 | 1,0 | Nafta | 505 |
| 6 | 1,0 | Heptan | 485 |
| 7 | 1,0 | Nafta | 474 |
| 8 | 1,0 | Heptan | 455 |
| 9 | 1,4 | Nafta | 979 |
| 10 | 1,4 | Heptan | 950 |
| 11 | 1,4 | Nafta | 955 |
| 12 | 1,4 | Heptan | 921 |
| 13 | 1,4 | Nafta | 979 |
| 14 | 1,4 | Heptan | 950 |
| 15 | 1,8 | Nafta | 1620 |
| 16 | 1,8 | Heptan | 1569 |
| 17 | 1,8 | Nafta | 1565 |
| 18 | 1,8 | Heptan | 1515 |
| 19 | 2,2 | Nafta | 2421 |
| 20 | 2,2 | Heptan | 2341 |
| 21 | 2,2 | Nafta | 2365 |
| 22 | 2,2 | Heptan | 2292 |
| 23 | Dřevo | | |
| 24 | Dřevo | | |

3.2.2 Zkoušky v FireSERT na Univerzitě v Ulsteru

V laboratoři FireSERT na Univerzitě v Ulsteru bylo vyzkoušeno 52 vzorků. Zkoušky byly rozděleny do dvou částí na zkoušky bez stropu, viz tabulka 3.2, a zkoušky se stropem, viz tabulka 3.3.

Podrobné informace o zkouškách jsou v dokumentu Deliverable 7^[15].

Zkoušky bez stropu

V rámci první části se zkoušelo 31 vzorků, viz tabulka 3.2. Vzdálenost mezi sloupem a požárem se u každé zkoušky lišila. Požární zatížení se lišilo palivem, tj. nafta, petrolej a dřevěné hranoly, velikostí požáru, tj. počet a velikost pánví, a polohou. Bylo zkoušeno několik ocelových sloupců, které umožnily zohlednit tvar a velikost průřezu.

Během experimentů byl zjištěn nesoulad mezi naměřenými hodnotami uvolňování tepla a teplem skutečně uvolněným. Pro účely numerického modelování byly zavedeny opravené hodnoty, jak bylo popsáno v dokumentu LOCAFI Deliverable 8-9^[16]. Tabulky 3.2 a 3.3 uvádějí původní měření a opravené hodnoty.

Na obrázku 3.4 jsou vidět dvě zkoušky. Na levé straně jsou zobrazeny pánve na kapalné palivo, na pravém obrázku dřevěné hranice.



Obrázek 3.4 Uspořádání zkoušky v laboratoři FireSERT, vlevo pánve s kapalným palivem a vpravo dřevěné hranice

Zkouška se stropem

V druhé části bylo zkoušeno 21 uspořádání. Zkoušky jsou shrnuty v tabulce 3.3. Obrázek 3.5 zobrazuje plamen, který zasahuje strop při testu Strop - O38.

Tabulka 3.2 Shrnutí zkoušek bez stropu na FireSERT

| Zkouška | Palivo | Průměr (m) a počet | HRR (kW) | |
|----------------|------------------|--------------------|----------|----------|
| | | | Měřeno | Opraveno |
| Sloup O2 - O1 | Petrolej | 0,7 | 783 | 503 |
| Sloup O2 - O2 | Petrolej | 0,7 | 728 | 515 |
| Sloup O2 - O3 | Nafta | 0,7 | 640 | 468 |
| Sloup O2 - O4 | Nafta | 0,7 | 543 | 442 |
| Sloup O2 - O5 | Nafta | 0,7 | 485 | 388 |
| Sloup O2 - O6 | Nafta | 0,7 | 640 | 441 |
| Sloup O2 - O7 | Petrolej | 0,7 | 658 | 493 |
| Sloup O2 - O8 | Petrolej | 1,6 | 4378 | 3492 |
| Sloup O2 - O9 | Petrolej | 0,7 × 4 | 3388 | 2665 |
| Sloup O2 - O10 | Nafta | 1,6 | 3617 | 2725 |
| Sloup O2 - O11 | Nafta | 0,7 × 4 | 2601 | 2015 |
| Sloup O2 - O12 | Petrolej | 1,6 | 3713 | 2648 |
| Sloup O2 - O13 | Nafta & petrolej | 0,7 × 2 | 2899 | 2428 |
| Sloup O2 - O14 | Dřevo | 0,5 čtverec | 1944 | 1433 |
| Sloup I2 - I1 | Petrolej | 0,7 | 737 | 529 |
| Sloup I2 - I2 | Petrolej | 0,7 | 663 | 484 |
| Sloup I2 - I3 | Petrolej | 0,7 | 692 | 559 |
| Sloup I2 - I4 | Petrolej | 0,7 | 806 | 637 |
| Sloup I2 - I5 | Nafta | 0,7 | 688 | 578 |
| Sloup I2 - I6 | Nafta | 0,7 | 658 | 513 |
| Sloup I2 - I7 | Nafta | 0,7 | 547 | 466 |
| Sloup I2 - I8 | Nafta | 0,7 | 676 | 484 |
| Sloup I2 - I9 | Petrolej | 1,6 | 4762 | 3750 |
| Sloup I2 - I10 | Petrolej | 1,6 | 3894 | 3200 |
| Sloup I2 - I11 | Petrolej | 0,7 × 3 | 2255 | 1873 |
| Sloup I2 - I12 | Petrolej | 0,7 × 2 | 1439 | 1192 |
| Sloup I3 - I13 | Petrolej | 0,7 | 736 | 570 |
| Sloup I3 - I14 | Petrolej | 0,7 | 708 | 525 |
| Sloup I3 - I15 | Petrolej | 0,7 | 617 | 520 |
| Sloup I3 - I16 | Petrolej | 0,7 × 2 | 1335 | 1114 |
| Sloup H2 - H1 | Petrolej | 0,7 | 641 | 438 |
| Sloup H2 - H2 | Petrolej | 0,7 | 610 | 514 |
| Sloup H2 - H3 | Petrolej | 0,7 | 628 | 458 |
| Sloup H2 - H4 | Petrolej | 0,7 | 630 | 484 |
| Sloup H2 - H5 | Petrolej | 0,7 × 2 | 1425 | 1106 |
| Sloup H2 - H6 | Petrolej | 0,7 × 3 | 2402 | 1771 |
| Sloup H2 - H7 | Petrolej | 1,6 | 3828 | 2955 |

Tabulka 3.3 Shrnutí zkoušek se stropem na FireSERT

| Zkouška | Palivo | Průměr (m) | HRR (kW) | |
|-------------|--------------|-------------------|----------|----------|
| | | | Měřeno | Opraveno |
| Strop - O21 | Petrolej | 0,7 | 739 | 563 |
| Strop - O22 | Petrolej | 0,7 | 759 | 575 |
| Strop - O23 | Petrolej | 0,7 | 814 | 511 |
| Strop - O24 | Petrolej | 0,7 | 763 | 607 |
| Strop - O25 | Petrolej | 0,7 | 476 | 512 |
| Strop - O26 | Petrolej | 1,6 | 3653 | 2885 |
| Strop - O27 | Nafta | 0,7 | 515 | 496 |
| Strop - O28 | Nafta | 0,7 | 397 | 468 |
| Strop - O29 | Nafta | 0,7 | 633 | 490 |
| Strop - O30 | Nafta | 0,7 | 614 | 472 |
| Strop - O31 | Petrolej | 0,7 . × 2 | 1420 | 1074 |
| Strop - O32 | Nafta | 0,7 . × 2 | 1185 | 952 |
| Strop - O33 | Dřevěné latě | 0,5 čtvercové | 440 | 295 |
| Strop - O34 | Dřevěné latě | 0,5 čtvercové | 400 | 273 |
| Strop - O35 | Dřevěné latě | 0,5 čtvercové × 2 | 702 | 666 |
| Strop - O36 | Dřevěné latě | 1 × 1 × 0,5 | 1410 | 1870 |
| Strop - O37 | Petrolej | 0,7 . × 4 | 3215 | 2506 |
| Strop - O38 | Dřevěné latě | 1 × 1 × 0,5 | 1788 | 2253 |
| Strop - O39 | Nafta | 1,6 | - | - |
| Strop - O40 | Petrolej | 0,7 | - | - |
| Strop - O41 | Dřevěné latě | 1 × 1 × 0,5 | - | - |



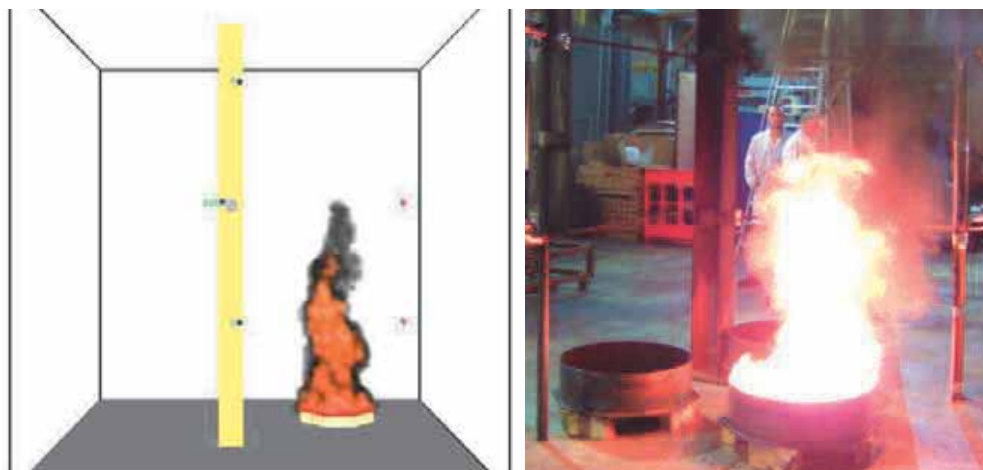
Obrázek 3.5 Požár zasahující strop

3.2.3 Numerické modelování

Z důvodu prohloubení poznatků o zkouškách byla provedena numerická studie. Hlavním cílem byla extrapolace zkušebních dat mimo rozsah testů, včetně požárů s větším průměrem, které by byly v laboratořích nebezpečné.

Pro numerickou práci byl použit software Fire Dynamics Simulator (FDS) ^[17], který je založen na principech CFD metody. Obrázek 3.6 porovnává fotografii skutečného plamene v testu s předpokládaným plamenem modelovaným pomocí softwaru FDS.

Oheň je dynamický a variabilní jev, který je obtížné předpovědět výpočetně. Program FDS potřebuje množství vstupních dat, které se často liší v závislosti na konkrétní zkušce. Vstupy modelu zahrnují účinnost spalování, množství sazí, radiační ztráty, model turbulence, parametry turbulenčního modelu a počet radiačních úhlů. Rozhodující vstupy jsou popsány dále.



Obrázek 3.6 Validace tvaru plamene v FDS pomocí experimentu, zkouška Sloup I2 - I11 ^[13]

Model turbulence

Vhodný model turbulentního proudění je důležitou částí modelování pomocí CFD. Při požáru turbulence ovlivní výšku a polohu plamene v čase. Popis fyzikálních procesů spojených s turbulencí nelze deterministicky popsat dynamickou analýzou plynů v reálných objemech. Programy jako FDS využívají globálních aproximačních algoritmů, z nichž každý má výhody a nevýhody podle okrajových podmínek. FDS 5 používá starší, ale osvědčený model Smagorinsky, zatímco FDS 6 umožňuje výběr z řady dalších modelů turbulence jako je Smagorinsky, Vreman a modelu Deardoff ^[17, 18], který je v programu nastaven jako výchozí.

V rámci numerické studie byly provedeny studie citlivosti, jejichž cílem bylo prozkoumat změnu teplot získaných při použití jednotlivých modelů turbulence. Studie ověřovaly vliv parametrů, které řídí chování v rámci každého z algoritmů. Model Constant Smagorinsky vykazoval konzistenci s výsledky zkoušek, přičemž konstanta Smagorinskyho modelu byla rovna 0,1.

Radiace plamene

Část energie se z plamenů uvolní radiací. Podle čl. 13.1.1 textu uživatelské příručky FDS User Guide^[16] závisí radiace na teplotě plamene a chemickém složení paliva. Hodnotu nelze při reálném rozlišení vypočítat s dostatečnou přesností. Program využívá globální přednastavenou a ověřenou hodnotu.

Ve výchozím nastavení FDS se doporučuje hodnota 0,35, tj. 35 % tepla radiací a 65 % konvekci. V numerické studii byly zkoušeny i další procentuální rozdělení. Hodnoty výchozího nastavení se ale ukázaly jako nejvíce vhodné.

Příčné proudění

Numerické simulace obvykle předpokládají ustálené prostředí, ve kterém vzduch stoupá svisle nahoru a plameny jsou svislé. Příčné proudění bývá zanedbáváno. V reálných podmínkách je tento předpoklad zřídka pravdivý. Obvykle je plamen ovlivněn prouděním vzduchu, který způsobuje naklání plamene. Ve zkouškách v čl. 3.2.1 a 3.2.2 se plamen významně naklání, viz obrázek 3.7.

Naklání plamene bylo při zkouškách jasně viditelné a pro dosažení přesnosti modelu bylo také zásadní.



Obrázek 3.7 Zkouška Strop - O36 s náklonem plamene

3.2.4 Hlavní poznatky

Zkoušky v projektu LOCAFI poskytly velké množství údajů o případech lokálního požáru, které nejsou zahrnuty v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2^[2].

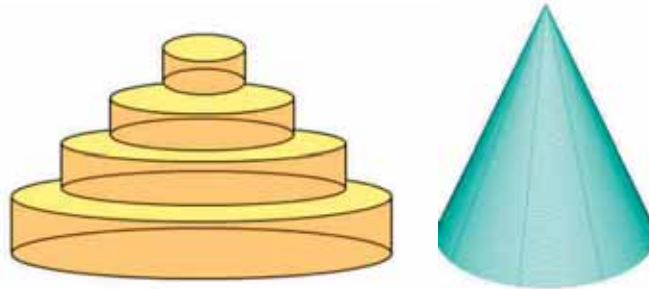
Experimenty na Univerzitě v Liège byly zaměřeny na sloupy obklopené plamenem. Byl zkoumán vliv sloupce na výšku a teplotu plamene. Během zkoušek bylo prokázáno, že přítomnost sloupu vytváří vyšší plamen. Nicméně výška a teploty plamene podél svislé osy, které předpovídá ČSN EN 1991-1-2^[2], zůstávají na bezpečné straně s nebo bez sloupu v oblastech plamene a v oblastech mimo něj.

Zkoušky na Univerzitě v Ulsteru byly zaměřeny na sloupy nacházející se mimo oheň. Výsledky zkoušek prokázaly, že výška a teploty plamene podél svislé osy zdroje požáru podle ČSN EN 1991-1-2^[2] jsou na bezpečné straně. Zkoušky poskytly velké množství dat pro validaci analytického modelu. Zkoušky také ukázaly, že příčné proudění má vliv na teploty a teplo měřené v blízkosti zdroje požáru, zatímco tepelný tok mimo oheň není ovlivněn.

4 MODEL OHŘÍVÁNÍ SLOUPU S PLAMENEM VE TVARU KUŽELE

4.1 Princip řešení

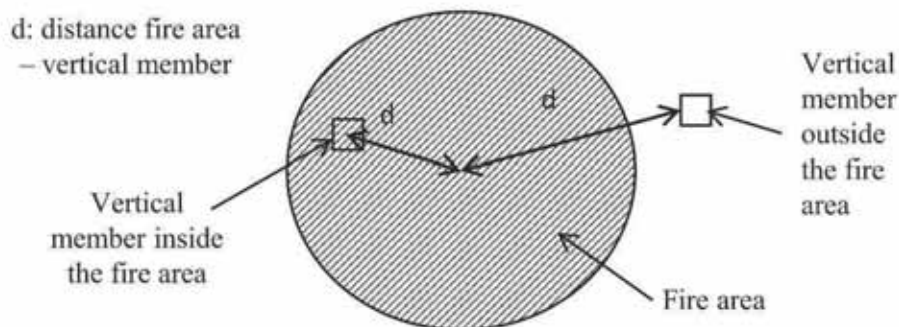
Na základě zkoušek byl vyvinut nový model, který poskytuje přijatelně konzervativní výsledky. Rozhodující je diskretizace ohně do virtuálního plamene ve tvaru kužele, viz obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 Model plamene ve tvaru kužele

Radiční tepelný tok z virtuálního plamene lze vypočítat na libovolném místě pomocí běžných technik přenosu tepla sáláním. Jakmile je znám tepelný tok, může být určena teplota sloupu v libovolné poloze.

Pro sloup uvnitř plamene, je teplota řízena převážně konvekcí. Pro sloup mimo plamen závisí teplota převážně na radiaci, viz obrázek 4.2.



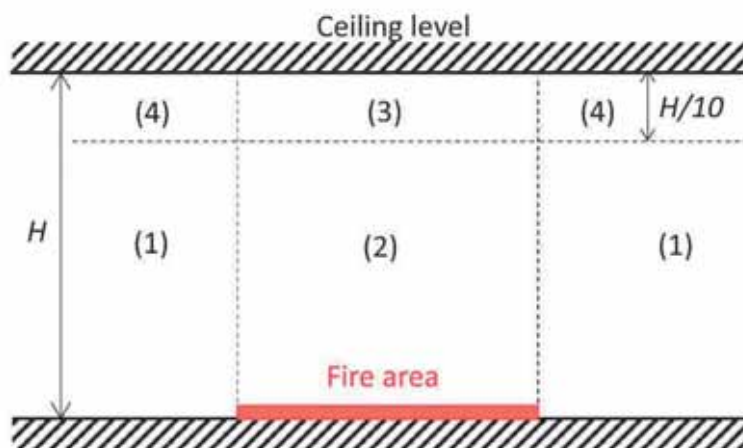
Obrázek 4.2 Poloha požáru a sloupu

Model předpokládá, že tvar požáru je na zemi kruhový. Platí pro požáry, které nepřesahují průměr 10 m a HRR 50 MW.

Úroveň tepelného toku přijatého sloupem závisí na tom, ve které z následujících čtyř oblastí se nachází:

- 1) mimo oheň,
- 2) uvnitř ohně,
- 3) uvnitř ohně, ve vrstvě kouře,
- 4) mimo oheň, ve vrstvě kouře,

Oblasti jsou popsány na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Oblasti polohy sloupu vůči lokálnímu požáru

Před projektem LOCAFI bylo k dispozici několik modelů pro oblasti 2, 3 a 4, ale pro oblast 1 byl k dispozici jen model vyvinutý na ČVUT v Praze^[19-23].

Model vyvinutý v rámci projektu LOCAFI popisuje všechny oblasti s důrazem na oblast 1. Je popsán v příloze A. Kapitola A.2 popisuje model pro sloupy mimo požární oblast, tj. oblasti 1 a 4. Oddíl A.3 popisuje model sloupů v oblasti požáru, tj. oblasti 2 a 3.

Většina požárů má tvar kuželovitého tvaru. Střed kužele se může pohybovat podle větru. Z tohoto důvodu jsou oblasti 2 a 3 aproximovány do tvaru válců, jejichž boky jsou vyrovnány s okrajem požáru. Doporučená hodnota pro výšku oblasti 3 a 4 je $H/10$. Hodnotu lze upravit podle přílohy A.

Metoda je rozdělena do dvou kroků - výpočet dopadajícího tepelného toku přijatého segmentem sloupu a výpočet teploty segmentu.

4.2 Nástroj pro modelování tepelného toku z lokálního požáru

Analytický model, který popisuje přestup tepla do ocelových sloupů z lokálního požáru je numericky poměrně složitý a není vhodný pro použití v projekční praxi. Tato část popisuje čtyři nástroje, které využívají model uvedený v příloze A tohoto dokumentu.

4.2.1 Vrstevnice tepelného toku

Vrstevnice tepelného toku umožňují určit tepelný tok pro danou oblast sloupu jednoduchou metodou bez použití výpočtu a to pomocí grafů. Grafy byly připraveny pomocí modelu uvedeného v příloze A této monografie.

Vrstevnice popisují tepelný tok v určitých vzdálenostech od požáru, který je popsán průměrem a HRR, ve svislém a vodorovném směru. Tepelné toky vypočítané pomocí modelu Heskestad, viz kapitola A.3, pro oblast 2 jsou rovněž uvedeny v grafu. Vrstevnice tepelného toku pro další případy jsou uvedeny v příloze D.

Návrh pomocí vrstevnic tepelného toku

Pro přibližný výpočet pomocí vrstevnic je třeba požární scénář zjednodušit:

- tvar ohně popsat ekvivalentní kruhovou oblastí,
- sloup popsat jako rovnoramenný obdélníkový průřez, podle přílohy G v normě ČSN EN 1991-1-2^[2],
- sloup směřuje k ohni nejširší plochou.

a)

Náhradní plochu kruhu lze stanovit ze vztahu

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ m} \quad (4.1)$$

kde

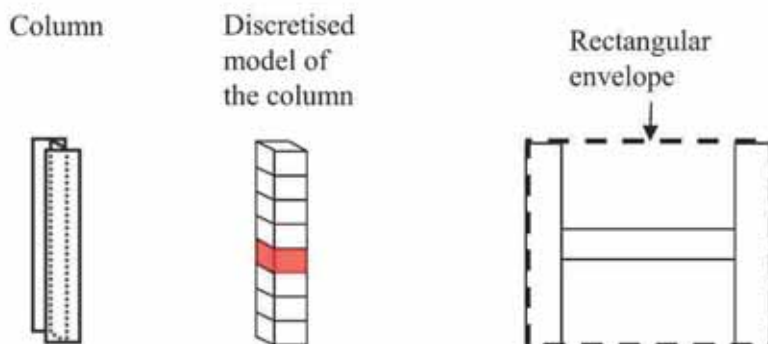
D_{fire} je náhradní poloměr (m)

S plocha lokálního požáru (m²)

U složitých tvarů nebo tvarů s poměrem stran nad 2 lze rozdělit oblast na menší požáry, které lze lépe aproximovat jako kruhové plochy. Tepelné toky z více požárů mohou být sečteny, jak je uvedeno v části A.4.

b)

Okolo průřezu sloupu se nakresí obdélníková obálka bez ohledu na původní průřez, viz obrázek 4.4. Tento postup odpovídá metodě uvedené v Příloze G normy ČSN EN 1991-1-2^[2]. Zjednodušení geometrie řezu zabrání komplikacím se zastíněním.



Obrázek 4.4 Modelování sloupu průřez H

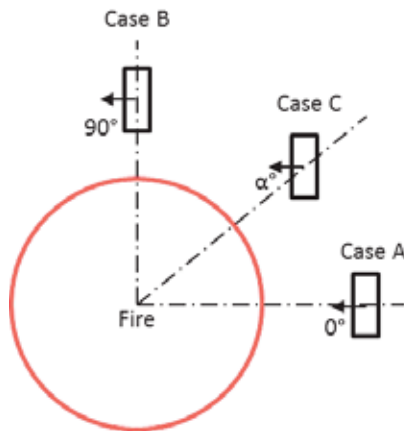
c)

Orientace je definována vzhledem k přímce, která spojuje sloup s osou požáru, obrázek 4.5.

Pro návrh se sloup otočí tak, aby největší plocha opsaného obdélníku byla kolmo k ose, což je nejkonzervativnější předpoklad, viz případ A na obrázku 4.5. Výchozím bodem pro výpočet konzervativně leží ve středu plochy vystavené ohni.

Vzdálenost k ose x se považuje za vzdálenost mezi středem plochy sloupu a středem ohně.

V případě, že neexistují přesné vrstevnice tepelného toku, je možné konzervativně zvolit další s nejvyšším HRR a průměrem.



Obrázek 4.5 Možná orientace sloupu

Pro odečtené hodnoty tepelného toku z vrstevnicového grafu se přijatý průměrný tepelný tok vypočte rovnicí (4.2). Hodnoty závisí na šířce vystavené plochy.

$$\dot{h}_{m,r} = \frac{l_1 \dot{h}_{r,1} + 2l_2 \dot{h}_{r,2}}{2l_1 + 2l_2} \quad (4.1)$$

kde:

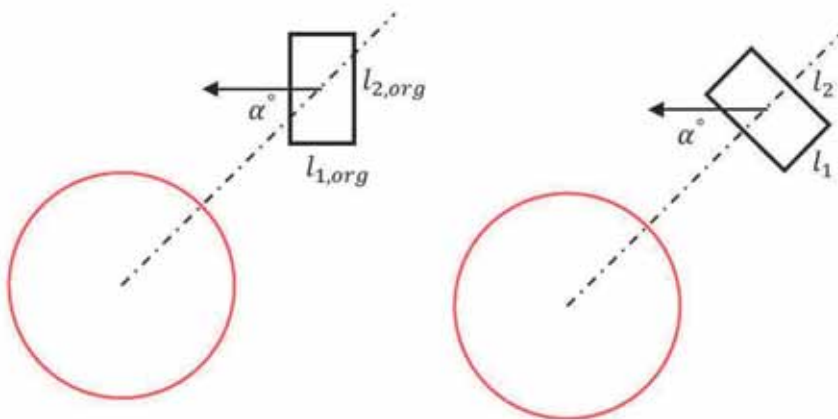
$\dot{h}_{m,r}$ je průměrný tepelný tok přijatý prvkem

$\dot{h}_{r,1}$ je tepelný tok přijatý plochou 1, který se určí z vrstevnic

$\dot{h}_{r,2}$ je tepelný tok přijatý plochou 2, který se určí z vrstevnic

Konzervativně lze tepelný tok pro plochu pod úhlem 90° uvažovat 50% tepelného toku přijatého plochou pod úhlem 0°.

U sloupů s plochami, které nejsou orientovány kolmo k ohni, viz příklad C na obrázku 4.5, se volí šířky ploch podle obrázku 4.6.



Obrázek 4.6 Úprava polohy sloupu pro zjednodušený výpočet

Původní šířky $l_{1,org}$ a $l_{2,org}$ lze upravit na

$$l_2 = l_{1,org} \times \sin \alpha + l_{2,org} \times \cos \alpha \quad (4.2)$$

$$l_1 = (l_{1,org} + l_{2,org}) - l_2 \quad (4.3)$$

Tepelný tok přijatý prvkem pak lze počítat podle vztahu (4.1).

Vrstevnice tepelného toku předpokládají, že plamen nezasahuje strop. Pokud se z rovnice (A.2) zjistí, že se plamen dotýká stropu, uvažuje se s oblastí 4, viz obrázek 4.3. Tepelný tok se vypočte pomocí rovnice (A.21). Pro většinu konstrukcí bude tepelný tok v oblasti 4 vyšší než v oblasti 1. Proto bude nejvyšší teplota sloupu pro výpočet jeho požární odolnosti uvedené v kapitole 5 v oblasti 4.

4.2.2 Tabulkový procesor

Větší přesnost lze dosáhnout výpočtem pomocí tabulkového procesoru, který je založen na modelu uvedeném v příloze A a D. Tabulka uvažuje skutečné polohové faktory mezi plamenem a stěnou sloupu. Příklady výpočtů jsou uvedeny na obrázcích B.9 a B.11.

4.2.3 Zónový model

Alternativou k ručnímu výpočtu jsou nástroje, které využívají zónový model, připravené v projektu LOCAFI. Jedením ze zónových modelů je program OZone, který počítá teplotu ocelového prvku zahřívajícího podle nominální normové křivky, lokálního požáru a prostorového požáru, který je řešen zónovým modelem. Spolu s dalšími programy společnosti ArcelorMittal jej lze volně stáhnout na

<http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html>

OZone umožňuje použití jednozónových nebo dvouzónových modelů podle přílohy D normy ČSN EN 1991-1-2^[2]. Požární úsek je rozdělen na zóny, ve kterých je stejná teplota plynu. U jednozónových modelů je uvažována stejná teplota v celém požárním úseku. Model odpovídá plně rozvinutým požárům. Dvouzónové modely jsou vhodnější, pokud je požár řízený ventilací. V tomto případě dvouzónový model lépe popisuje rozložení teploty v požárním úseku. Nachází se zde horní vrstva horkých plynů v blízkosti stropu a studenější spodní vrstva plynů.

V otevřených nebo velkých prostorech, kde nedochází k prostorovému vzplanutí, se teplota modeluje analytickými modely pro lokální požár. V programu OZone se využívá model připravený v projektu LOCAFI.

Jak je uvedeno v kapitole A.2.1.1, sálání se modeluje pomocí virtuálního plamene, který vyzařuje ve všech směrech. První krok výpočtu definuje geometrii virtuálního plamene a rozložení teploty v čase. Virtuální plamen může mít válcový nebo kuželový tvar. Válcový plamen je jednodušší, ale nadhodnocuje tepelný tok sáláním. OZone využívá kuželovitý tvar virtuálního plamene, u kterého bylo prokázáno, že předpovídá zahřívání sloupu přesněji.

V případech, kdy je plamen vyšší než úroveň stropu, výška kužele se rovná výšce stropu. Lze uvažovat i přídatný sálavý válec, který zohlední plamen pod stropem mimo válec nebo kužel.

Radiace je v programu OZone řešena bez integrace po plochách, která je použita např. v programu SAFIR, viz kapitolu 4.2.4. Model je založen na tvarových součinitelích pro daný tvar prvku, viz (A.9).

Tepelný tok se počítá samostatně pro čtyři plochy obvodu profilu sloupu. Průměrná hodnota toku se použije na obvod sloupu. Zastínění se ve výpočtu nezohledňuje. Spojení mezi lokálním požárem a prostorovým požárem umožňuje kombinovat vlivy jejich radiačních tepelných toků.

Vstupy pro modelování lokálního požáru zahrnují: polohu, průměr a vývoj HRR v čase pro maximálně pět požárů.

Pro prostorový požár je potřeba popsat požární úsek a požární charakteristiky podle přílohy E normy ČSN EN1991-1-2^[2].

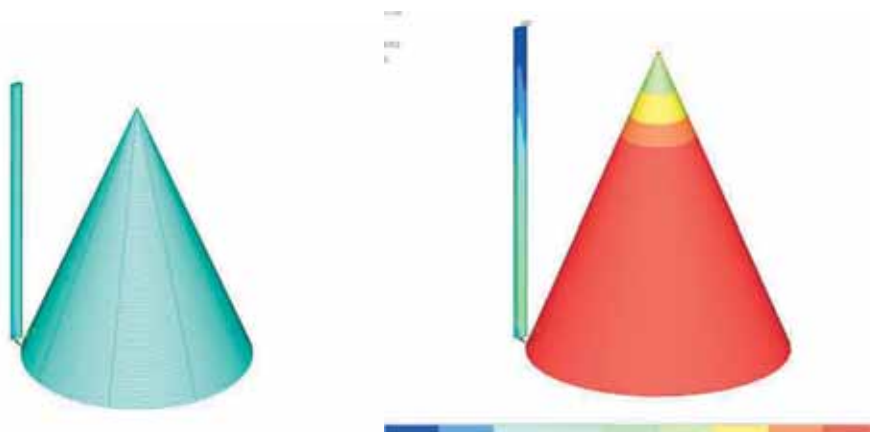
Není-li definován požární úsek, předpokládá se, že požár probíhá v otevřeném prostoru. Pokud je požární úsek popsán společně s lokálním požárem, OZone vypočítá teplotu v teplé a chladné zóně v požárním úseku podle plochy požáru. Program nabízí teplotu v horké zóně, od lokálního požáru a jejich střední hodnotu.

4.2.4 MKP modely

Pokud je potřeba přesnějšího výpočtu, lze použít MKP modelování pomocí softwarů, jako např. SAFIR®. ABAQUS nebo ANSYS®. Výhody těchto výpočtů jsou:

- přesnější tvar kužele pro aproximaci virtuálního plamene,
- skutečný tvar sloupu, včetně zastínění,
- samostatný výpočet součinitele radiace pro jednotlivé povrchy,
- v průřezu lze uvažovat s nerovnoměrným ohřátím,
- lze spojit teplotní a mechanický výpočet a uvažovat s teplotní deformací sloupu.

Různé programy nabízí různé možnosti výpočtu. Jako příklad je dále popsáno řešení, které nabízí program SAFIR. V programu SAFIR jsou nabízeny dva tvary plamene - válcový a kuželový. Uživatel si může vybrat. Příklad kuželového plamene je uveden na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7 Tvar plamene (vlevo) a povrchová teplota (vpravo) v programu SAFIR

Teplotní model počítá teplotu pomocí série 2D analýz v každém integračním bodě všech konečných prvků. Prvky mohou mít libovolnou polohu v prostoru.

Tepelný tok se určuje pro každou plochu konečného prvku. Dopadající tepelný tok z lokálního požáru na konečný prvek je anizotropní. Povrchy, které jsou orientovány směrem k ohni, jsou více oslábány. Povrchy na opačné straně vůbec.

Tepelný tok dopadající na povrch sloupu sáláním z lokálního požáru se počítá po vrstvách.

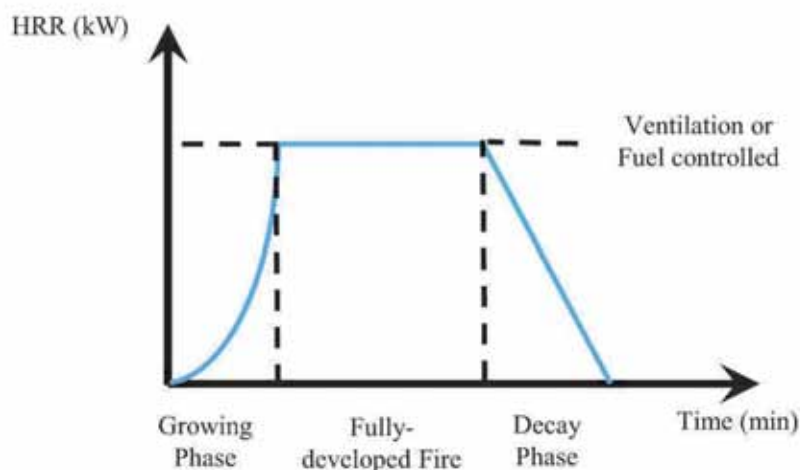
Zdroj ohně je rozdělen na vodorovné vrstvy o stejné tloušťce 0,1 m, což je menší než hodnota 0,5 m, která se doporučuje pro ruční výpočet, viz kapitola A.2.1.1. Každá kruhová vrstva je rozdělena na 36 částí po 10 stupních. Dělení definuje vnější plochy plamene. Radiační tok z každé plochy je vypočítán pro každou plochu průřezu.

Konstrukci lze vystavit jednomu nebo několika lokálním požárům. U více požárů se tepelné toky sčítají.

4.3 Teplota segmentu sloupu

Dále je popsán nárůst teploty sloupu vlivem přijatého tepelného toku. Pro výpočet požární odolnosti sloupu je třeba znát jeho teplotu, viz kapitola 5.

Rychlost uvolňování tepla (HRR) lze stanovit z přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2 [2]. Křivka, viz obrázek 4.8, se dělí na tři části: rostoucí fáze, konstantní (plně rozvinutá fáze) a klesající (fáze chladnutí). Konstantní část má na teplotu prvku největší vliv.



Obrázek 4.8 Křivka HRR podle přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2^[2]

Teplota se uvolňuje z plamene v čase, což se zohlední výpočtem po krocích. Náročnost výpočtu je dána změnou tepelného toku po výšce sloupu.

Pokud segment sloupu přijímá tepelný tok, jeho teplota stoupá. Ve fázi řízené palivem je sálání konstantní. Bude dosažen rovnovážný stav, ve kterém je tepelný tok přijatý segmentem sloupu vyvážen s tepelným tokem vyzařovaným do okolního prostředí. Taková teplota sloupu se nazývá jako teplota v ustáleném stavu.

Pokud má segment velký objem, může být doba k dosažení teploty ustáleného stavu dlouhá. V řadě případů je čas potřebný k dosažení ustáleného stavu delší než doba trvání požáru a ustálený stav není nikdy dosažen.

Konzervativně lze předpokládat, že rovnovážný stav je vždy dosažen. To snižuje náročnost výpočtu, protože není časově závislý. Při uvažování ustáleného stavu může být teplota prvku výrazně vyšší než je skutečná. Přírůstkovou metodou v kapitole 4.3.2 s uvažováním časové závislosti je možné dosáhnout nižších teplot.

Metoda pro předpověď teploty se vybere na základě požadavků na přesnost odhadu tepelného toku. Pro každou ze čtyř metod v kapitole 4.2 se doporučuje:

- Pro výpočet pomocí vrstevnic se celkový tepelný tok stanoví pro konstantní fázi. Teplota se stanoví z rovnic uvedených v kapitole 4.3.1.
- Pro výpočet pomocí tabulek se doporučuje vypočítat celkový tepelný tok přijatý vrstvou sloupu pro hodnoty HRR 25%, 50%, 75% a 100% maxima. Teplota se stanoví pomocí přírůstkové metody v kapitole 4.3.2.
- Program Ooóne počítá přírůstkově.
- MKP program vypočítá tepelný tok a teplotu v jednom kroku.

Vlivem různého tepelného toku na jednotlivé vrstvy sloupu jsou teplota těchto vrstev různé. Vedením se teplota mezi vrstvami vyrovnává. Jev lze popsat ve 3D modelu sloupu. Numerické analýzy prokázaly, že jev je omezený a rozložení teploty lze aproximovat řadou 2D analýz po vrstvách.

4.3.1 Řešení v ustáleném stavu

Z průměrného radičního tepelného toku přijatého segmentem sloupu lze průměrnou teplotu vypočítat přírůstkovou metodou např. podle ČSN EN 1993-1-2^[3]. Daný segment se nachází mimo plamen a proto bude probíhat výměna tepla prouděním se vzduchem o teplotě 20°C – vrstva bude ochlazována (nezahrnuje případ, kdy se jedná o prostorový požár). Radiací segment sloupu absorbuje $\varepsilon \dot{h}_{m,r}$ a bude sálat teplo do okolí. Rovnice tepelné bilance je proto:

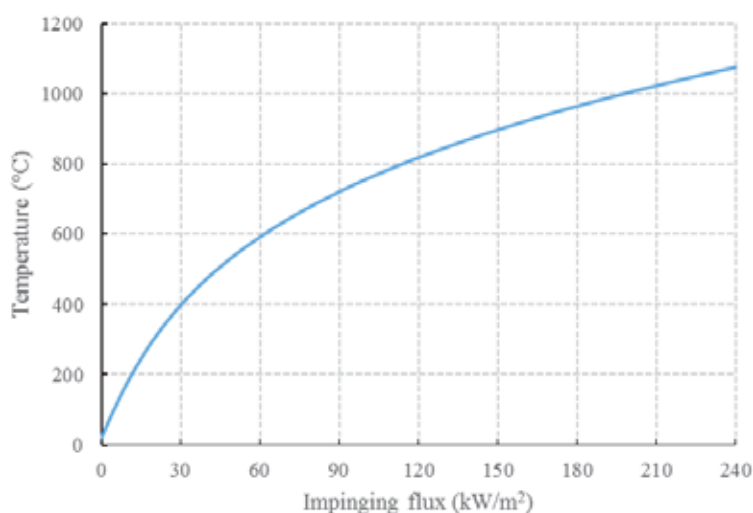
$$0 = \alpha_c(\theta - 20) + \sigma\varepsilon[(\theta + 273)^4 - (20 + 273)^4] - \varepsilon \dot{h}_{m,r} \quad (4.4)$$

kde:

- α_c je koeficient přestupu tepla prouděním, podle ČSN EN 1991-1-2^[2] je v tomto případě roven 35 W/(m²K)
- σ je Stefan-Boltzmannova konstanta 5,67 x 10⁻⁸ W/(m²K⁴)
- ε je emisivita oceli, v ČSN EN 1993-1-2^[3] se udává hodnotou 0,7
- θ je teplota prvku ve °C

Teplota v rovnovážném stavu závisí na velikosti vrstvy, na kterou tepelný tok dopadá.

Rovnici lze řešit iteračně, což vede ke vztahu mezi θ a $\dot{h}_{m,r}$. Za předpokladu doporučených hodnot σ a ε lze rovnici (4.5) popsat křivkou, viz obrázek 4.9.



Obrázek 4.9 Závislost ustálené teploty a dopadajícího tepelného toku

4.3.2 Přírůstkové řešení

Jakmile je vyřešen dopadajícího tepelný tok, pro výpočet závislosti teploty na čase lze použít přírůstkovou metodu uvedenou v normě ČSN EN 1993-1-2^[3]. Teplota průřezu závisí na čistém tepelném toku, což je rozdíl mezi dopadajícím tepelným tokem a vyzářovaným tepelným tokem. Čistý tepelný tok je dán rovnicí tepelné rovnováhy:

$$\rho C_p(T) \frac{dT}{dt} = \frac{A_m}{V} \left[\dot{h}_{z,j} - \alpha_c(T - 20) - \sigma\varepsilon((\theta + 273)^4 - 293^4) \right] \quad (4.5)$$

kde:

\dot{h}_{z_j} je čistý tepelný tok přijatý vrstvou sloupu

ρ je hustota oceli v kg/m³

C_p je měrné teplo oceli v J/(kgK)

A_m/V je součinitel průřezu vrstvy v m⁻¹

Z rovnice se teplota vypočítá po časových krocích Δt , např. pro 60 s, ze vztahu:

$$T^{t+\Delta t} = T^t + \Delta t \frac{A_m}{V} \frac{1}{\rho C_p(T^t)} \left[\dot{h}_{z_j} - \alpha_c(T - 20) - \sigma \varepsilon ((T + 273)^4 - 293^4) \right] \quad (4.6)$$

kde

$T^{t+\Delta t}$ je teplota vrstvy z_j v čase $t+\Delta t$.

Časově závislé hodnoty se hodnotí v čase t , protože HRR se s časem mění. Rovnici lze řešit tabulkovým procesorem. Na tomto postupu je založen i výpočet teploty prvku v programu OZone.

5 NÁVRH SLOUPU

ČSN EN 1993-1-2^[3] a ČSN EN 1994-1-2^[4] shrnují postupy a mezní hodnoty pro požární návrh ocelových a ocelobetonových konstrukcí. Požární odolnost je řešena po prvcích. Normy definují charakteristické a návrhové hodnoty mechanických a tepelných vlastností materiálů. Návrhové hodnoty jsou dány jako podíl charakteristické hodnoty a součinitele bezpečnosti $\gamma_{M,fi}$. Doporučená hodnota $\gamma_{M,fi} = 1,0$ je přijímána všemi národními přílohami a charakteristické vlastnosti prvku se obvykle při návrhu za zvýšené teploty označují jako návrhové hodnoty.

5.1 Verifikace

Pokud je prvek vystaven požáru, jeho odolnost je dána požadavkem v čase t jako

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (5.1)$$

Účinky nepřímého zatížení (vnitřní síly a momenty vyvolané v konstrukci deformacemi a omezením teplotní roztažnosti) nemusí být při návrhu uvážovány, pokud je požární odolnost určena pomocí nominální normové teplotní křivky. V ostatních případech se nepřihlíží k nepřímým zatížením, pokud je jejich účinek zanedbatelný nebo pokud jsou okrajové podmínky nebo návrhový model konzervativní.

5.2 Zatížení

Jako zjednodušení může být při analýze prvku uvažována hodnota $E_{fi,d}$ jako:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (5.2)$$

kde:

E_d je návrhová hodnota základní kombinace zatížení (konečný mezní stav), viz ČSN EN 1990^[1]

η_{fi} je redukční součinitel pro návrhové zatížení

Hodnota redukčního součinitele η_{fi} závisí na tom, zda se pro základní kombinaci zatížení použije rovnice 6.10 nebo 6.10a a 6.10b, které jsou uvedeny v ČSN EN 1990.

Pokud je pro základní kombinaci zatížení použita rovnice 6.10 normy ČSN EN 1990^[1], je redukční součinitel η_{fi} dán hodnotou:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (5.3)$$

Pokud jsou pro základní kombinaci zatížení použity rovnice 6.10a a 6.10b, je redukční součinitel η_{fi} dán menší hodnotou vypočtenou z následujících dvou výrazů:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (5.4)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (5.5)$$

kde:

G_k je charakteristická hodnota stálého zatížení

$Q_{k,1}$ je charakteristická hodnota proměnného zatížení

- ξ je redukční součinitel pro nepříznivé stálé zatížení, viz ČSN EN 1990
 $\Psi_{0,1}$ je součinitel kombinace pro proměnné zatížení
 $\Psi_{1,1}$ je součinitel četnosti proměnného zatížení

Redukční součinitel a součinitel četnosti a kombinace jsou národními parametry a jejich hodnoty se v jednotlivých zemích liší.

5.3 Únosnost

U prvku s nerovnoměrně rozloženou teplotou lze uvažovat únosnost s rovnoměrným rozložením teploty, která se rovná maximální teplotě části prvku v daném časovém okamžiku.

Teplota prvku θ se stanoví metodami popsány v kapitole 4. Teplota sloupu se určí v daných výškách, přičemž nejvyšší teplota se použije pro stanovení únosnosti sloupu.

Modely ukázaly, že maximální teplota je přibližně v 1/3 výšky sloupu, za předpokladu, že plamen nedosahuje stropu. Pokud plamen dosahuje stropu, je maximální teplota pod stropem (v oblasti 4 na obrázku 4.3).

5.3.1 Klasifikace průřezu

Stejně jako při návrhu za běžné teploty i při požáru je nutné všechny tlačené průřezy klasifikovat. Klasifikace průřezů při zvýšené teplotě se může lišit od klasifikace při normální teplotě, což je dáno snižující se mezí kluzu a modulem pružnosti oceli při zvyšující se teplotě.

Klasifikace je běžně prováděna na základě normální teplotního chování průřezu místo klasifikace pro různé teploty odděleně. Je popsána v ČSN EN 1993-1-1 a hodnota ε pro požární podmínky je uvedena v ČSN EN 1993-1-2^[3] ustanovení 4.2.2 jako

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.6)$$

kde f_y je mez kluzu za běžné teploty 20°C.

Koeficient 0,85 uvažuje se změnou vlastností materiálu za zvýšené teploty a je aproximací $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$.

Může se stát, že sloup posuzovaný za požáru je klasifikován vyšší třídou průřezu než když je posuzován při pokojové teplotě, např. třída 3 za běžné teploty a třída 4 za zvýšené teploty.

Pravidla pro výpočet únosnosti průřezů třídy 4 za zvýšené teploty jsou uvedena v ČSN EN 1993-1-2^[3]. Tento dokument se dále této problematice nevěnuje.

5.3.2 Vzpěrná únosnost

Návrhová únosnost sloupů ve vzpěrném tlaku třídy 1, 2 nebo 3 zatížených rovnoměrnou teplotou θ_a v čase t se určuje jako za běžné teploty. Uvažuje se s degradací oceli, která odpovídá vypočítané teplotě. Návrhová únosnost se vypočte podle čl. 4.2.3.2 v ČSN EN 1993-1-2^[3] jako

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.7)$$

Redukční součinitel vzpěrnosti χ_{fi} se uvažuje nižší z hodnot k osám y-y a z-z jako:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (5.8)$$

kde

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2}(1 + \alpha\bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}) \quad (5.9)$$

a

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (5.10)$$

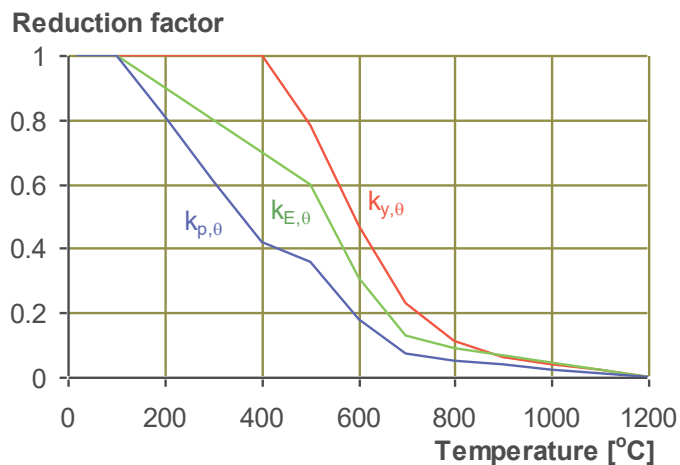
Bezrozměrná štíhlost při rovnoměrném zatížení teplotou θ_a je dána vztahem:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (5.11)$$

kde:

- A je plocha průřezu sloupu
- $k_{y,\theta}$ je teplotně závislý redukční součinitel pro pevnost oceli
- $k_{E,\theta}$ je teplotně závislý redukční součinitel modulu pružnosti oceli
- f_y je mez kluzu oceli
- $\bar{\lambda}$ je štíhlost sloupu za běžné teploty

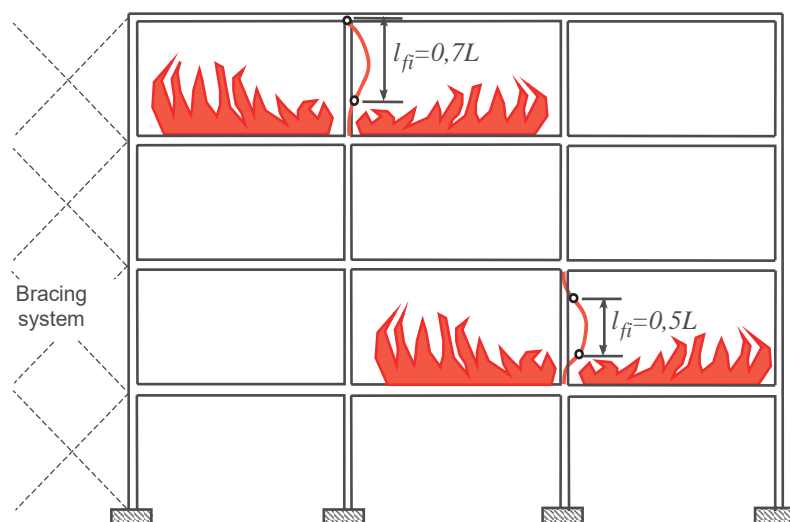
Redukční součinitele $k_{y,\theta}$ a $k_{E,\theta}$ závisí na teplotě. Hodnoty jsou uvedeny v ČSN EN 1993-1-2^[3]. Jsou také zobrazeny na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Redukce materiálových vlastností oceli při zvýšené teplotě

5.3.3 Vzpěrná délka

V čl. 2.3.2(3) ČSN EN 1993-1-2^[3] se doporučuje stanovit štíhlost $\bar{\lambda}$ za zvýšené teploty stejně jako za běžné teploty, s výjimkou prutových soustav. U nich vzpěrná délka l_{fi} zohledňuje změnu uložení z kloubu na vetknutí do další části, jak je znázorněno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Vzpěrné délky sloupů prutové soustavy bez patrového posunu za požáru

5.4 Výpočet únosnosti pomocí MKP

Jako alternativa k mechanickému modelu uvedenému v kap. 5.3 lze únosnost sloupu stanovit také pomocí MKP analýzou.

Konečně prvkový program, který si projektant zvolí, musí být schopen tepelné a mechanické analýzy současně.

Teplotní analýza se řeší ohřevem konstrukce tepelným tokem z plamenů. Tvar plamene je definován rovnicemi v kapitole 4. Modelace pomocí CFD není požadována, viz kapitola A.2.1.1.

Pro mechanickou část analýzy se doporučuje nelineární materiálový model. V závislosti na požadavcích investora se upatí prutové a skořepinové prvky. V obou případech je třeba dbát na to, aby byly zohledněny účinky počátečních imperfekcí. Další pokyny k MKP modelování jsou v příloze Cnormy ČSN EN 1993-1-5^[24].

6 LITERATURA

- 1 ČSN EN 1990 (2004): Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, ČNI, Praha.
- 2 ČSN EN 1991-1-2 (2004): Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI, Praha.
- 3 ČSN EN 1993-1-2 (2006): Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI, Praha.
- 4 ČSN EN 1994-1-2 (2006): Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI, Praha.
- 5 Wang, Y., Burgess, I., Wald, F. a Gillie, M. (2012) Performance-Based Fire Engineering of Structures, CRC Press. Taylor & Francis Group.
- 6 Lennon, T. (2011) Structural Fire Engineering, ICE Publishing.
- 7 Franssen, J. M. a Vila Real, P. (2015) Fire design of steel structures, 2nd Edition, ECCS Eurocode Design Manuals, Wiley VCH
- 8 Simms, W.I. (2012) Fire resistance design of steel framed buildings. P375, The Steel Construction Institute.
- 9 Guide to the advanced fire safety engineering of structures (2007), Institution of Structural Engineers.
- 10 Wald, F.a kol. (2017) Modelování dynamiky požáru v budovách, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha.
- 11 Heskestad, G. (1972) Similarity relations for the initial convective flow generated by fire, ASME Paper 72-WA/HT-17.
- 12 Hasemi, Y. a Tokunaga, T. (1984) Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames, Fire Science & Technology 4(1):15-26.
- 13 Franssen, J.M. a Scifo, A. (2013) LOCAFI D6: Description of all parameters that characterise the tests - ULg. (Part of 'Temperature assessment of a vertical steel member subjected to Localised Fire' RFCS project).
- 14 Nadjai, A. a Sanghoon, H. (2016) H, LOCAFI D15: Background document of the methodology – Ulster. (Part of LOCAFI RFCS project).
- 15 Nadjai, A. a Sanghoon, H. (2013) LOCAFI D7: Report of all detailed experimental data gathered during localised fire tests - Ulster (Part of LOCAFI RFCS project).
- 16 Thauvoye C., (2013) LOCAFI D8-9 Numerical simulation of tests, (Part of LOCAFI RFCS project).
- 17 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2017), FDS User's Guide, FDS Version 6.5.3, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 18 Fire Dynamics Simulator (FDS) (2013), FDS Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- 19 Sokol, Z. a Wald, F., (2008), Column Temperature in a Localized Fire, In: Technical Sheets 2007 - Part 3: Integrated Design for Extreme Situations. CIDEAS-Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, str. 55-56. Praha.
- 20 Kallerová, P. a kol. (2008), Column Temperature During Localised Fire Test In: Eurosteel 2008 - 5th European Conference on Steel and Composite Structures. ECCS/CECM/EKS General Secretariat, str. 971-976, Brussel.

- 21 Sokol, Z. (2009), Buckling Resistance of Columns Exposed to Localised Fire, In: Technical Sheets 2008 - Part 3. CIDEAS-Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, str. 57-58, Praha.
- 22 Sokol, Z. a kol. (2008), Column Behaviour during Localised Fire Test In: Proceedings of the Fifth International Conference Structures in Fire. Nanyang Technological University, str. 256-263, Singapore.
- 23 Sokol, Z. (2011), Temperature of Steel Column Exposed to Localised Fire, In: Applications of Structural Fire Engineering. České vysoké učení technické v Praze, str. 269-274, Praha.
- 24 ČSN EN 1993-1-5(2008): Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn, ČNI, Praha.
- 25 Buchanan, A. H. a Abu A.K. (2017), Structural design for fire safety, Second Edition, John Wiley & Sons, New Zealand.
- 26 Vassart, O.a kol., (2014) Eurocodes: Background and applications. Structural fire design. Worked examples. EUR Scientific and Technical Research Reports. Publications Office of the European Union. (<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/eurocodes-background-and-applications-structural-fire-design-worked-examples>)

PŘÍLOHA A

MODEL OHŘEVU SLOUPU PODLE PROJEKTU LOCAFI

Série experimentů popsaných v kapitole 3 pomohla validovat analytický model ke stanovení tepelného toku a teploty sloupu vystaveného lokálnímu požáru. Model je popsán v této příloze.

Přenos tepla radiací a konvekcí v modelu je složitý a komplexní výpočet. Není proto doporučeno ho řešit ručním výpočtem. Lze jej řešit tabulkovým procesorem. V rámci projektu byly vyvinuty zjednodušené postupy, které využívají principy modelu, viz kapitola 4.

A.1 Princip řešení

Teplotu sloupu vystaveného lokálnímu požáru lze určit z teploty segmentu sloupu v určité výšce a může být použita opakovaně v jakékoliv výšce za účelem popisu rozvoje teploty podél sloupu, viz [19-23]. Výpočet sestává ze dvou kroků: výpočtu dopadajícího tepelného toku přijatého segmentem a výpočtu teploty segmentu sloupu. Předpokládá se, že tvar plamene je kruhový a nepřesahuje průměr 10 m a HRR 50 MW. Nekruhové požáry se modelují jako kruh s průměrem, který má plochu, podle rovnice (A.1):

$$D_{fire} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ m} \quad (\text{A.1})$$

kde

D_{fire} je ekvivalentní průměr požáru (m)
 S plocha lokálního požáru (m²)

Oblasti aplikace jsou zobrazeny na obrázku 4.3. Příloha A.2 popisuje model sloupu vně požáru (zóna 1 a 4) a příloha A.3 popisuje model pro sloupy umístěné uvnitř požáru (zóna 2 a 3).

A.2 Sloup mimo oblast požáru

Plameny z lokálního požáru zahřívají požárně nechráněný sloup radičním tepelným tokem. Tvar plamene a poloha plamene vzhledem ke sloupumají zásadní vliv na tepelný tok přijatý sloupem. Pro většinu požárního úseku lze tepelný tok prouděním mimo oblast požáru zanedbat. Předpoklad neplatí ve vrstvě kouře akumulované pod stropem. U lokálního požáru je výška kouřové vrstvy ve srovnání s výškou prostoru obvykle nízká.

Pokud existují překážky, které brání šíření kouře pod stropem, pak může být výška vrstvy horkého kouře $h_{smoke\ layer}$ definována geometrickou charakteristikou překážek, výškou nosníků. V praxi se doporučuje 10% výšky stropu. Pro body mimo nebo uvnitř kouřové vrstvy se předpokládají jiné hodnoty dopadajícího tepelného toku, viz kapitoly A.2.1 a A.2.2.

A.2.1 Sloup mimo vrstvu kouře

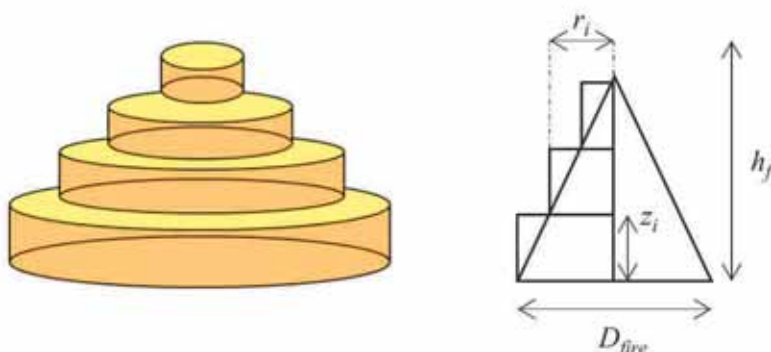
Postup je rozdělen do 3 kroků:

- modelování geometrie povrchu plamene,
- výpočet teploty plamene,
- předpověď dopadajícího tepelného toku na segment ocelového sloupu.

Tepelný tok prouděním se zanedbává a radiční tepelný tok se modeluje pomocí povrchu plamene - plamen se chová jako povrch vyzařující teplo směrem ke sloupu.

A.2.1.1 Geometrie povrchu plamene

Prvním krokem je sestavení tělesa plamene. Předpokládá se kónický tvar, tvořený řadou válců, svislých ploch, a prstenců, vodorovných ploch o klesajícím průměru, viz obrázek A.1.



Obrázek A.1 Model tělesa plamene (vlevo) a geometrický popis (vpravo)

Výška plamene h_f se stanoví z korelace v Příloze C normy ČSN EN 1991-1-2^[2]:

$$h_f = -1,02D_{fire} + 0,0148Q(t)^{0.4} \quad (A.2)$$

kde:

D_{fire} je průměr zdroje hoření (m)

$Q(t)$ je HRR tohoto zdroje hoření (W)

Poloměr r_i válce ve výšce z_i se stanoví jako

$$r_i = 0,5D_{fire} \left(1 - \frac{z_i}{h_f}\right) \quad (A.3)$$

Doporučeným kompromisem mezi přesností a použitelností je šířka mezikruží válce rovná 0,5 m. Naopak při použití hloubky válce rovnající se výšce plamene h_f je výpočet na velmi bezpečné straně. V tomto případě se plamen redukuje na dvě sálavé složky na válec a disk nahoře (průměr = D_{fire}).

A.2.1.2 Sálání a teplota plamene

Druhým krokem je popis sálání plamene a teploty povrchu tělesa plamene. Teplota povrchu válce a mezikruží ve vzdálenosti z_i podél osy plamene, viz obrázek A.2, se považuje za konstantní a rovná se

$$\theta_f(z_i) = \min\left(900; 20 + 0.25(0,8Q(t))^{2/3} (z_i - z_{virt})^{-5/3}\right) \quad (A.4)$$

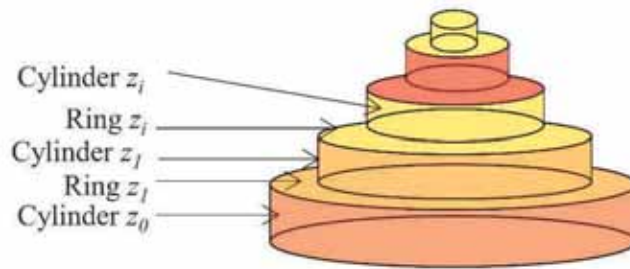
kde z_{virt} je virtuální výška, která se rovná

$$z_{virt} = -1,02D_{fire} + 0,00524Q(t)^{0.4} \quad (A.5)$$

Výrazy odpovídají rovnicím C.2 a C.3 v ČSN EN 1991-1-2^[2]. Délka h_f je definována jako bod, kde teplota plynů podél osy plamene podle rovnice (A.4) dosahuje 520 °C, dle rovnice A.4.

HRR se mění s časem, což znamená, že charakteristiky plamene a tepelného toku se v průběhu požáru liší.

V případě, že zdroj požáru není na zemi, ale v jiné výšce z_{fire} , je nutné upravit výšku pod stropem, tj. h_{ceil} se změní na $h_{ceil} - z_{fire}$.

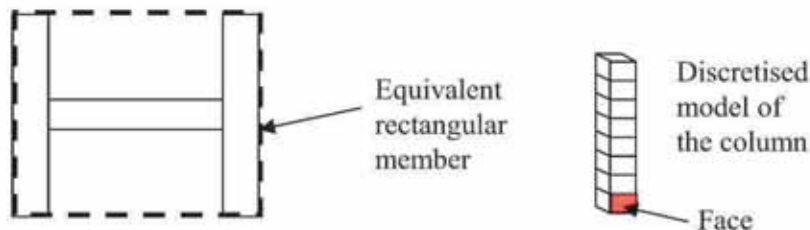


Obrázek A.2 Zjednodušený model povrchu požáru z válců a mezikruží

A.2.1.3 Radiační tepelný tok přijatý vrstvou sloupu

Průřez sloupu je modelován jako obdélníkový nezávisle na jeho vlastním průřezu, viz obrázek A.3. Řešení odpovídá předpokladům v příloze G normy ČSN EN 1991-1-2^[2]. Odstranění komplikované geometrie průřezu umožňuje zanedbat vliv zastínění.

Sloup se rozdělí na vrstvy výšky z_j a tepelný tok se stanoví pro každou ze čtyř ploch povrchu vrstvy a vypočítá se střední hodnota.



Obrázek A.3 Rozdělení sloupu průřezu H na vrstvy

Předpokládá se, že emisivita a teplota jsou konstantní po povrchu každé vrstvy, a radiační tepelný tok lze stanovit pomocí polohového součinitele. Ten vyjadřuje zlomek tepelné energie, kterou vyzařuje daný povrch a která dorazí na daný přijímající povrch. Hodnota závisí na velikosti vyzařujícího povrchu, vzdálenosti od vyzařujícího povrchu k přijímací ploše a jejich vzájemné orientaci. Analytické vzorce pro polohové součinitele jsou k dispozici pro různé konfigurace, včetně tvarů povrchu požáru.

Polohový součinitel Φ mezi nekonečnou rovinou a konečným válcem je dán rovnicí (A.6). Geometrické veličiny jsou zobrazeny na obrázku A.4.

$$\Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{S}{B} - \frac{S}{2B\pi} \{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5\} \quad (\text{A.6})$$

kde

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{A - 1} \right)$$

$$L_2 = \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{C + B - 1} \right)$$

$$L_3 = -Y \left[\frac{A + 1}{\sqrt{(A - 1)^2 + 4Y^2}} \cos^{-1} \left(\frac{Y^2 - B + 1}{\sqrt{B}(A - 1)} \right) \right]$$

$$L_4 = -\sqrt{C} \frac{C + B + 1}{\sqrt{(C + B - 1)^2 + 4C}} \cos^{-1} \left(\frac{C - B + 1}{\sqrt{B}(C + B - 1)} \right)$$

$$L_5 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{B}} \right)$$

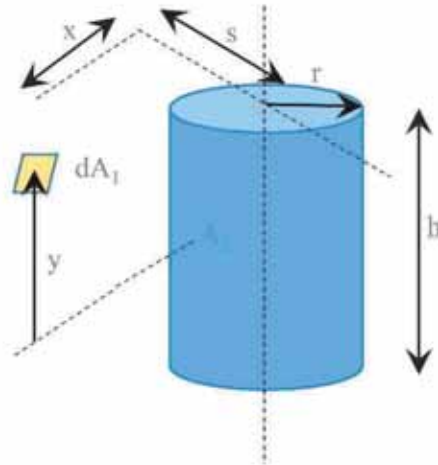
a

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad Y = \frac{y}{r} \quad H = \frac{h}{r}$$

$$A = X^2 + Y^2 + S^2$$

$$B = S^2 + X^2$$

$$C = (H - Y)^2$$



Obrázek A.4 Geometrické veličiny pro výpočet polohového součinitele mezi nekonečnou plochou a válcem

Sálavý tepelný tok přijatý a absorbovaný plochou $face_j$ z válce z_i lze určit jako

$$\dot{h}_{cylinder\ z_i \rightarrow face_j} = \sigma \varepsilon (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \quad (A.7)$$

kde:

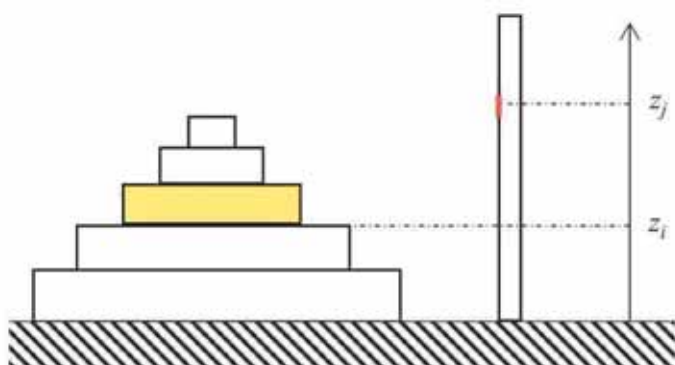
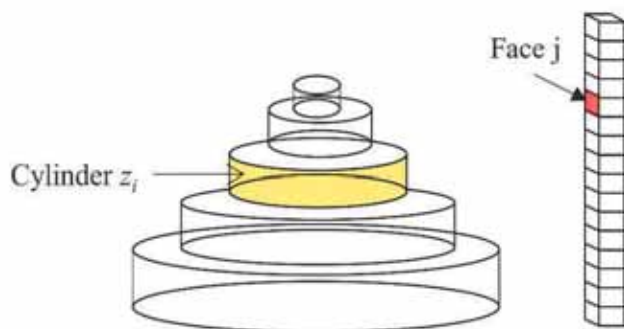
ε je emisivita oceli podle ČSN EN 1993-1-2 s hodnotou 0,7

σ je Stefan Boltzmanova konstanta $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

$\theta_f(z_i)$ je teplota válce ve výšce z_i z rovnice (A.4)

$\Phi_{cylinder\ z_i \rightarrow face_j}$ je polohový součinitel pro válec výšky z_i a $face_j$ z rovnice (A.6)

Model požáru je vidět na obrázku A.5.



Obrázek A.5 Sálání mezi válcem výšky z_i a plochou $face_j$
 prostorové zobrazení (nahore), boční pohled (dole)

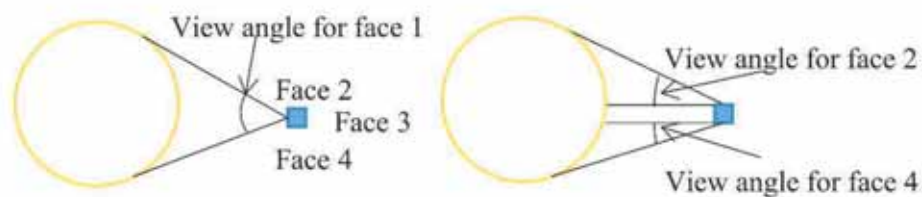
Polohové součinitele lze sčítat^[2]. Například součinitel \emptyset na obrázku A.6 lze vypočítat z polohových součinitelů \emptyset_1 a \emptyset_2 .

$$\emptyset_1 = \emptyset + \emptyset_2 \Rightarrow \emptyset = \emptyset_1 - \emptyset_2 \quad (A.8)$$



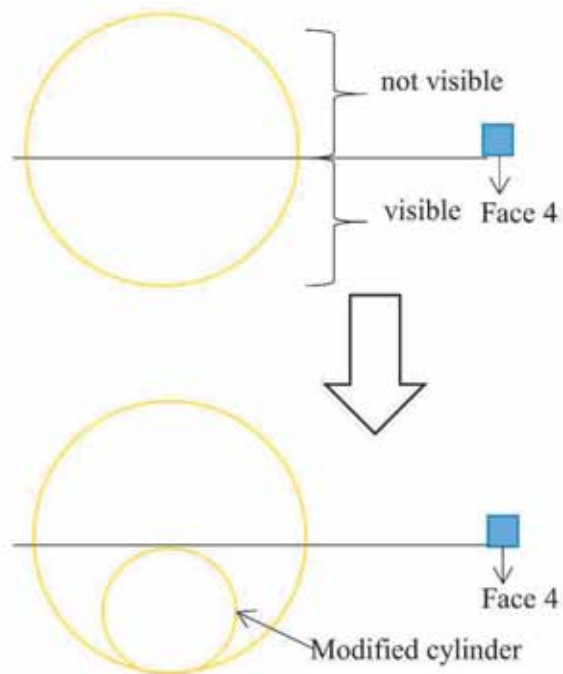
Obrázek A.6 Sčítání polohových součinitelů

Pro skládání polohových součinitelů lze použít pravidla. Na obrázek A.7 je plocha 1 plně obrácena k válci a plochy 2 a 4 jen částečně. Plocha 3 není vystavena sálání z plamene vůbec. Plocha 1 odpovídá situaci popsané rovnicí (A.6). Vztahy pro plochy 2 a 4 jsou složitější. Rovnice (A.6) nelze použít přímo.

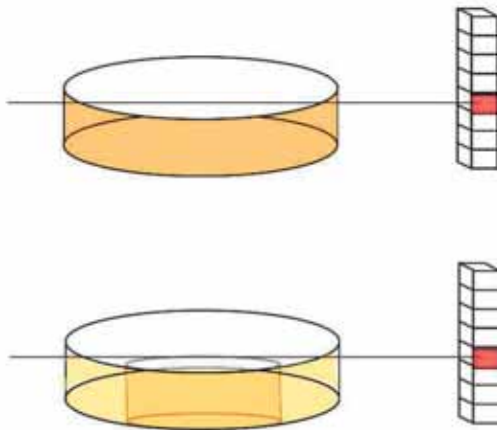


Obrázek A.7 Příklad interakce válce a sloupu

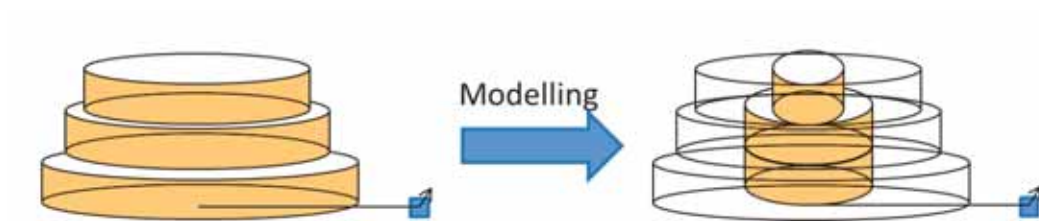
Radiační tepelný tok je řízen úhlem, pod kterým je přijímající plocha a zdroj záření. Řešením je použití tvaru porchu, který vede k ekvivalentnímu polohovému součiniteli. Geometrie válce se upraví podle obrázků A.8 a A.9. Průměr válce se zmenší tak, aby válec byl plně viditelný na cílové ploše a mohla být použita rovnice (A.6). Složitější případ s několika válci, který lze zpracovat podobným způsobem je znázorněn na obrázku A.10.



Obrázek A.8 Válec při pohledu zhora



Obrázek A.9 Válec, 3D pohled



Obrázek A.10 Složitější skládání válcových ploch

Polohový součinitel mezi nekonečně malým rovinným prvkem a prstencem v kolmé rovině je dán rovnicí (A.9). Geometrické proměnné jsou představeny na obrázku A.11.

$$\Phi_{dA_1 \rightarrow A_2} = \frac{H}{2} \left(\frac{H^2 + R_2^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_2^2 + 1)^2 - 4R_2^2}} - \frac{H^2 + R_1^2 + 1}{\sqrt{(H^2 + R_1^2 + 1)^2 - 4R_1^2}} \right) \quad (\text{A.9})$$

Vztah platí pro $l > r_2$

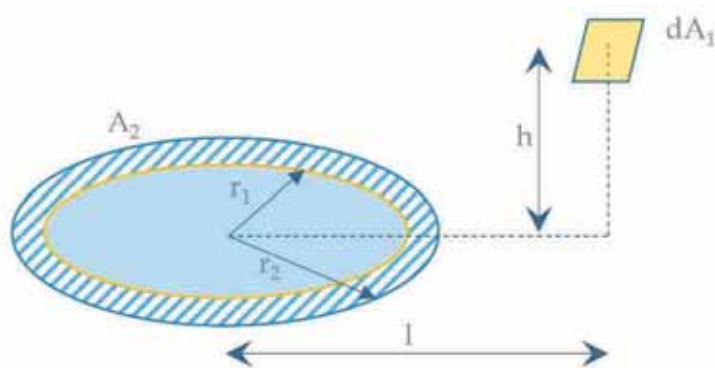
kde:

$$H = h/l$$

$$R_1 = r_1/l$$

$$R_2 = r_2/l$$

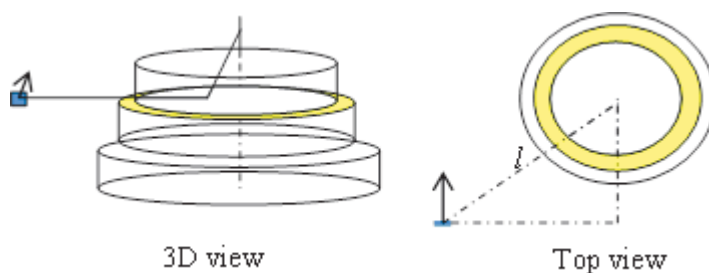
l je vzdálenost plochy a středu kruhu mezikruží



Obrázek A.11 Sálání mezikruží na nekonečně malou svislou plochu

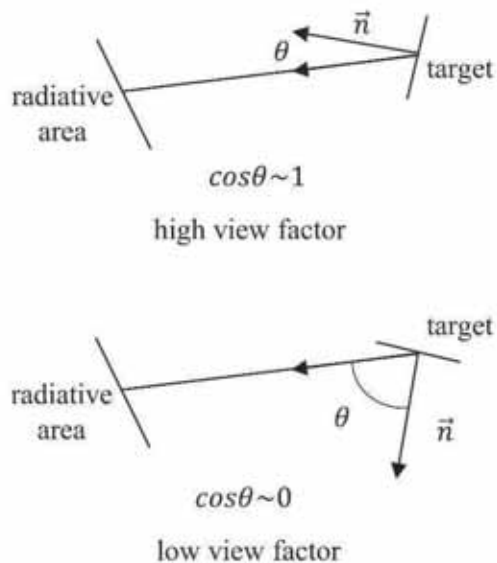
Prstencová část (kroužek z_i) mezi dvěma válci je považována za radiační povrch (viz obrázek 0.12) a indukovaný tepelný tok je vypočten z rovnice (0.9). Přidává se pouze v případě, že $z_j > z_i$ (tj. pokud je plocha v přímé viditelnosti s prstencem).

Další pravidla musí být použita pro pokrytí všech možných konfigurací pomocí rovnice (0.9). Teoreticky platí, že tato rovnice platí pouze pro prsteneček vystředěný v rovině kolmé k cíli, což není v praxi vždycky (viz obrázek 0.12).



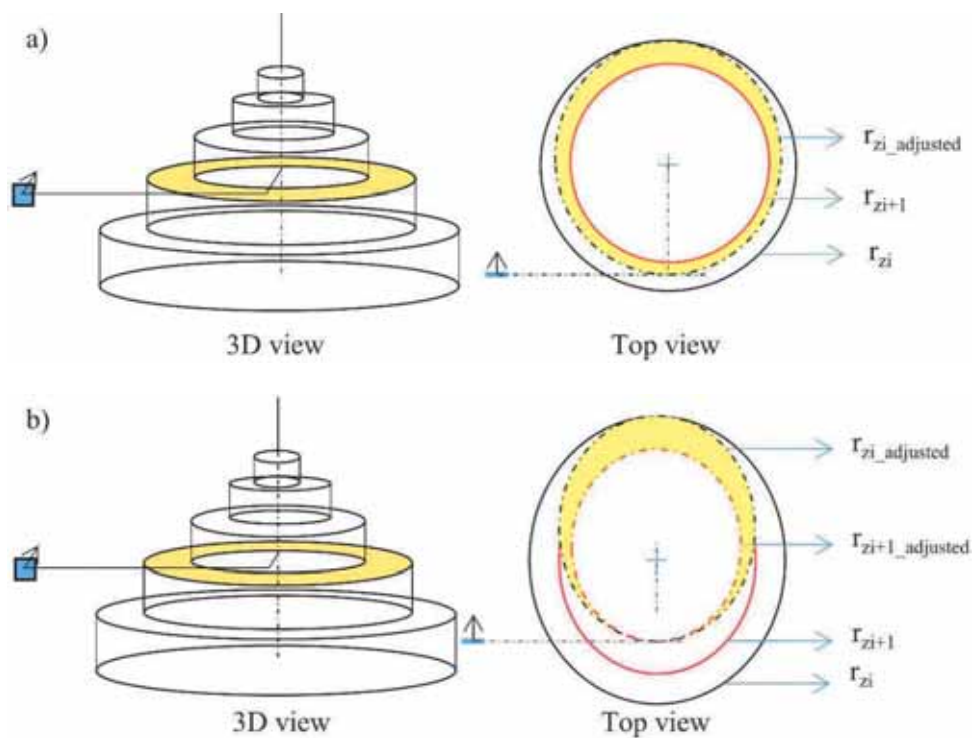
Obrázek A.12 Pohled na mezikruží

Orientace cílové plochy má velký vliv na tepelný tok, který se vyměňuje mezi dvěma povrchy (obrázek A.13). Rovnice A.9 odpovídá případu, kdy je cílová plocha v kolmém směru vůči požáru a udává nejvyšší (nejkonzervativnější) konfigurační součinitel.



Obrázek A.13 Vliv orientace cílové plochy

Také je nutné vzít v úvahu situaci, kdy je prsteneček, stejně jako u válce, částečně viditelný (viz obrázek A.14). V tomto případě se vnější a dokonce i vnitřní poloměr mezikruží zmenší tak, aby vznikl viditelný prsteneček za použití stejné metody použité na válci. V příkladech znázorněných na obrázku jsou ukázány dva případy pro kruh definovaný svým vnitřním poloměrem $r_{(zi+1)}$ a jeho vnějším poloměrem r_{zi} . V případě a) musí být upraven pouze poloměr r_{zi} , zatímco v případě b) jsou upraveny oba poloměry r_{zi} a $r_{(zi+1)}$.



Obrázek A.14 Úprava mezikruží pro složitější případy

Radiační tepelný tok přijatý povrchem je součtem radiačního tepelného toku vysílaného všemi válci a mezikružními:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_j} &= \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{Cylinder\ z_i \rightarrow face_j} \\ &+ \sum_i \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta_f(z_i) + 273)^4 \cdot \Phi_{Ring\ z_i \rightarrow face_j} \end{aligned} \quad (A.10)$$

Nakonec je vypočten průměrný tepelný tok na segment ve výšce z_j tím, že se vypočte průměrný tepelný tok na čtyřech plochách se šířkou l_i každé plochy:

$$\dot{h}_{rad,section\ z_j} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.11)$$

A.2.1.4 Celkový tepelný tok přijatý segmentem sloupu

Jak již bylo uvedeno výše, pokud se nachází sloup mimo plamen a zvažovaný segment není v kouřové vrstvě akumulované pod stropem, pak je celkový přijatý tepelný tok rovný radiativnímu tepelnému toku:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{rad,section\ z_j} \quad (A.12)$$

A.2.2 Část sloupu uvnitř vrstvy kouře

V kouřové vrstvě nelze tepelný tok prouděním zanedbat. Horký kouř má rovněž silný vliv na radiační tepelný tok z důvodu existence sazí v kouři, které mají absorpční schopnosti a ovlivňují tak emisivitu požáru. Celkový tepelný tok přijatý segmentem se vypočítá podle následujících rovnic:

V prvním kroku je zavedena proměnná y :

$$y = \frac{d + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (A.13)$$

kde

d je vzdálenost mezi sloupcem a středem požární oblasti (Obrázek 4.2)

H je vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem

Pokud je zdroj požáru umístěn ve výšce z_{fire} pak platí

$$H = h_{ceiling} - z_{fire} \quad (A.14)$$

L_h je dáno jako

$$L_h = H(2.9Q_h^{0.33} - 1) \quad (A.15)$$

Q_h , bezrozměrová HRR, se odhaduje jako:

$$Q_h = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 H^{2.5}} \quad (A.16)$$

z' se definuje jako

$$z' = 2.4D_{eq}(Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1 \quad (A.17)$$

$$z' = 2.4D_{eq}(1 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1 \quad (A.18)$$

Q^* je bezrozměrová HRR odhadovaná podobným způsobem jako Q_h :

$$Q^* = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 D_{fire}^{2.5}} \quad (A.19)$$

Tepelný tok H_s se pak vypočítává v závislosti na hodnotě y :

$$\begin{cases} H_s = 100000 \text{ W/m}^2 & y \leq 0.3 \\ H_s = 136300 - 121000 \cdot y \text{ W/m}^2 & 0.3 < y < 1.0 \\ H_s = 15000 \cdot y^{-3.7} \text{ W/m}^2 & 1.0 \leq y \end{cases} \quad (A.20)$$

Nakonec je celkový tepelný tok přijatý segmentem z_j :

$$\dot{h}_{section\ z_j} = H_s \quad (A.21)$$

A.3 Sloup uvnitř požáru

Pro sloup uvnitř oblasti zasažené požárem je tepelný tok prouděním hlavní součástí celkového tepelného toku. Navíc koncept tělesa plamene, kde vnější povrch plamene vyzařuje směrem ke sloupu, již není správný.

ČSN EN 1991-1-2^[2] poskytuje model pro výpočet tepelného toku přijatého v bodě uvnitř ohně. Níže uvedený model je založen na rovnicích y Eurokódu s nepatrnou změnou.

Opět se musí rozlišovat mezi segmenty sloupu, které nejsou ve vrstvě kouře pod stropem, a ty, které ve vrstvě horkého kouře jsou.

A.3.1 Segment sloupu mimo vrstvu kouře

Segmenty sloupů ve výšce z_j , umístěné mezi zemí a výškou ($h_{ceíl} - h_{smoke\ layer}$) jsou obklopeny horkými plyny při teplotě odhadnuté z rovnice (A.4). Tok dopadajícího tepla se pak vypočítá jako:

$$\dot{h}_{inside\ flame} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left((\theta_f(z_j) + 273)^4 - 293^4 \right) + \alpha_c (\theta_f(z_j) - 20) \quad (A.22)$$

kde

α_c je koeficient přestupu tepla prouděním = 35 W/(m²K) podle ČSN EN 1991-1-2^[2]

Celkový tepelný tok přijatý segmentem z_j se pak vypočte takto:

$$\dot{h}_{total,section\ z_j} = \dot{h}_{inside\ flame} \quad (A.23)$$

A.3.2 Segment sloupu uvnitř vrstvy kouře

Pro segmenty sloupu umístěné v kouřové vrstvě (mezi vrstevy ($h_{ceíl} - h_{smoke\ layer}$ a $h_{ceíl}$)) je přijatý celkový tepelný tok považován za maximum mezi H_s vypočítaným pomocí sady rovnic (A.13) do (A.20) a $\dot{h}_{inside\ flame}$ vypočtené podle rovnice (A.22).

A.4 Celkový tepelný tok přijatý částí sloupu

Model uvedený v sekci A.2 a A.3 předpokládá pouze jeden zdroj požáru. Nicméně je běžné mít požární scénáře, kde se jedná o několik zdrojů. V těchto případech lze použít jednoduchá pravidla.

Pokud je sloup mimo požární oblast a nikoliv ve vrstvě kouře, je radiální tepelný tok přijatý jakoukoliv částí sloupu součtem radiativních tepelných toků vyzařovaných každým zdrojem za předpokladu horní hranice 100 kW/m².

Pokud uvážíme n zdrojů požáru:

$$\dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_j} = \min \left(100000, \sum_{i=1}^n \dot{h}_{solid\ flame_i \rightarrow face_j} \right) \quad (A.24)$$

$$\dot{h}_{rad_{section}z_j} = \frac{\sum_{i=1}^4 l_i \cdot \dot{h}_{all\ solid\ flame \rightarrow face_i}}{\sum_{i=1}^4 l_i} \quad (A.25)$$

V postupu průměrování se nezmění celkový tepelný tok přijatý segmentem sloupů.

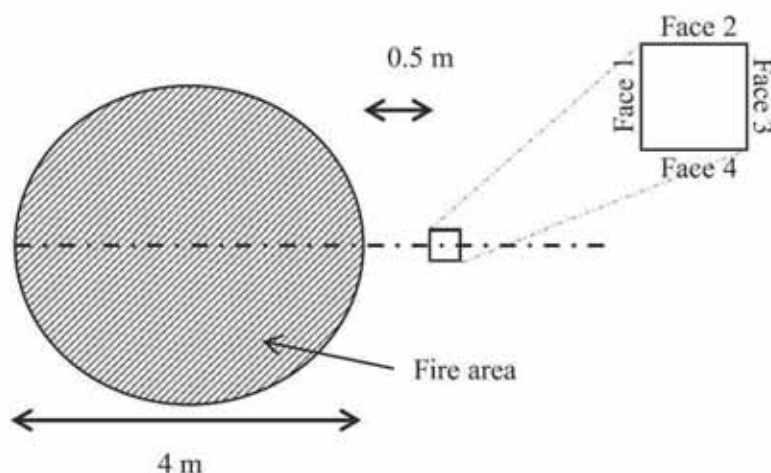
Ve všech ostatních případech se odhadne celkový tepelný tok přidáním všech tepelných toků každého zdroje požáru za předpokladu opět horní hranice 100 kW/m².

PŘÍLOHA B

APLIKACE METODY NA SLOUP MIMO OBLAST POŽÁRU

B.1 Zadání

Sloup se nalézá mimo oblast požáru a vrstvu kouře. Obrázek B.1 uvádí předpokládanou konfiguraci půdorysu. Sloup průřezu HEB 300 je umístěn před nádrží o průměru 4 m. Vzdálenost mezi okrajem nádrže a nejbližší plochou ocelového segmentu je 0,5 m. Předpokládá se, že palivo hoří konstantní rychlostí 1000 kW/m².



Obrázek B.1 Vzájemná poloha sloupu a požáru

B.2 Předběžná analýza

Výpočet lze zjednodušit. Počet výpočtů je úměrný počtu segmentů. Rovnice (A.6) je zjednodušena, pokud jsou segmenty ve výškách, které jsou násobkem výšky válce použitého k modelování plamene, tj. zde 0,5 m. Proměnná y rovna 0, viz obrázek B.2 a rovnice (A.6) se zjednoduší na

$$\phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s, x, r, h) = \frac{S}{A} - \frac{S}{2A\pi} \{ \pi + L_1 - L_2 + L_3 \} \quad (\text{B.1})$$

$$L_1 = \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{H^2 + A - 1} \right)$$

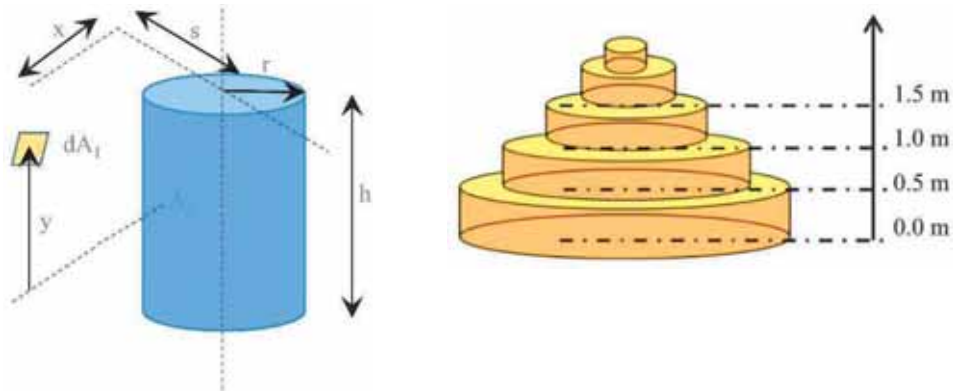
$$L_2 = H \frac{H^2 + A + 1}{\sqrt{(H^2 + A - 1)^2 + 4H^2}} \cos^{-1} \left(\frac{H^2 - A + 1}{\sqrt{A}(H^2 + A - 1)} \right)$$

$$L_3 = H \cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \right)$$

kde

$$S = \frac{s}{r} \quad X = \frac{x}{r} \quad H = \frac{h}{r} \quad A = X^2 + S^2 \quad (\text{B.2})$$

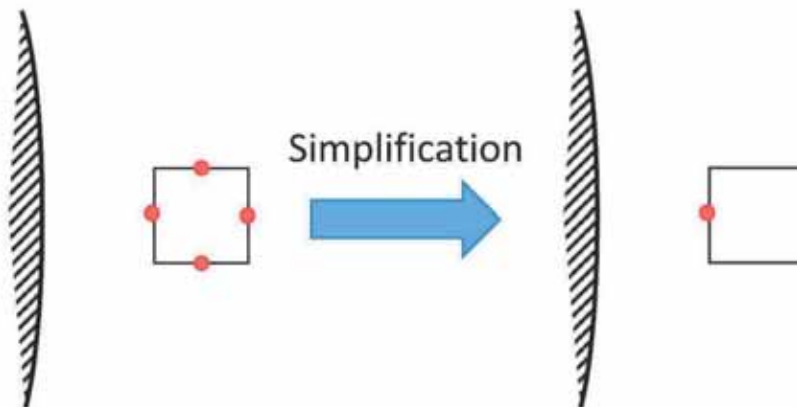
Počítá se pro segmenty v rozsahu 0 m, 0,5 m, 1,0 m atd. Dále je tepelný tok vypočten pro segment ve výšce 1,0 m.



Obrázek B.2 Konfigurační element válcové roviny (vlevo), výška segmentů pro výpočty (vpravo)

Předpokládá se, že záření z plamene nedosáhne líce sloupu 3. Povrchy 2 a 4 jsou symetrické a budou mít stejný tepelný tok.

Pro zjednodušení se počítá tepelný tok v pozici jako u povrchu 1. Jelikož se jedná o nejbližší líc dosáhne se konzervativně nejvyššího tepelného toku.



Obrázek B.3 Zjednodušení polohy ploch pro výpočet tepelného toku

B.3 Výpočet tepelného toku

Tepelný tok přijatý každým povrchem sloupu se stanoví samostatně. Z rovnic (A.2) až (A.5) lze určit přínos jednotlivých válců a prstenců. V tomto případě je výška plamene 6,15 m, viz obrázek B.9.

Pro povrch 1 lze z rovnice rovnice přímo vypočítat součinitel konfigurace mezi povrchem 1 a válcem.

Pro povrch 1 a válec C_i (v rozsahu mezi z_i a z_{i+1}) díky jeho poloze znázorněné na obrázku B.4 lze popsat polohu segmentu v lokálním souřadném systému $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ jako (s_f, x_f, z_f) , což v tomto případě je (2,5; 0,0; 1,0). Lze posat čtyři stavy, které lze rozložit, viz obrázek B.5.

Pro ϕ_i (respektivě ϕ_{i+1}), lze konfigurační součinitel mezi plochou 1 a válcem o výšce $|z_i - z_f|$ (respektivě $|z_{i+1} - z_f|$) a poloměrem r_i popsat jako

$$\phi_i = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_i - z_f|) \quad (\text{B.3})$$

$$\phi_{i+1} = \phi_{dA_1 \rightarrow A_2}(s = s_f, x = x_f, r = r_i, h = |z_{i+1} - z_f|)$$

Konfigurační součinitel ϕ mezi plochou 1 a válcem C_i se rovná

$$\phi = |\phi_i - \phi_{i+1}| \quad (\text{B.4})$$

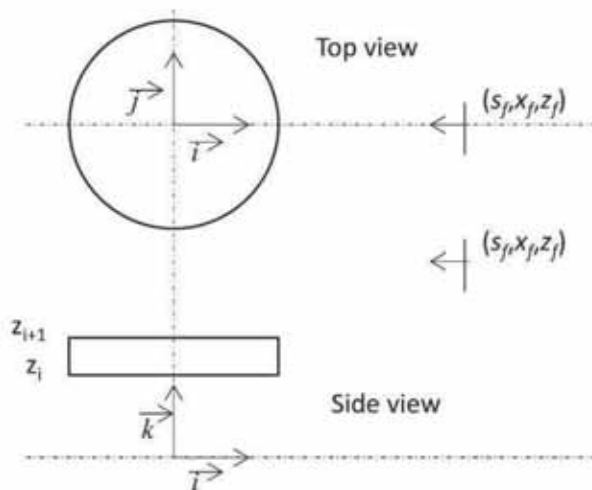
Pro segment o výšce 1,0 m, pod kterým je pouze jeden prstenec 0,5 m. Z rovnice (A.3) lze vnější a vnitřní poloměr mezikruží vypočítat jako

$$r(z_i = 0,0) = 2,00 \text{ m} \quad (\text{B.5})$$

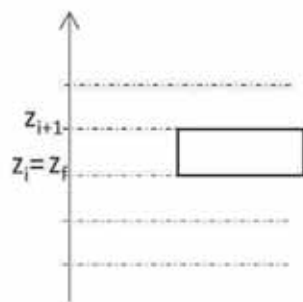
$$r(z_{i+1} = 0,5) = 1,84 \text{ m}$$

Dopadající tepelný tok je součtem všech příspěvků, viz rovnice (A.9). Na povrchu 1 je dosažen tepelný tok 76,36 kW/m², který za předpokladu emisivity 0,7 vede na hodnotu tepelného toku 53,45 kW/m², který je povrchem přijímán.

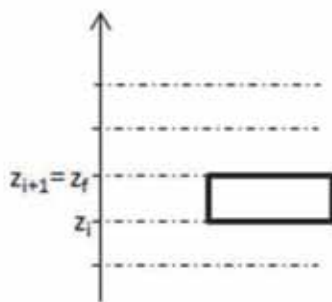
Obrázek B.9 zobrazuje příklad zpracovaný v tabulkového procesoru Excel.



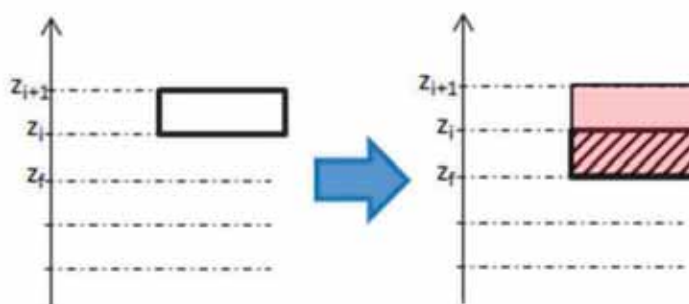
Obrázek B.4 Souřadnice plochy 1



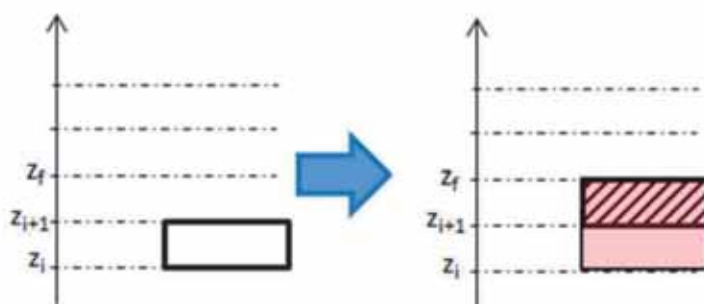
Obrázek B.5 Vzájemná poloha plochy 1: válec a rozložení, případ a



Obrázek B.6 Vzájemná poloha plochy 1: válec a rozložení, případ b



Obrázek B.7 Vzájemná poloha plochy 1: válec a rozložení, případ c

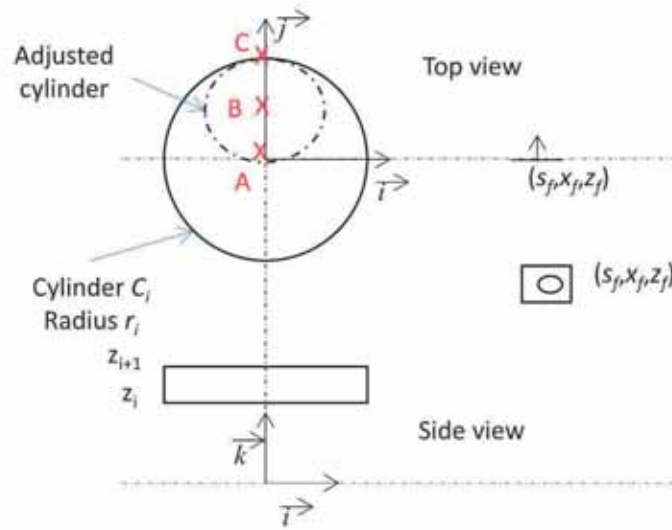


Obrázek B.8 Vzájemná poloha plochy 1: válec a rozložení, Příklad d

| Input data | | | | | Constant | | Section coordinate | | | Intermediate variables | | | | | | | |
|------------------------------|-------|------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-------|----|------------------------|--------|--------|-------|---------|------|------|------|
| HRR | Dfire | Q | Q | hf | σ | Tab _s | sf | xf | zf | z_{virt} | l | | | | | | |
| kW/m ² | m | W | MW | m | | | m | m | m | | | | | | | | |
| 1000 | 4 | 12566370.6 | 12.57 | 6.15 | 5.67E-08 | 273.15 | 2.5 | 0 | 1 | -0.46 | 2.5 | | | | | | |
| Cylinder | | | | | | | | | | | | | Ring | | | | |
| zi | Tf | ri | F _{cylinder_zi} | F _{ring_zi} | Flux _{face1} | Fi | Fi+1 | S | X | A | Hi | Hi+1 | zi-zf | zi+1-zf | H | Ri | Ri+1 |
| m | °C | m | - | - | kW/m ² | - | - | - | - | - | - | - | m | m | - | - | - |
| 0 | 900 | 2.00 | 0.0726 | 0 | 7.79 | 0.3705 | 0.2979 | 1.25 | 0 | 1.56 | 0.50 | 0.25 | 1.00 | 0.50 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 900 | 1.84 | 0.2374 | 0.0555 | 31.45 | 0.2374 | 0.0000 | 1.36 | 0 | 1.85 | 0.27 | 0.00 | 0.50 | 0.00 | 0.20 | 0.80 | 0.70 |
| 1 | 900 | 1.67 | 0.1893 | 0 | 20.33 | 0.0000 | 0.1893 | 1.49 | 0 | 2.23 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.50 | 0 | 0.73 | 0.60 |
| 1.5 | 900 | 1.51 | 0.0823 | 0 | 8.84 | 0.1514 | 0.2337 | 1.65 | 0 | 2.73 | 0.33 | 0.66 | 0.50 | 1.00 | 0 | 0.67 | 0.60 |
| 2 | 900 | 1.35 | 0.0361 | 0 | 3.88 | 0.1953 | 0.2315 | 1.85 | 0 | 3.43 | 0.74 | 1.11 | 1.00 | 1.50 | 0 | 0.60 | 0.50 |
| 2.5 | 900 | 1.19 | 0.0177 | 0 | 1.91 | 0.1958 | 0.2136 | 2.11 | 0 | 4.43 | 1.26 | 1.68 | 1.50 | 2.00 | 0 | 0.54 | 0.40 |
| 3 | 900 | 1.02 | 0.0095 | 0 | 1.02 | 0.1797 | 0.1893 | 2.44 | 0 | 5.95 | 1.95 | 2.44 | 2.00 | 2.50 | 0 | 0.47 | 0.40 |
| 3.5 | 900 | 0.86 | 0.0054 | 0 | 0.58 | 0.1564 | 0.1618 | 2.90 | 0 | 8.41 | 2.90 | 3.48 | 2.50 | 3.00 | 0 | 0.41 | 0.30 |
| 4 | 900 | 0.70 | 0.0031 | 0 | 0.34 | 0.1296 | 0.1328 | 3.57 | 0 | 12.77 | 4.29 | 5.00 | 3.00 | 3.50 | 0 | 0.34 | 0.20 |
| 4.5 | 828 | 0.54 | 0.0018 | 0 | 0.15 | 0.1009 | 0.1027 | 4.66 | 0 | 21.68 | 6.52 | 7.45 | 3.50 | 4.00 | 0 | 0.28 | 0.20 |
| 5 | 708 | 0.37 | 0.0010 | 0 | 0.05 | 0.0711 | 0.0720 | 6.68 | 0 | 44.58 | 10.68 | 12.02 | 4.00 | 4.50 | 0 | 0.21 | 0.10 |
| 5.5 | 615 | 0.21 | 0.0004 | 0 | 0.02 | 0.0405 | 0.0409 | 11.80 | 0 | 139.24 | 21.24 | 23.60 | 4.50 | 5.00 | 0 | 0.15 | 0.00 |
| 6 | 540 | 0.05 | 0.0001 | 0 | 0.00 | 0.0095 | 0.0096 | 50.71 | 0 | 2571.11 | 101.41 | 111.55 | 5.00 | 5.50 | 0 | 0.08 | 0.00 |
| 6.5 | 479 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.50 | 6.00 | 0 | 0.02 | 0 |
| 7 | 429 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.00 | 6.50 | 0 | 0 | 0 |
| 7.5 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.50 | 1.00 | 0 | 0 | 0 |
| Incident heat flux on face 1 | | | | | 76.36 | kW/m ² | | | | | | | | | | | |
| Absorbed heat flux on face 1 | | | | | 53.45 | kW/m ² | | | | | | | | | | | |

Obrázek B.9 Příklad tabulkového procesoru pro výpočet tepelného toku dopadajícího na plochu

Pro plochu 2 a plochu 4 nelze rovnici (B.9) použít přímo, protože některé části plamene nejsou viditelné. Pro plochu 2 a válec C_i (v rozsahu mezi z_i a z_{i+1}) je poloha plochy 2 definována v lokálním souřadném systému $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ jako (s_f, x_f, z_f) , viz obrázek B.10. Válec C_i je doplněn o body A, B a C.



Obrázek B.10 Souřadnice plochy 2

Bod A odpovídá bodu s minimální y-souřadnicí r_{min} pro nastavený válec

$$r_{min} = \max(-r_i, x_f) \quad (\text{B.6})$$

Bod C odpovídá bodu s maximální y-souřadnicí r_{max} pro upravený válec

$$r_{max} = r_i \quad (\text{B.7})$$

Bod B odpovídá středu nastaveného válce

$$y_{centre} = \frac{r_{min} + r_{max}}{2} \quad (\text{B.8})$$

Poloměr válce plamene je

$$r_{adjusted} = \frac{r_{max} - r_{min}}{2} \quad (\text{B.9})$$

To umožňuje stanovit parametry, které budou použity v rovnici (B.6) pro upravený válec.

U válce C_0 mezi 0 m a 0,5 m je počáteční poloměr 2 m a lze psát

$$\begin{aligned} r_{min} &= \max(-2.0) = 0 \text{ m} \\ r_{max} &= 2 \text{ m} \\ y_{centre} &= \frac{0 + 2}{2} = 1 \text{ m} \\ r_{adjusted} &= \frac{2 - 0}{2} = 1 \text{ m} \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

Pro vzájemnou výšku plochy 2 a upraveného válce platí jako pro plochu 1:

$$\begin{aligned} \phi_i &= \phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \begin{pmatrix} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_i - z_f| \end{pmatrix} \\ \phi_{i+1} &= \phi_{dA_1 \rightarrow A_2} \begin{pmatrix} S = y_{centre} - x_f \\ x = S_f \\ r = r_{adjusted} \\ h = |z_{i+1} - z_f| \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (B.11)$$

Konfigurační součinitel ϕ mezi plochou 2 a nastaveným válcem se rovná

$$\phi = |\phi_{i+1} - \phi_i| \quad (B.12)$$

Radiační tepelný tok vyzařovaný mezikruží je omezen na mezikruží o 0,5 m. Přesněji na prstenec definovaný jeho vnitřním poloměrem a vnějším poloměrem. Odpovídají poloměru válce, který byl dříve vypočítán pro vnější poloměr, 1 m. Pro vnitřní poloměr je počáteční poloměr 1,84 m, viz hodnota r_i při $z_i = 0,5$ m na obrázku B.11 zmenšen na 0,92 m.

Dopadající tepelný tok na plochu 2 je součtem příspěvků plamene, které se rovná 7,41 kW/m². Pro součinitel emisivity 0,7 je tepelný tok 5,19 kW/m². Obrázek B.11 ukazuje řešení v tabulkovém procesoru.

Pro radiační tepelný tok lze shrnout, že

$$\begin{aligned} \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_1} &= 53,45 \text{ kW/m}^2 \\ \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_2} &= 6,00 \text{ kW/m}^2 \\ \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_3} &= 0 \text{ kW/m}^2 \\ \dot{h}_{solid\ flame \rightarrow face_4} &= 6,00 \text{ kW/m}^2 \end{aligned} \quad (B.13)$$

Šířka HEB 300 je pro každou plochu 0,3 m. Celkový tepelný tok přijatý profilem ve výšce 1,0 m je

$$\dot{h}_{total, section\ z_j} = \frac{53,45 + 6,00 + 0 + 6,00}{4} = 16,36 \text{ kW/m}^2 \quad (B.14)$$

| zi | Tf | ri | F _{cylinder,zi} | F _{ring,zi} | Flux _{face2} | Ring | | |
|-----|-----|------|--------------------------|----------------------|-----------------------|------|------|------|
| m | °C | m | - | - | kW/m ² | H | Ri | Ri+1 |
| 0 | 900 | 2.00 | 0.0175 | 0 | 1.88 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 0.5 | 900 | 1.84 | 0.0193 | 0.0060 | 2.71 | 0.20 | 0.40 | 0.37 |
| 1 | 900 | 1.67 | 0.0160 | 0 | 1.72 | 0 | 0.37 | 0.33 |
| 1.5 | 900 | 1.51 | 0.0103 | 0 | 1.10 | 0 | 0.33 | 0.30 |
| 2 | 900 | 1.35 | 0.0056 | 0 | 0.60 | 0 | 0.30 | 0.27 |
| 2.5 | 900 | 1.19 | 0.0028 | 0 | 0.30 | 0 | 0.27 | 0.24 |
| 3 | 900 | 1.02 | 0.0014 | 0 | 0.15 | 0 | 0.24 | 0.20 |
| 3.5 | 900 | 0.86 | 0.0006 | 0 | 0.07 | 0 | 0.20 | 0.17 |
| 4 | 900 | 0.70 | 0.0003 | 0 | 0.03 | 0 | 0.17 | 0.14 |
| 4.5 | 828 | 0.54 | 0.0001 | 0 | 0.01 | 0 | 0.14 | 0.11 |
| 5 | 708 | 0.37 | 0.0000 | 0 | 0.00 | 0 | 0.11 | 0.07 |
| 5.5 | 615 | 0.21 | 0.0000 | 0 | 0.00 | 0 | 0.07 | 0.04 |
| 6 | 540 | 0.05 | 0.0000 | 0 | 0.00 | 0 | 0.04 | 0.01 |
| 6.5 | 479 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.00 |
| 7 | 429 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7.5 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Input data | | | | |
|-------------------|-------|------------|-------|------|
| HRR | Dfire | Q | Q | hf |
| kW/m ² | m | W | MW | m |
| 1000 | 4 | 12566370.6 | 12.57 | 6.15 |

| Section coordinate | | |
|--------------------|----|----|
| sf | xf | zf |
| m | m | m |
| 2.5 | 0 | 1 |

| Constant | | Intermediate variables | |
|----------|--------|------------------------|-----|
| σ | Tabs | z _{int} | l |
| 5.67E-08 | 273.15 | -0.46 | 2.5 |

| | | | |
|------------------------------|--|------|-------------------|
| Incident heat flux on face 2 | | 8.57 | kW/m ² |
| Absorbed heat flux by face 2 | | 6.00 | kW/m ² |

| Modified cylinder / ring | | | | Cylinder | | | | | | | | | |
|--------------------------|------|-------------|---------------------|----------|--------|------|------|--------|----------|--------|--------|--------------------------------|----------------------------------|
| rmin | rmax | ri_adjusted | Y _{center} | Fi | Fi+1 | s | S | X | A | Hi | Hi+1 | z _i -z _i | z _{i+1} -z _i |
| m | m | m | m | - | - | - | - | - | - | - | - | m | m |
| 0 | 2.00 | 1.00 | 1.00 | 0.0403 | 0.0229 | 1.00 | 1.00 | 2.50 | 7.25 | 1.00 | 0.50 | 1.00 | 0.50 |
| 0 | 1.84 | 0.92 | 0.92 | 0.0193 | 0.0000 | 0.92 | 1.00 | 2.72 | 8.40 | 0.54 | 0.00 | 0.50 | 0.00 |
| 0 | 1.67 | 0.84 | 0.84 | 0.0000 | 0.0160 | 0.84 | 1.00 | 2.99 | 9.91 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.50 |
| 0 | 1.51 | 0.76 | 0.76 | 0.0130 | 0.0233 | 0.76 | 1.00 | 3.31 | 11.93 | 0.66 | 1.32 | 0.50 | 1.00 |
| 0 | 1.35 | 0.67 | 0.67 | 0.0185 | 0.0241 | 0.67 | 1.00 | 3.70 | 14.72 | 1.48 | 2.22 | 1.00 | 1.50 |
| 0 | 1.19 | 0.59 | 0.59 | 0.0187 | 0.0215 | 0.59 | 1.00 | 4.21 | 18.74 | 2.53 | 3.37 | 1.50 | 2.00 |
| 0 | 1.02 | 0.51 | 0.51 | 0.0161 | 0.0174 | 0.51 | 1.00 | 4.88 | 24.81 | 3.90 | 4.88 | 2.00 | 2.50 |
| 0 | 0.86 | 0.43 | 0.43 | 0.0124 | 0.0130 | 0.43 | 1.00 | 5.80 | 34.64 | 5.80 | 6.96 | 2.50 | 3.00 |
| 0 | 0.70 | 0.35 | 0.35 | 0.0086 | 0.0089 | 0.35 | 1.00 | 7.15 | 52.09 | 8.58 | 10.01 | 3.00 | 3.50 |
| 0 | 0.54 | 0.27 | 0.27 | 0.0053 | 0.0054 | 0.27 | 1.00 | 9.31 | 87.70 | 13.04 | 14.90 | 3.50 | 4.00 |
| 0 | 0.37 | 0.19 | 0.19 | 0.0026 | 0.0027 | 0.19 | 1.00 | 13.35 | 179.33 | 21.37 | 24.04 | 4.00 | 4.50 |
| 0 | 0.21 | 0.11 | 0.11 | 0.0009 | 0.0009 | 0.11 | 1.00 | 23.60 | 557.97 | 42.48 | 47.20 | 4.50 | 5.00 |
| 0 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.0000 | 0.0000 | 0.02 | 1.00 | 101.41 | 10285.43 | 202.82 | 223.11 | 5.00 | 5.50 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.50 | 6.00 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.00 | 6.50 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.50 | 1.00 |

Obrázek B.11 Příklad excelu pro výpočet tepelného toku dopadajícího na plochu 2

PŘÍLOHA C

ALTERNATIVNÍ MODEL OHŘEVU SLOUPU

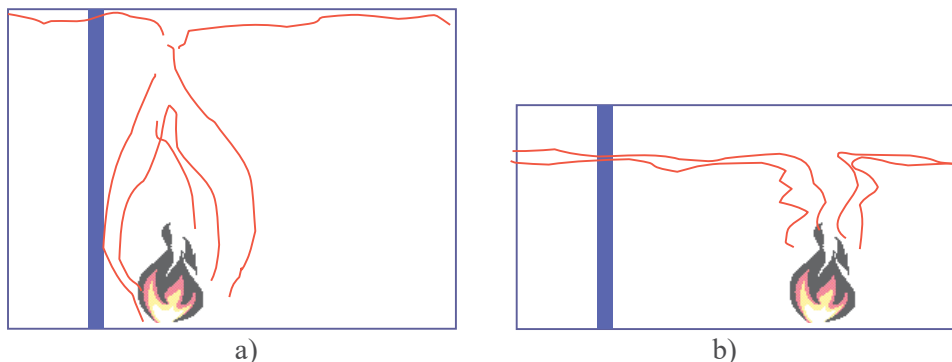
C.1 Model teploty sloupu

Model pro výpočet teploty sloupu s plamenem ve tvaru válce vychází z postupů převzatých do norem pro navrhování, konkrétně ČSN EN 1991-1-2^[2], které dále rozšiřuje.

Uplatní se v těch případech, kdy se posuzují účinky lokálního požáru na sloup ve volném prostoru nebo v požárním úseku o velkých rozměrech a relativně velké výšky (například průmyslové, sportovní haly), kdy se pod stropem vytvoří relativně nízká vrstva horkých plynů o malé teplotě, viz obrázek C.1a). V takovém případě bude horní část sloupu pod stropem relativně chladná, ale sloup se bude ohřívat vlivem sálání z plamenů lokálního požáru ve spodní části, proto je vhodné počítat se situací, kdy je sloup velmi blízko lokálnímu požáru, ale mimo jeho půdorys. Z důvodu numerické stability se doporučuje, aby vzdálenost povrchu sloupu od povrchu plamenů byla cca 300 mm.

V případě nízkého požárního úseku malých rozměrů a sloupu ve větší vzdálenosti od požáru se projeví vliv horké vrstvy plynů akumulovaných pod stropem, zatímco vliv sálání z plamenů se výrazně neuplatní, viz obrázek C.1b). Takový sloup může dosáhnout značně vysokých teplot v horní části a v takovém případě je třeba použít model podle Hasemiho^[12] shrnutý v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2^[2]. Tento postup není v dalším textu popisován.

Je pochopitelné, že nelze obecně určit, kdy se má konkrétní způsob určení teploty sloupu použít a je třeba posoudit každý případ samostatně podle všech okolností.



Obrázek C.1 Sloup při lokálním požáru a) ovlivněný sáláním z plamenů, b) ovlivněný teplotou horkých plynů akumulovaných pod stropem

Základem předpovědi teploty sloupu je model lokálního požáru podle Heskestad^[11], který byl přejet do přílohy C normy ČSN EN 1991-1-2^[2]. Tento model pracuje s lokálním požárem o kruhovém půdorysu D a udává délku plamene L_f v libovolném časovém okamžiku t

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5} \quad (C.1)$$

a také teplotu v plamenech nebo oblaku plynů θ_g v časovém okamžiku t a libovolné výšce nad základnou požáru z , tj. nad podlahou požárního úseku, plošinou v hale apod.

$$\theta_g = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900^\circ\text{C} \quad (C.2)$$

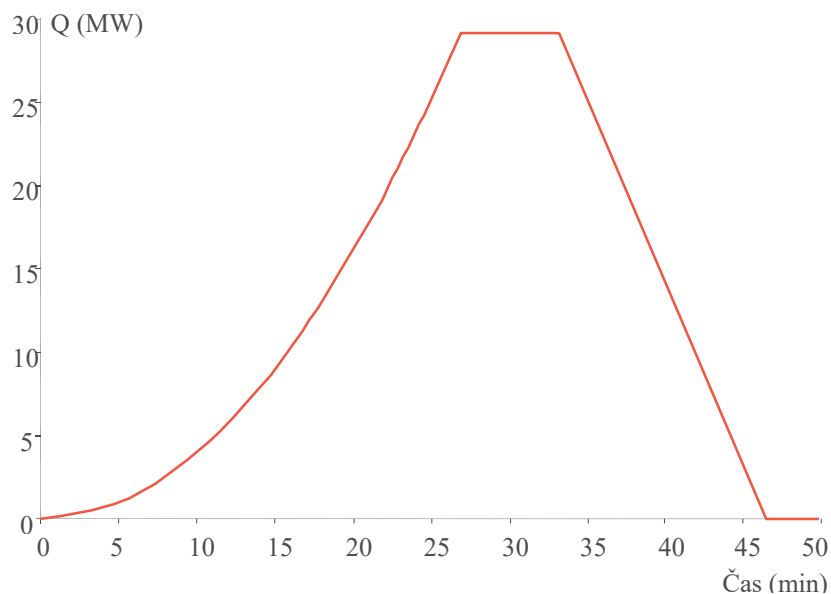
kde z_0 je virtuální počátek určený podle vztahu

$$z_0 = -1,02 D + 0,00524 Q^{2/5} \quad (C.3)$$

a konvekční složka tepelného toku Q_c

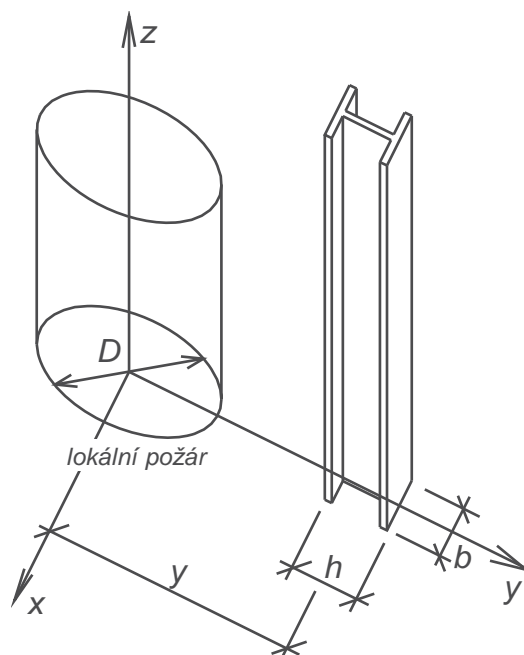
$$Q_c = 0,8 Q \quad (C.4)$$

Vstupním údajem je (kromě maximálního průměru lokálního požáru D) rychlost uvolňování tepla Q . Rychlost uvolňování tepla je možno převzít z experimentu nebo použít libovolný model, zpravidla se použije t^2 závislost podle přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2^[2], viz obrázek C.2.



Obrázek C.2 Rychlost uvolňování tepla, t-kvadratický model

Přenos tepelného toku do sloupu se uskutečňuje výhradně sáláním, protože sloup není v kontaktu s oblakem horkých plynů ani s plameny, ale je obklopen chladným vzduchem o běžné teplotě (dále se předpokládá teplota okolí 20°C). Pro potřeby výpočtu je lokální požár nahrazen válcovou plochou (obrázek C.3), jejíž teplota se určuje podle vztahu C.2. Je tedy zřejmé, že teplota válcové plochy se mění jednak v čase t a také po výšce z , což výpočet přenosu tepla sáláním značně komplikuje.



Obrázek C.3 Sloup při lokálním požáru, model

Pro výpočet sálavého tepelného toku z válcové plochy, která nahrazuje plameny, je třeba ji rozdělit na jednotlivé prstence, viz obrázek C.4. V dalším výpočtu se uvažuje teplota těchto prstenců konstantní, proto jejich výška do jisté míry ovlivňuje přesnost výpočtu. Tepelný tok dopadající na libovolné místo na povrchu sloupu (jeho tepelný zisk) je možno obecně určit podle vztahu

$$h_{net,zisk} = \phi \varepsilon \sigma \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (C.5)$$

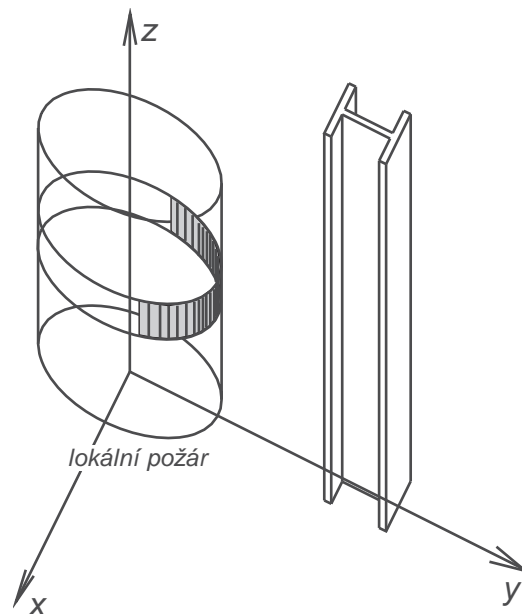
kde teplota sálající plochy (plamenů) θ_g závisí na výšce z nad základnou požáru a určí se jako teplota plynů lokálního požáru podle vztahu C.2, θ_m je teplota sloupu v tomto místě, σ je Stephan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), ε je emisivita ($\varepsilon = 0,7$) a ϕ je polohový součinitel.

Při určování tepelného toku dopadajícího na sloup je třeba zohlednit vliv sálání pomocí polohového součinitele.

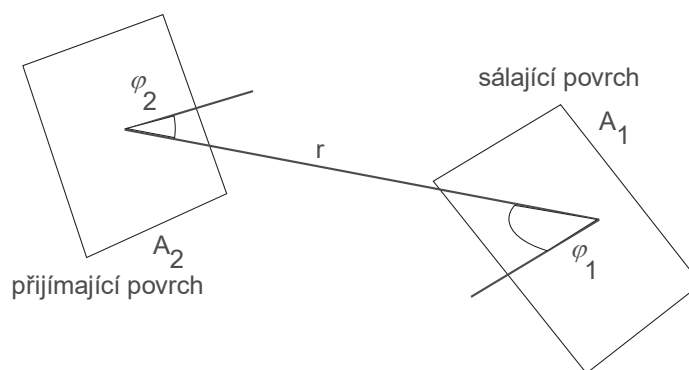
Polohový součinitel ϕ zohledňuje orientaci vyzařující plochy (povrchu plamenů) a plochy, na které záření - sálání dopadá, tedy povrchy sloupů. Polohový součinitel se obecně určí jako

$$\phi = \int_{A_1} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (C.6)$$

kde úhel vyzařování φ_1 z plochy A_1 a dopadu záření φ_2 na plochu A_2 jsou na obrázku C.5, viz také ČSN EN 1991-1-2^[2], Příloha G.

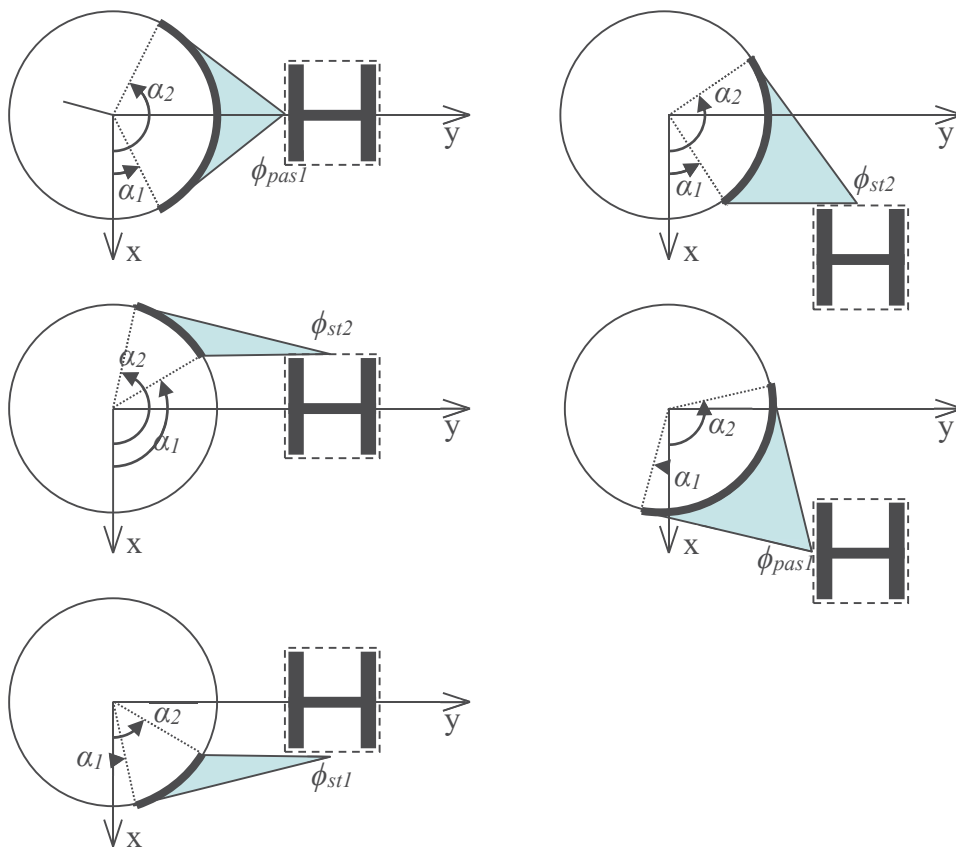


Obrázek C.4 Dělení prstence pro určení polohového součinitele



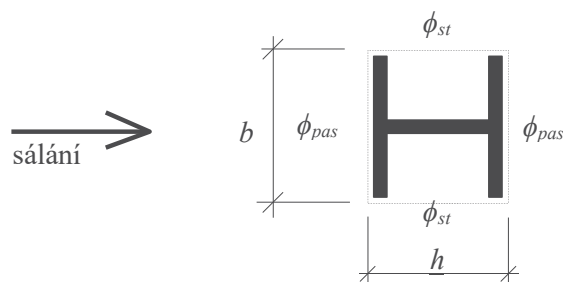
Obrázek C.5 Polohový součinitel

Vzhledem k tomu, že uvedený vztah je použitelný pro rovinné plochy, bylo nutno prstenec na sálající válcové ploše rozdělit na dílčí plošky, jak je patrné z obrázek C.4, a polohový součinitel (a následně sálavý tepelný tok) určit pro každou tuto dílčí plošku na prstenci válcové plochy. Přitom je třeba zohlednit, že na posuzovaný bod na sloupu nedopadá tepelný tok z celého prstence, ale jen z jeho části, která je z tohoto bodu přímo viditelná, viz obrázek C.6.



Obrázek C.6 Části prstence pro výpočet sálavého tepelného toku dopadajícího na povrch sloupu vzhledem k vzájemné poloze sloupu a požáru

Podobný přístup je třeba uplatnit i pro přijímající plochu, tedy pro povrch sloupu. Vzhledem k tomu, že se předpokládá použití průřezů tvaru I nebo H, které jsou příliš složité a tedy nevhodné pro podrobný výpočet polohových součinitelů na celém povrchu, byl tvar průřezu sloupu zjednodušen do obdélníkového obrysu, na nějž dopadá sálavý tepelný tok, viz obr. C.7. Tento postup je samozřejmě použitelný i pro jiné tvary průřezu sloupu, například uzavřené čtvercové nebo obdélníkové průřezy.



Obrázek C.7 Obálka průřezu a polohové součinitele na povrchu sloupu na plochách vystavených sálání

Výsledný tepelný tok od účinků sálání z jednoho prstence (s konstantní teplotou) na sledovaný bod na sloupu se potom určí jako součet tepelných toků z jednotlivých dílčích plošek prstence a musí zahrnovat všechny povrchy sloupu, na které sálavý tepelný tok dopadá.

$$h_{net,zisk} = \sum_{\text{povrchy plošky}} \sum \phi \varepsilon \sigma \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (C.7)$$

Protože je emisivita, teplota sálajícího povrchu (prstence) i teplota sloupu konstantní, je možno předchozí výraz upravit a součet dílčích tepelných toků nahradit jediným výpočtem tepelného toku s celkovým polohovým součinitelem vyjadřujícím účinek sálání z prstence na posuzovaný bod sloupu. Tepelný tok se tedy určí jako

$$h_{net,zisk} = \phi_{celk} \varepsilon \sigma \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (C.8)$$

kde celkový polohový součinitel je

$$\phi_{celk} = \frac{b (\phi_{pas1} + \phi_{pas1}) + h (\phi_{st1} + \phi_{st2})}{2b + 2h} \quad (C.9)$$

Kromě dopadajícího sálavého tepelného toku je sloup vystaven okolnímu chladnému vzduchu a odevzdává tedy část tepla do svého okolí. Přestup tepla prouděním a sáláním (předpokládá se teplota okolí 20°C) se určí jako

$$h_{net,ztraty} = \varepsilon \sigma \left((\theta_m + 273)^4 - (20 + 273)^4 \right) + \alpha_c (\theta_m - 20) \quad (C.10)$$

kde součinitel přestupu tepla $\alpha_c = 35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Celkový tepelný tok, který přispívá k zahřívání sloupu a který se použije pro výpočet jeho teploty ve zvoleném bodě, se určí jako součet dílčích tepelných toků z jednotlivých prstenců podle vztahu C.8 zmenšený o ztráty tepla do okolního prostředí (vztah C.10), tedy

$$h_{net} = \sum_{prstence} h_{net,zisk} - h_{net,ztraty} \quad (C.11)$$

Takto určený tepelný tok je možno použít pro výpočet teploty sloupu. K tomu se použije přírůstková metoda z ČSN EN 1993-1-2^[3]

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net} \Delta t \quad (C.12)$$

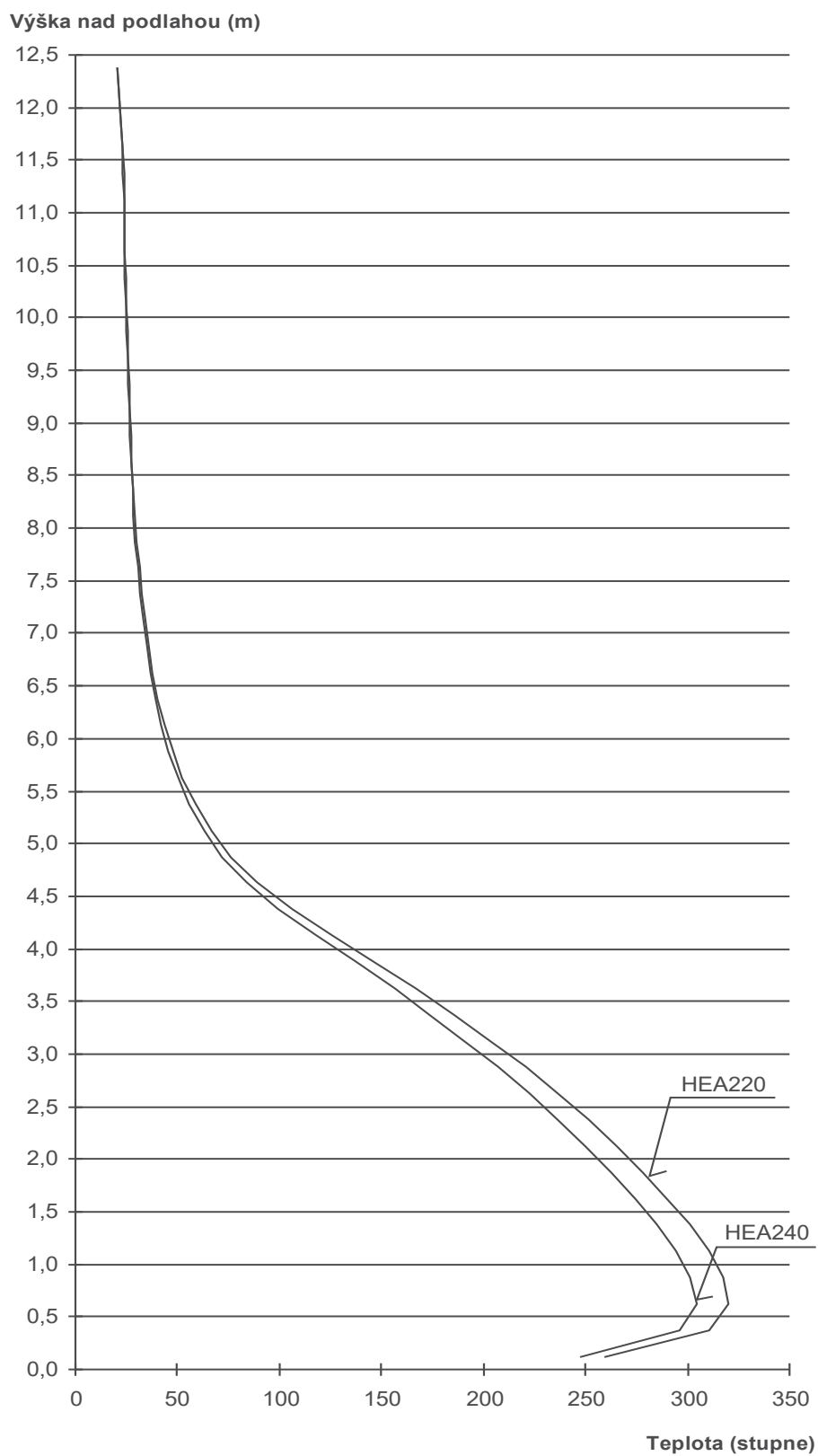
kde se použije součinitel zastínění $k_{sh} = 1$ (vliv stínění je totiž zahrnut v určení polohového součinitele ϕ_{celk}), A_m/V je součinitel průřezu, c_a je měrné teplo oceli, ρ_a je hustota oceli a Δt je časový přírůstek zpravidla roven nebo menší než 5 s.

Z předchozího textu je patrné, že tento v principu jednoduchý model vede k poměrně zdlouhavému výpočtu polohového součinitele, jehož vyčíslení tužkou na papíře je prakticky nemožné a použití výpočetní techniky se v tomto případě jeví jako nezbytné. Řešením by mohlo být použití tabulkového procesoru, ale charakter výpočtu (několik do sebe vložených cyklů) naznačuje, že sestavení programu ve vhodném programovacím jazyce poskytne obecnější výpočetní nástroj. Všechny výstupy v této příloze byly získány tímto způsobem.

Je třeba připomenout, že tímto postupem se určí časový průběh teploty sloupu v libovolně zvoleném bodě. Pro výpočet průběhu teploty sloupu po jeho výšce a nalezení místa s nejvyšší teplotou, která se následně použije pro posouzení únosnosti sloupu, je třeba tento výpočet provést pro několik bodů v různých výškách, viz obrázek C.8.

Výpočet nezohledňuje vedení tepla podél sloupu. To je konzervativní předpoklad poskytující vyšší teploty ve sloupu, pokud by vedení tepla bylo zohledněno, teplo by se z místa s vyšší teplotou šířilo do míst chladnějších. Uvedený výpočet by bylo velmi jednoduché v tomto duchu upravit. Za předpokladu, že by byl sloup po výšce rozdělen na několik stejných úseků, bylo by třeba po spočtení jejich teploty za přírůstek času Δt takto získané teploty přepočítat s ohledem na vedení tepla. K tomuto účelu lze použít

jednorozměrnou metodu sítí (metoda konečných diferencí) pro vedení tepla a s takto získanými teplotami provést další krok přírůstkové metody.



Obrázek C.8 Teplota sloupu po výšce pro 2 průřezy

C.2 Řešené příklady

Metoda popsaná v příloze C byla použita pro výpočet teploty sloupů výrobní haly. Byly použity celkem tři požární scénáře.

V hale o rozměrech cca 60 m × 150 m a výšce 7 m je instalována linka pro obrábění kovů, tzn. jsou zpracovávány pouze nehořlavé materiály, proto předpoklad vzniku lokálního požáru vystihuje charakter požárního zatížení. Teplota sloupů při lokálním požáru je vypočtena pro tři požární scénáře: lokální požár obráběcího stroje, lokální požár vysokozdvizného vozíku a lokální požár skladu provozních olejových náplní, tj. záchytné jímky pod výdejním zařízením olejů. Zatímco první dva požární scénáře představují poměrně malé lokální požáry, třetí scénář v porovnání s oběma předchozími reprezentuje požár s větší intenzitou i delší dobou trvání.

Předpokládá se, že sloup není při požáru obklopen plameny. Vzdálenost středu sloupu od středu požáru byla zvolena:

$$x = 1350 \text{ mm pro požár lisu,}$$

$$x = 1750 \text{ mm pro požár vysokozdvizného vozíku,}$$

$$x = 1350 \text{ mm pro požár skladu provozních náplní,}$$

tzn. líc sloupu je ve vzdálenosti cca 250 mm od povrchu plamenů. Sloupy haly jsou průřezu HE260A.

C.2.1 Požár obráběcího stroje

Charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení vychází z hmotnosti a čisté výhřevnosti hořlavých součástí obráběcího stroje. Přesné určení druhu a množství hořlavých látek je obtížné, výpočet je založen na následujícím odhadu:

- elektrovýzbroj (izolace elektrických kabelů, spínače, kryty apod.),

$$m = 10 \text{ kg, } H_u = 40 \text{ MJ/kg}$$

- olejová náplň (převodový olej),

$$m = 5 \text{ kg, } H_u = 43,2 \text{ MJ/kg}$$

Charakteristická hodnota požárního zatížení je

$$Q_{f,k} = \sum m H_u = 10 \cdot 40 + 5 \cdot 43,2 = 616 \text{ MJ} .$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení je

$$Q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \prod \delta_{n,i} m Q_{f,k} = 2,2 \cdot 1,22 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 616 = 1326 \text{ MJ} .$$

Pro lokální požár jsou použity tyto parametry:

- rychlost rozvoje požáru: střední $t_\alpha = 300 \text{ s}$
- maximální rychlost uvolňování tepla $RHR_f = 500 \text{ kW/m}^2$
- požár o maximálním průměru $D = 2 \text{ m}$, plocha požáru je tedy

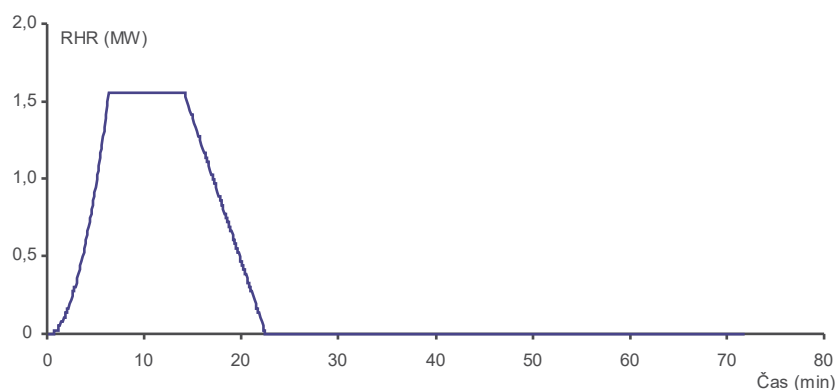
$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ m}^2$$

- maximální rychlost uvolňování tepla je

$$Q_{max} = A RHR_f = 3,14 \cdot 500 = 1,570 \text{ kW}$$

- poloha sloupu $y = 1350 \text{ mm}$.

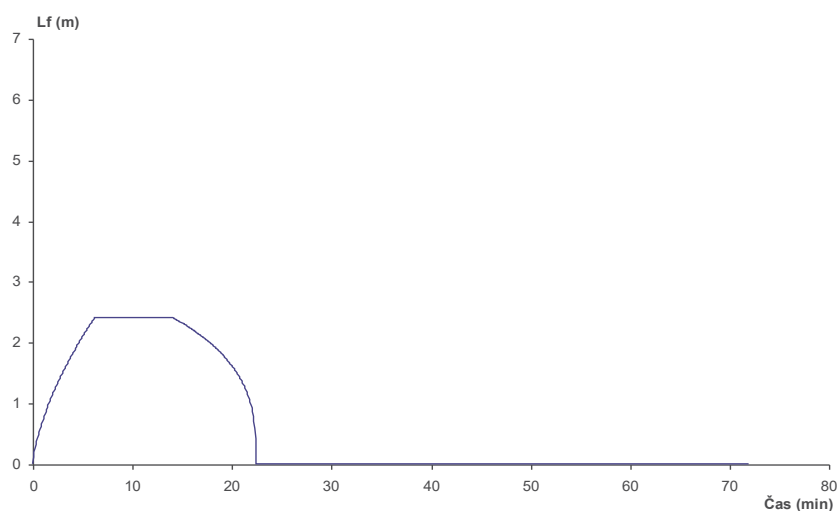
S použitím těchto údajů se určí časová závislost rychlosti uvolňování tepla, viz obr. C.9.



Obrázek C.9 Rychlost uvolňování tepla, požár obráběcího stroje

Doba rozhořívání trvá 6 min 16 s, oblast ustáleného hoření trvá 7 min 46 s, celková doba trvání požáru je 22 min 28 s. Maximální rychlost uvolňování tepla Q a rychlost rozvoje požáru t_a byly zvoleny tak, aby doba hoření odpovídala požadované době požární odolnosti 15 min.

Délka plamene v závislosti na čase je na obr. C.10.

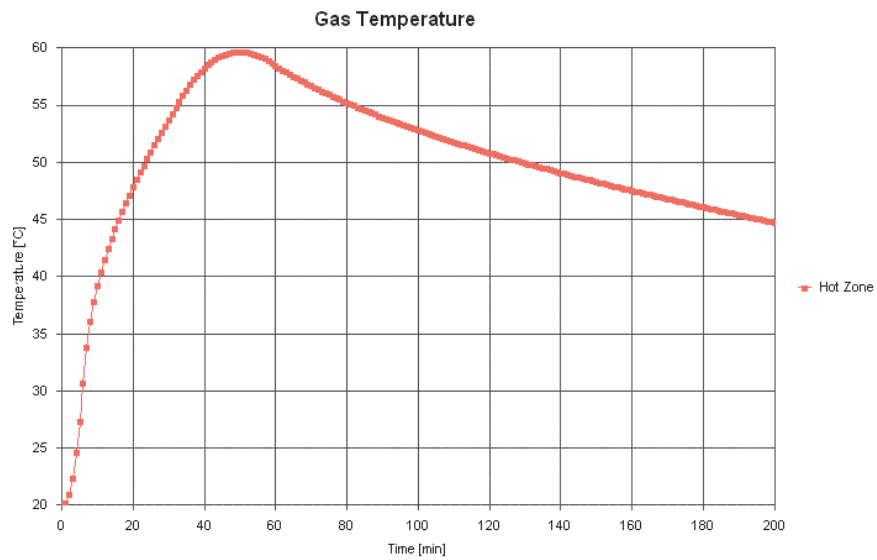


Obrázek C.10 Délka plamene, požár obráběcího stroje

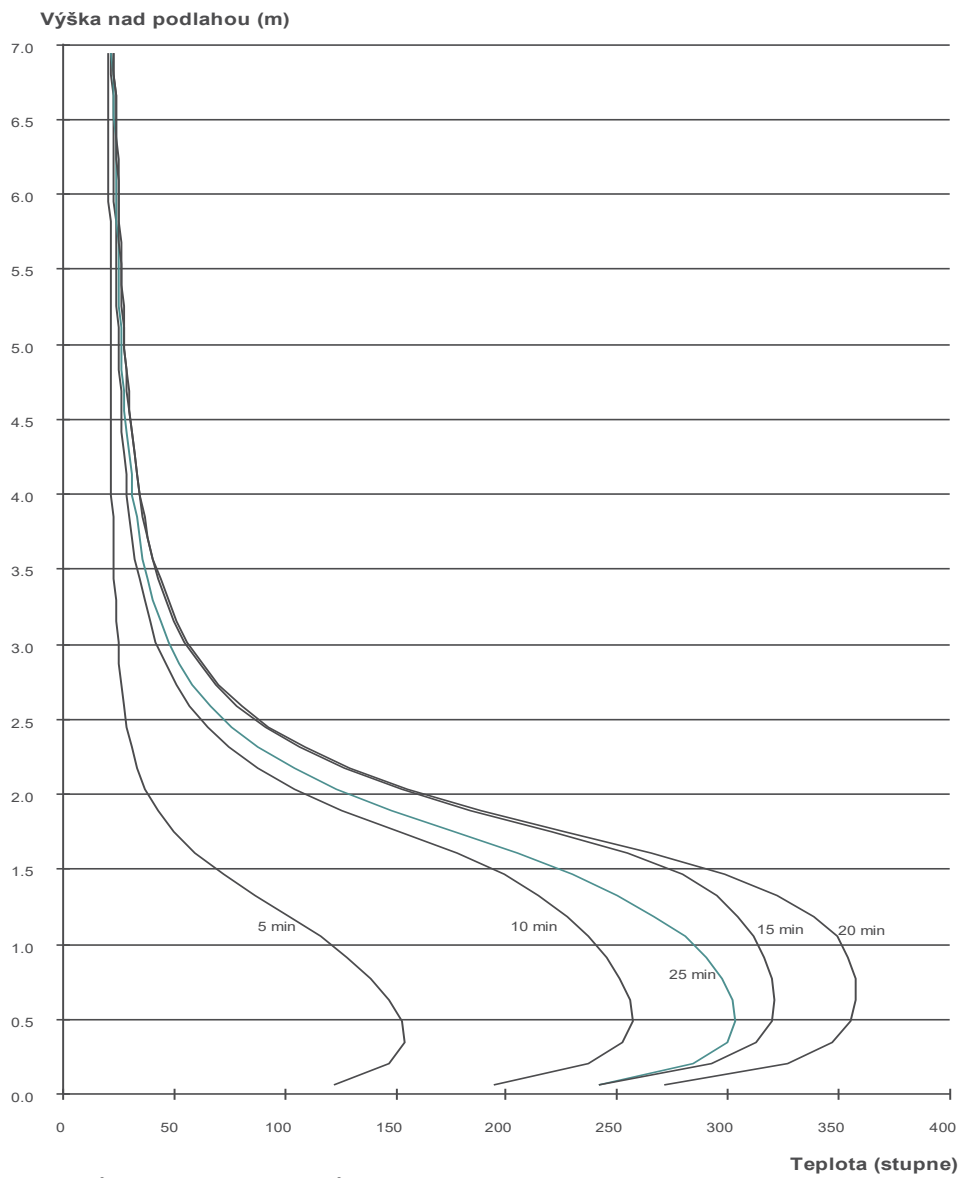
Maximální délka plamene je 2,41 m, plamen nedosahuje ke stropu haly.

Zónovým modelem (program OZone) byla určena teplota horké vrstvy, viz obr. C.11. Vzhledem k tomu, že maximální teplota podstropní vrstvy dosahuje pouze 60°C, je zřejmé, že vliv této horké vrstvy na teplotu sloupu je zanedbatelný.

Na obr. C.12 jsou uvedeny teploty po výšce sloupu v časech 5 min, 10 min, 15 min, 20 min a 25 min. Maximální dosažená teplota sloupu v čase 15 min je 320°C ve výšce 0,65 m nad podlahou.



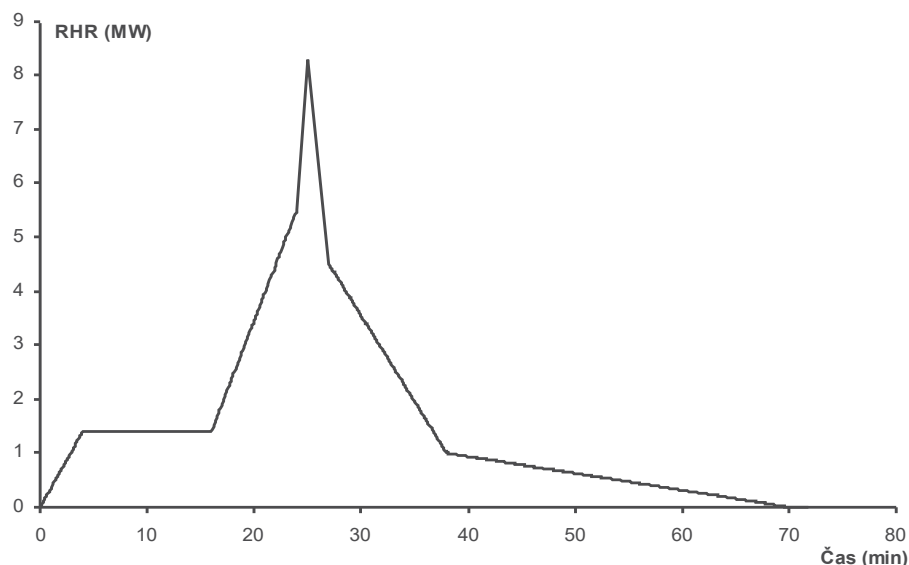
Obrázek C.11 Teplota horké vrstvy, požár obráběcího stroje



Obrázek C.12 Průběh teploty sloupů HEA 260 po výšce, požár obráběcího stroje

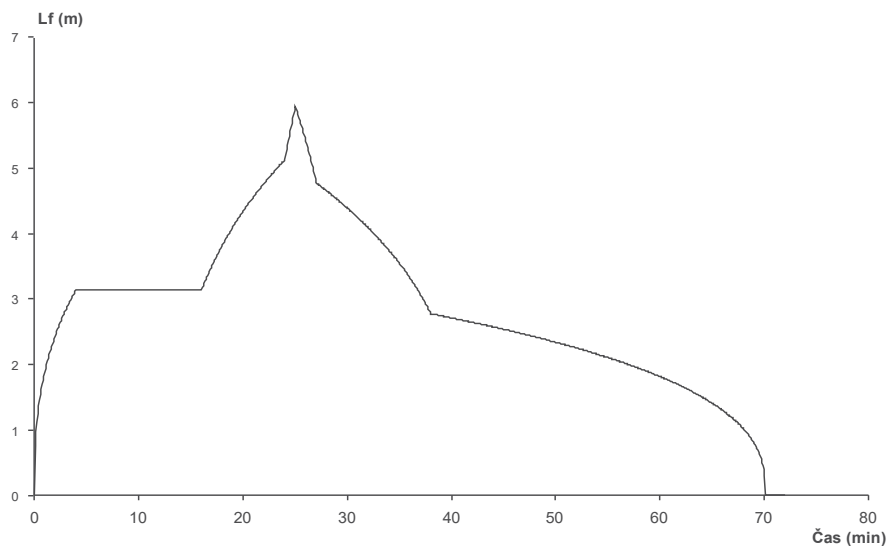
C.2.2 Požár vysokozdvížného vozíku

Pro výpočet průběhu lokálního požáru byly převzaty parametry požáru osobního automobilu podle materiálů projektu DIFISEK. Průměr požáru je zvolen stejný jako délka vysokozdvížného vozíku, tj. $D = 2,70$ m. Rychlost uvolňování tepla je na následujícím obrázku.



Obrázek C.13 Rychlost uvolňování tepla, požár vysokozdvížného vozíku

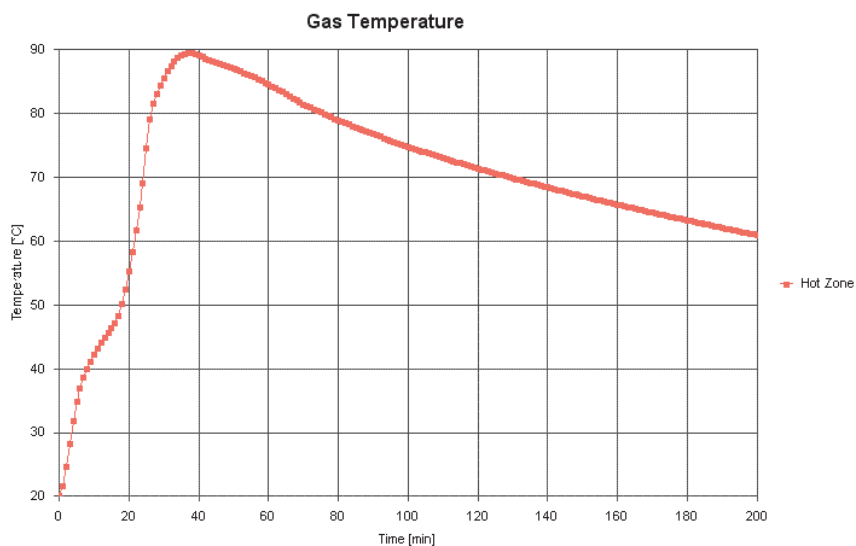
Maximální rychlost uvolňování tepla je 8 300 kW, požár trvá 70 min. Maximální délka plamene je 5,91 m (viz obr. C.14), plamen nedosahuje ke stropu haly.



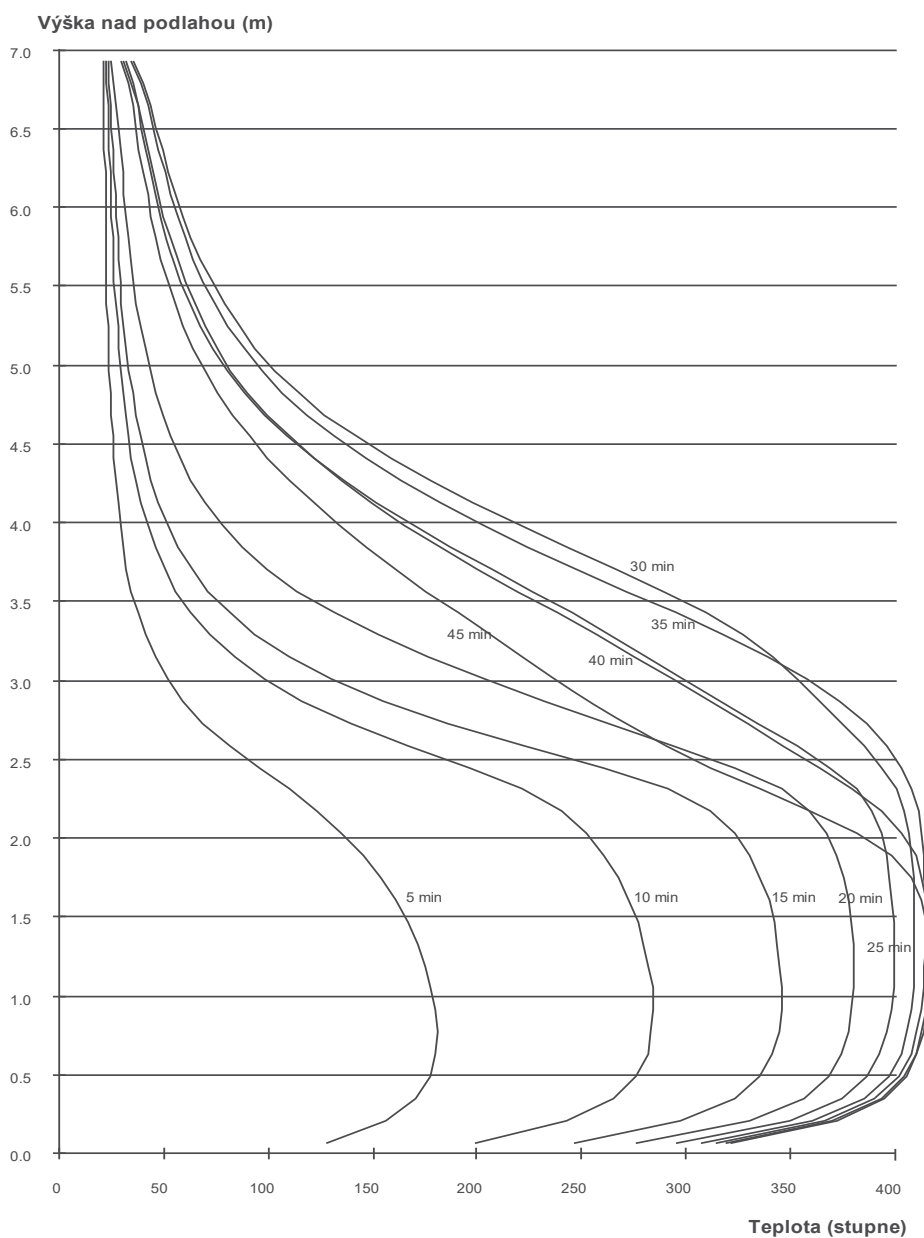
Obrázek C.14 Délka plamene, požár vysokozdvížného vozíku

Teplota v horké vrstvě spočtená programem OZone (obr. C.15) je pouze 90°C, nemá tedy vliv na teplotu sloupu, a rozhodující je účinek sálání na spodní část sloupu.

Maximální dosažená teplota sloupu v 15. min je 345°C ve výšce 1,10 m nad podlahou, viz obr. C.16.



Obrázek C.15 Teplota v horké vrstvě, požár vysokozdvizného vozíku



Obrázek C.16 Průběh teploty sloupů HEA 260 po výšce, požár vysokozdvizného vozíku

C.2.3 Požár skladu provozních olejových náplní

V prostoru haly je na 3 místech pohotovostní sklad olejů pro denní potřebu. Jedná se o převodové a hydraulické oleje a chladicí emulze skladované v sudech. V každém skladu (vyhrazený prostor se sběrnou jímkou proti úniku olejů) se nacházejí 3 sudy à 200 l oleje.

Pro účely posouzení se předpokládá, že jímka je vždy v nejnepříznivějším místě vzhledem k posuzovanému prvku (sklad tedy může být kdekoli v hale) a zanedbává se ochranný účinek plechových sudů, v kterých je olej skladován, nebo přesněji, že dojde k hoření oleje, který unikl do sběrné jímky.

Rychlost rozvoje tepla a rychlost hoření nejsou v normě ČSN EN 1991-1-2^[2] uvedeny. Pro určení výhřevnosti a rychlosti rozvoje tepla byly použity údaje podle A. Buchanana^[25], tab. 3.2, str. 42. Byly použity údaje pro kerosen, protože údaje pro převodové a hydraulické oleje nejsou dostupné. Průběh hoření nebude s největší pravděpodobností zásadně odlišný.

Pro kerosen je udávaná rychlost hoření 1,68 MW/m² půdorysné plochy. Tato hodnota platí pro požáry s průměrem větším než 2 m, kdy je hořící kerosen zpětně zahříván sáláním z plamenů požáru. To lze v tomto případě akceptovat, protože dojde k požáru olejů uniklých do sběrné jímky. Půdorysné rozměry sběrné jímky jsou 1,5 × 2 m, plocha jímky (maximální plocha lokálního požáru) je

$$A = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ m}^2$$

a náhradní průměr kruhového požáru o stejné ploše je

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3}{\pi}} = 1,954 \text{ m}.$$

Požární zatížení:

1 sud oleje, $m = 190 \text{ kg}$, $H_u = 43,2 \text{ MJ/kg}$

Charakteristická hodnota požárního zatížení je

$$Q_{f,k} = \sum m H_u = 3 \cdot 190 \cdot 43,2 = 24624 \text{ MJ}$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení je

$$Q_{f,d} = \delta_{q1} \delta_{q2} \prod \delta_{n,i} m Q_{f,k} = 2,014 \cdot 1,22 \cdot 1,095 \cdot 0,8 \cdot 24624 = 53000 \text{ MJ}.$$

Pro lokální požár jsou použity tyto parametry:

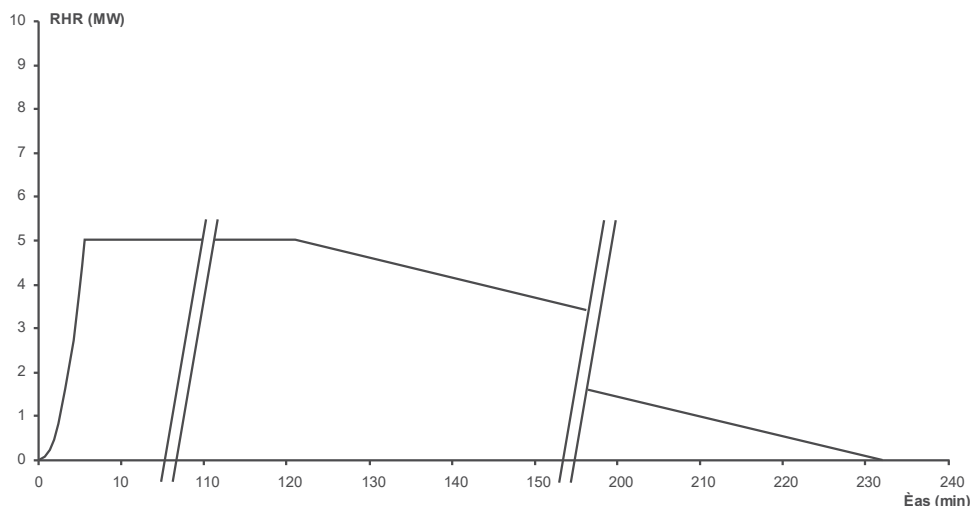
- rychlost rozvoje požáru: velká
 $t_\alpha = 150 \text{ s}$
- maximální rychlost uvolňování tepla:

$$RHR_f = 1680 \text{ kW} / \text{m}^2$$

Maximální rychlost uvolňování tepla je

$$Q_{max} = A RHR_f = 3 \cdot 1680 = 5040 \text{ kW}$$

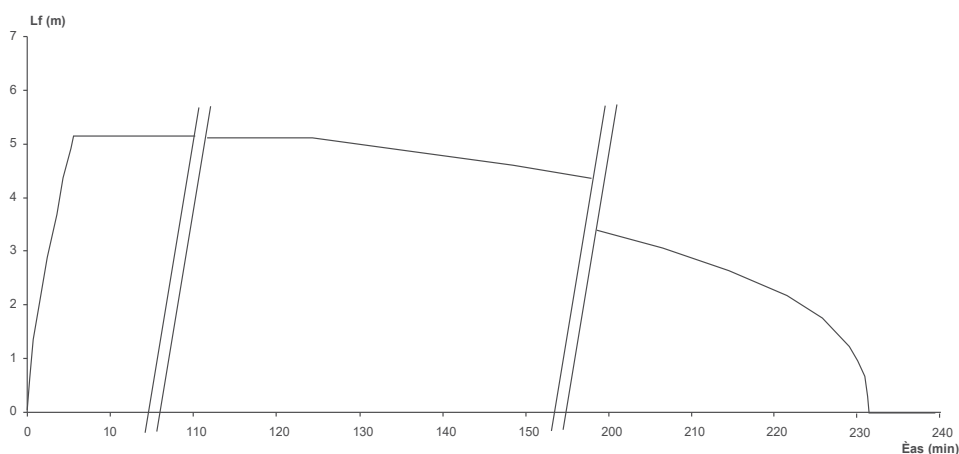
Na obr. C.17 je uveden průběh rychlosti uvolňování tepla v čase. Doba rozhořívání trvá 5 min 37 s, oblast ustáleného hoření trvá 120 min 52 s (2 hodiny), palivo zcela vyhoří za 231 min 41 s (téměř 4 hodiny).



Obrázek C.17 Rychlost uvolňování tepla, požár skladu provozních náplní

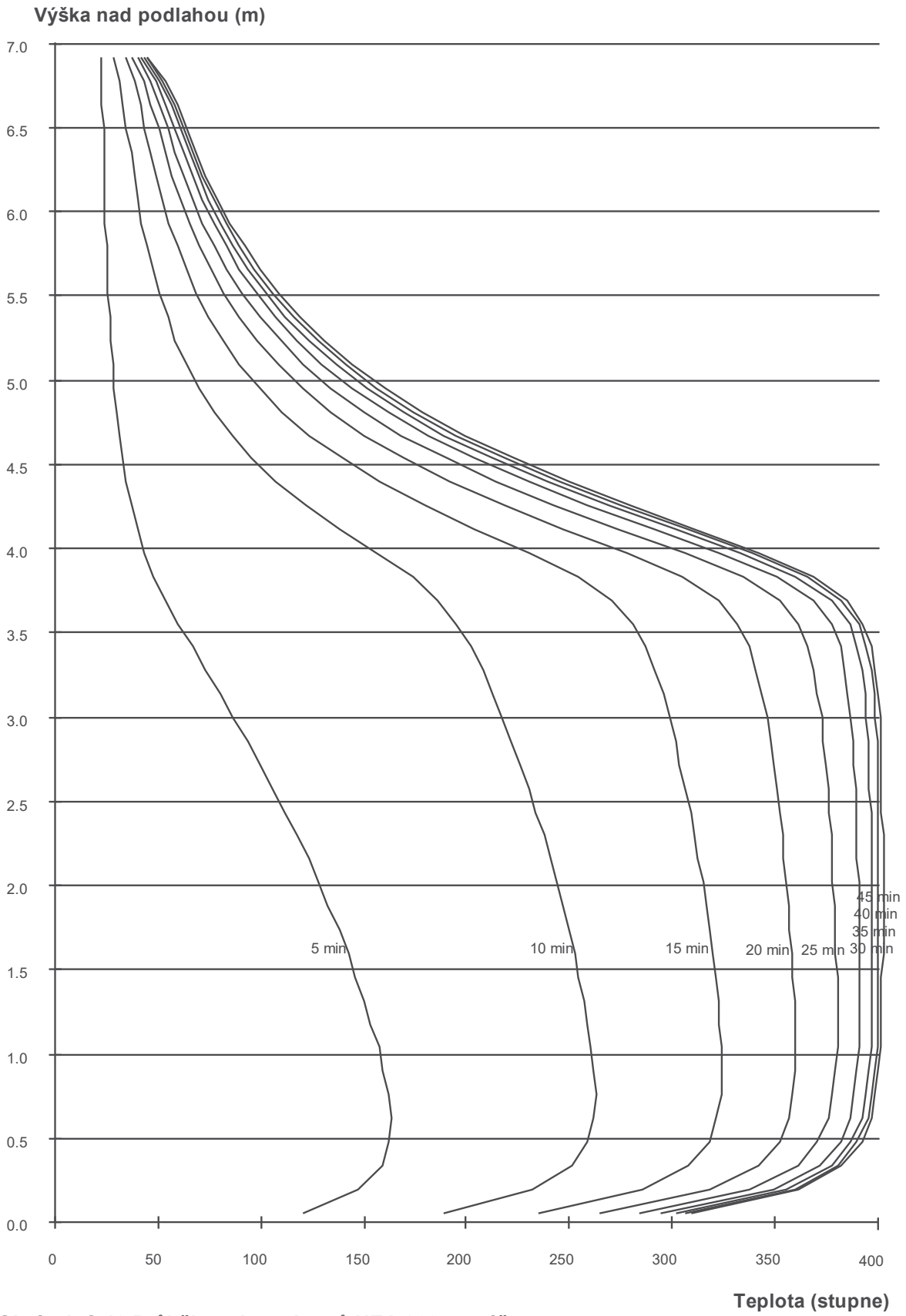
Z hlediska posouzení konstrukce haly nemá množství hořícího oleje vliv, protože k hoření dochází pouze na hladině oleje uniklého do sběrné jámky dané velikosti. Množství oleje ovlivňuje celkovou dobu hoření, ale nemá vliv na rychlost uvolňování tepla ve fázi rozhořívání a ustáleného hoření.

Délka plamene v závislosti na čase je na následujícím obrázku. Maximální délka plamene je 5,11 m, plamen nedosahuje ke stropu haly.



Obrázek C.18 Délka plamene, požár skladu provozních náplní

Maximální teplota sloupu v čase 15 min je 323°C ve výšce 0,90 m nad podlahou, viz obr. C.19. Po 30 min dosáhne sloup teploty téměř 400°C a jeho teplota se zvyšuje jen velmi pomalu, tj. je dosaženo téměř ustáleného stavu mezi přijatým teplem z požáru a předáváním tepla ze sloupu do okolního prostředí. Toto rozložení teploty zůstává neměnné po zbytek střední fáze požáru, viz křivku rychlosti rozvoje tepla, obrázek C.17. S nástupem třetí fáze a zkracováním délky plamenů dochází ke zkracování délky sloupu, kde je dosažena tato teplota a později také k velmi postupnému snižování teploty. Tyto křivky nejsou na obrázku pro přehlednost zobrazeny.



Obrázek C.19 Průběh teploty sloupů HEA 260 po výšce, požár skladu provozních náplní

C.3 Validace modelu na zkušebním objektu AM Ostrava

C.3.1 Zkušební objekt

Následující kapitola představuje požární experiment, který se uskutečnil 15. června 2006 v areálu Mittal Steel v Ostravě, čpavkárna - budova odstředivek, viz obrázek C.20. Experiment byl kromě účinků lokálního požáru na ocelovou konstrukci v požárním úseku zaměřen na chování styčnicků a železobetonové stropní desky při požáru, na konstrukční celistvost a na přestup tepla do prvků vně požárního úseku.



Obrázek C.20 Zkušební budova, AM Ostrava, čpavkárna, budova odstředivek



Obrázek C.21 Požární úsek ve druhém podlaží, před zkouškou

Zkušební budova je třípodlažní průmyslová budova, která přilehá k jednolodní hale, s níž má společnou řadu sloupů. Nosnou konstrukci tvoří ocelové nosníky I160, I180 a I300 a sloupy podpírající železobetonovou desku. Deska není sprážená ani spojena s ocelovými nosníky. Tuhost budovy je

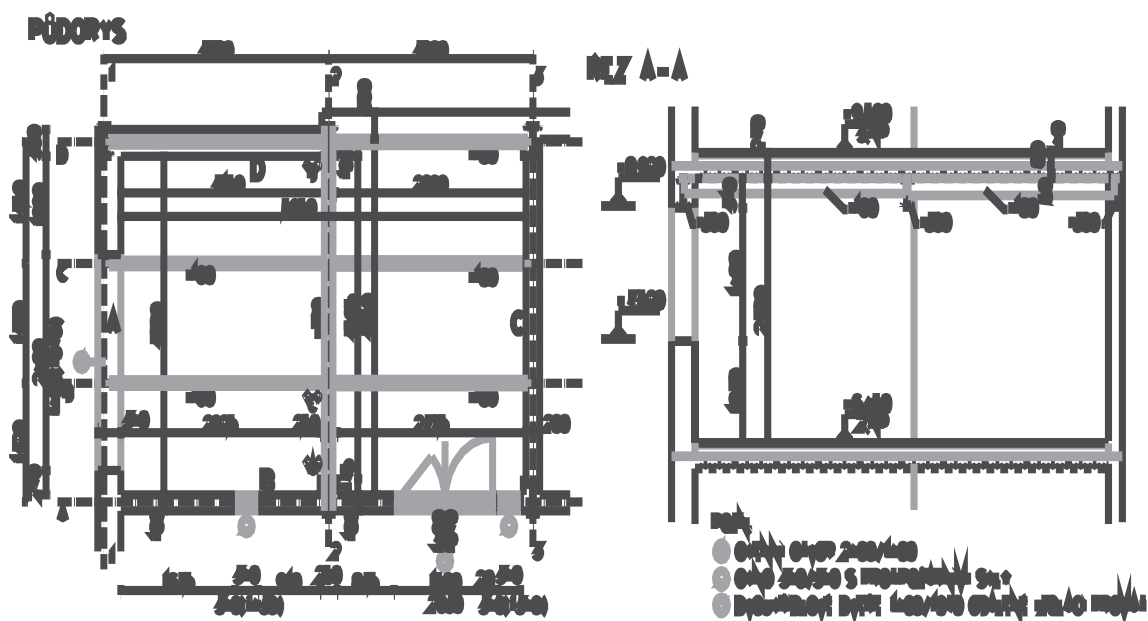
zajišťována příhradovými ztužidly. Stropní konstrukci nad požárním úsekem tvoří nosná železobetonová deska z betonu C20/25 tloušťky 80 + 50 mm betonovaná do trapézového plechu VSŽ 11 002, bez nátěru, na níž je betonová roznášecí vrstva tloušťky 120 mm a vrchní nášlapná vrstva z keramické dlažby. Celková tloušťka stropu činí 270 mm.

C.3.2 Příprava požárního experimentu

Požární experiment proběhl na podlaží objektu v požárním úseku rozměru 3,80 × 5,95 metrů s výškou 2,78 m, viz obrázek C.21, C.22 a C.23. Stěny úseku byly z dutých cihel, čelní stěna s ventilačním otvorem byla z lehkého betonu. Otvor byl 1,40 m vysoký, 2,40 m široký s parapetem výšky 1,07 m, viz obrázek C.23.

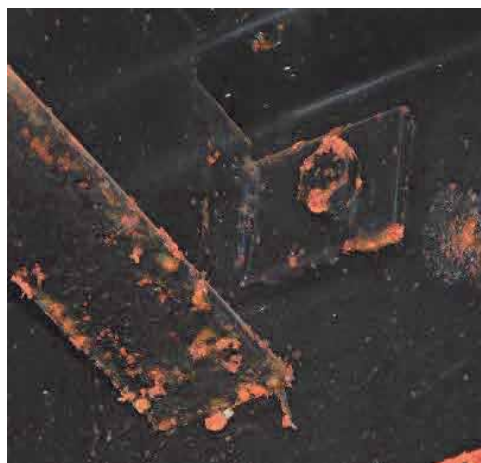


Obrázek C.22 Požární úsek v druhém podlaží budovy



Obrázek C.23 Půdorys a řez požárním úsekem

Sloupy byly zazděny ve stěnách požárního úseku a tím byly chráněny proti účinkům požáru. Pásnice sloupu v líci stěny byly obloženy deskami tloušťky 20 mm, viz obrázek C.22. Stropní nosníky a jejich přípoje nebyly chráněny s výjimkou nosníků po okrajích požárního úseku, které byly zcela zabudovány v obvodových stěnách. Celková tloušťka čelní stěny s otvorem (včetně omítek) je 300 mm, boční obvodové stěny 300 mm, vnitřní příčky s dveřmi 180 mm a tloušťka příčky naproti čelní obvodové stěně je 140 mm. Přípoje nosníků byly šroubované. Průvlak byl ke sloupu připojen čelní deskou tloušťky 10 mm a 6 šrouby M20, viz obrázek C.24. V přípoji je osazen termočlánek pro měření teploty ve spodním šroubu. Přípoje stropnic k průvlakům jsou tvořeny čelní deskou tloušťky 10 mm a dvěma šrouby M20, viz obrázek C.24.



Obrázek C.24 Požárně nechráněný přípoj průvlaku ke sloupu (vlevo), Přípoj stropnice k průvlaků (vpravo)

Zatížení bylo vyvozena barely a boxy s vodou. Celkové zatížení stropní konstrukce dosáhlo 5,7 kN/m². Pro měření teploty sloupu při lokálním požáru byl uprostřed požárního úseku instalován ocelový průřez IPE200, viz obrázek C.25. Tento sloup nebyl zatížen, byl opatřen termočlánek a sloužil pouze pro měření teploty. Dřevěné nehotobované hranolky průřezu 50 mm × 50 mm délky 1 m představovaly požární zatížení v požárním úseku. Pro lokální požár byla použita jedna hranice se 132 hranolky, viz obrázek C.25.

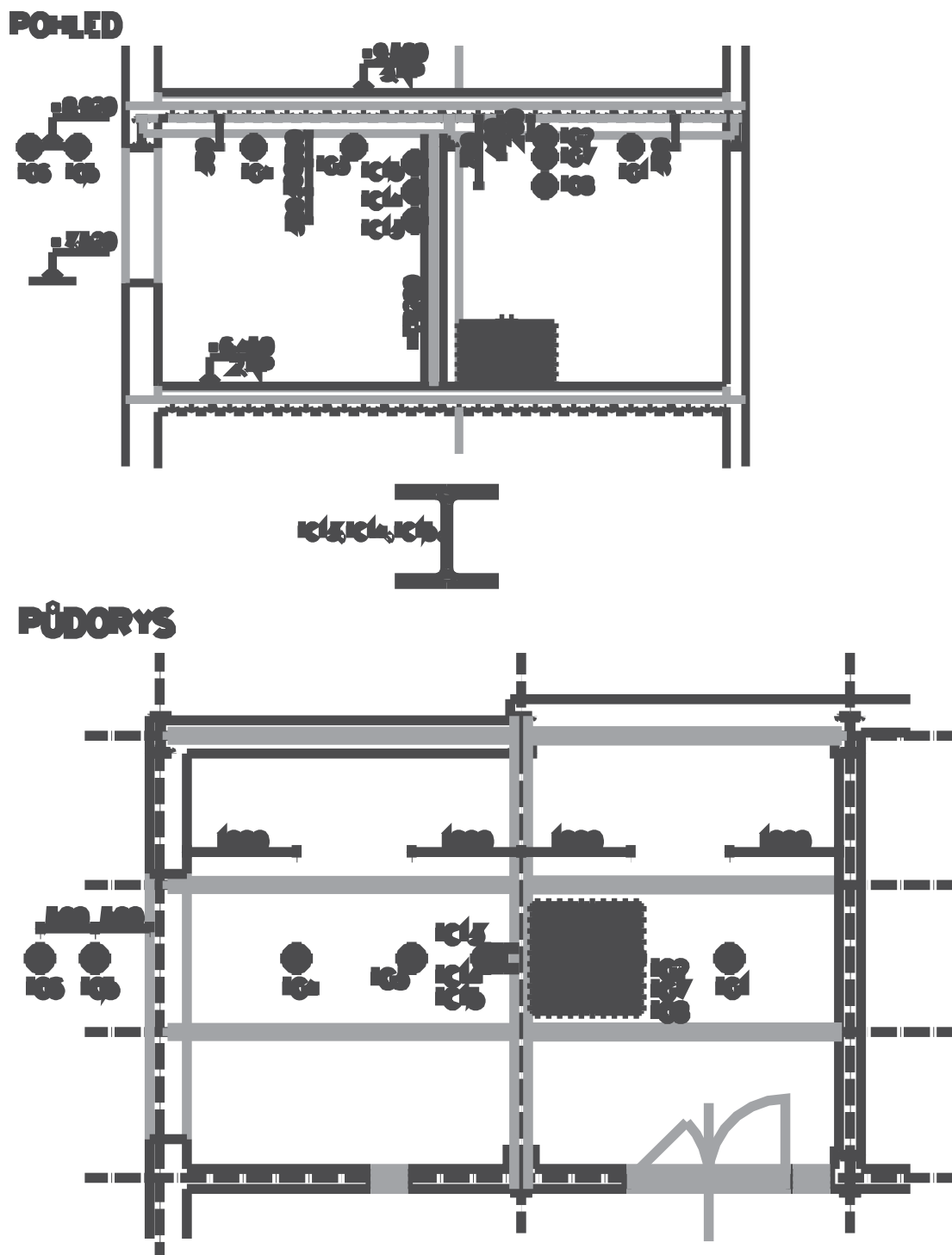


Obrázek C.25 Požární zatížení (vlevo), Sloup před lokálním požárem (vpravo)

C.3.3 Osazení měřících zařízení

Konstrukce byla osazena termočlánek, průhyboměry a tenzometry pro měření odezvy při požáru. Celkem bylo použito 42 termočláneků pro měření teploty nosníků, jejich přípojů a teploty plynů v požárním úseku. Svislé deformace desky byly snímány pomocí 5 průhyboměrů umístěných ve 3.

podlaží, další 3 průhyboměry byly použity pro záznam vodorovných deformací mezi sloupy A2-D2, D1-D2 a D2-D3. Deformace byly měřeny 100 mm nad stropem požárního úseku. Rozvoj požáru, vývin kouře a chování konstrukce během požáru snímalo 5 videokamer, pro dálkové měření teploty konstrukce byla použita termokamera. Pro měření teploty plynů při lokálním požáru byly použity tři termočlánky umístěné poblíž osy požáru ve vzdálenostech 200, 400 a 700 mm pod stropem. Teplota sloupu byla měřena na stěně ocelového průřezu pomocí termočlánků TC13, TC14 a TC15 v odstupech 300 mm, viz obrázek C.26. Termočlánky byly na straně odvrácené od požáru, viz obr. C.27.



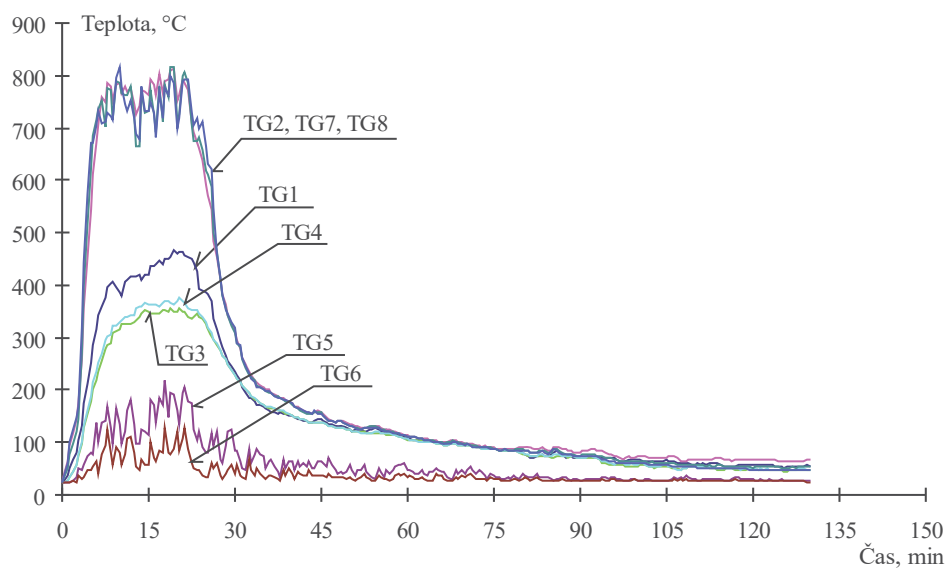
Obrázek C.26 Schéma měření teplot při lokálním požáru



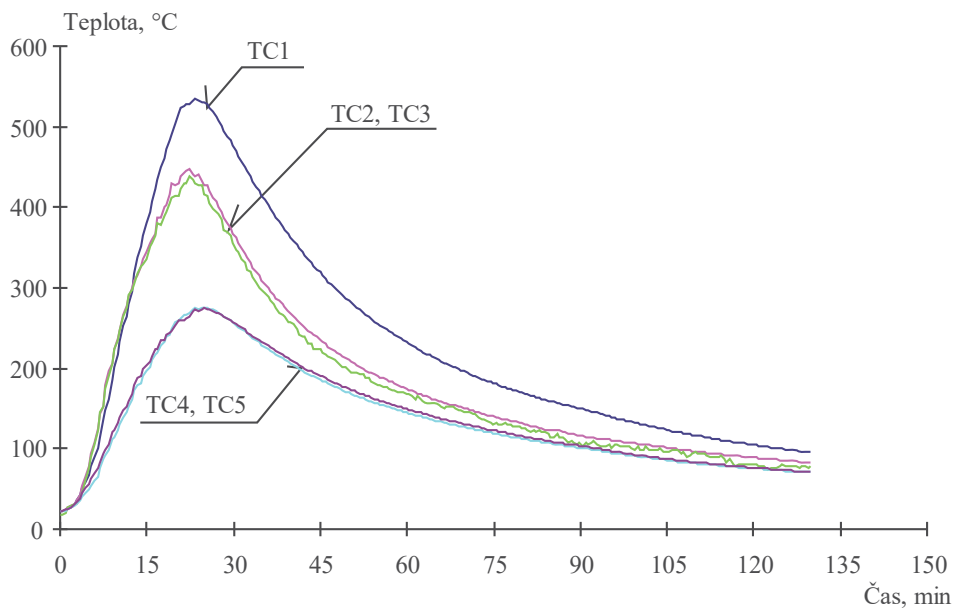
Obrázek C.27 Osazení termočlánků na sloupu

C.3.4 Průběh experimentu

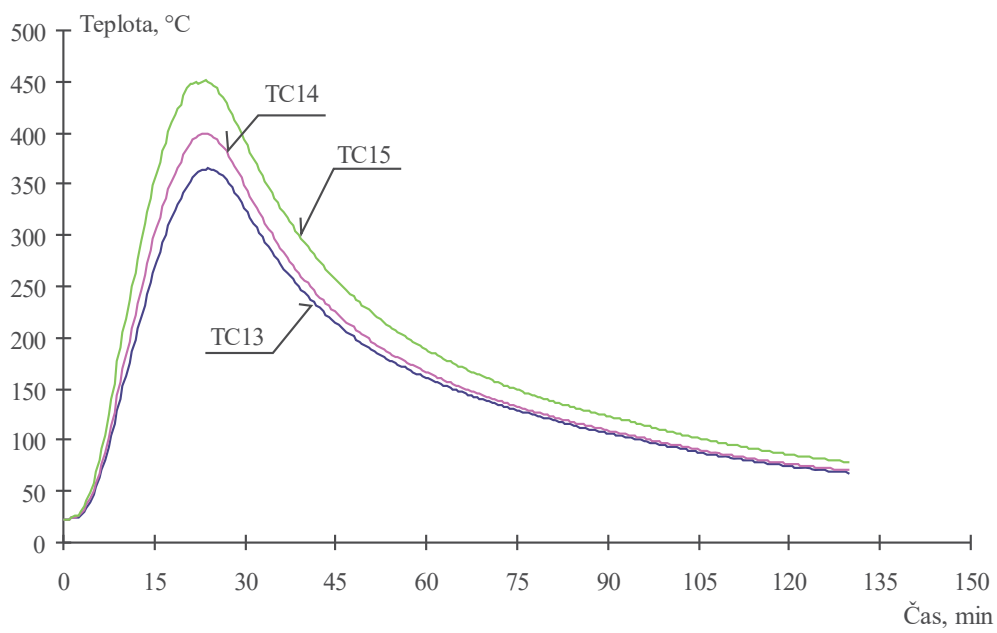
Cílem experimentu bylo měření teploty plynů a konstrukce při lokálním požáru. Naměřené hodnoty jsou na obrázku C.328, C.29 a C.30. Při zkoušce nebylo dosaženo porušení žádného z konstrukčních prvků a nebyly pozorovány viditelné trvalé deformace konstrukce. Průběh experimentu je vidět na obr. C.31.



Obrázek C.28 Změřená teplota plynů



Obrázek C.29 Změřená teplota nosníků



Obrázek C.30 Změřená teplota sloupu



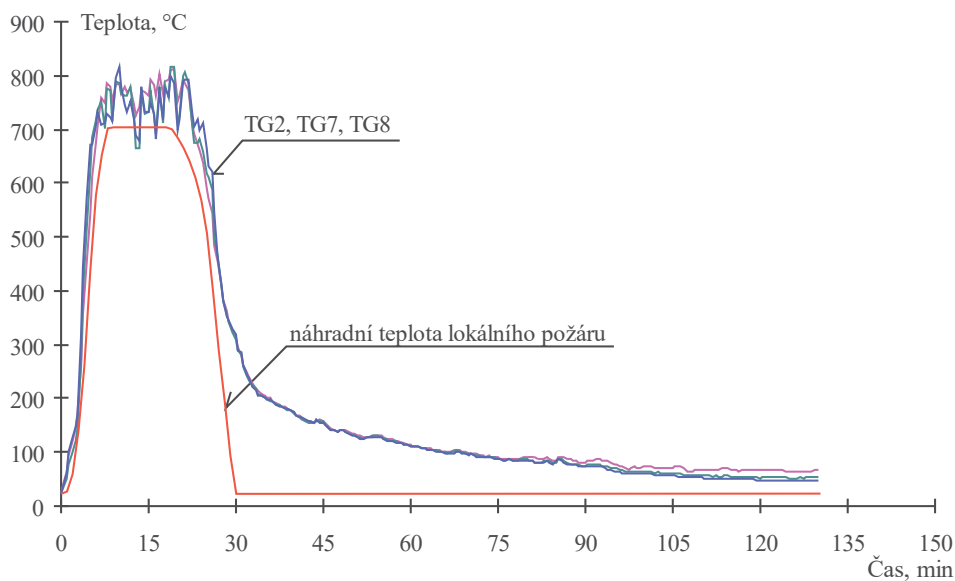
Obrázek C.31 Sloup v plamenech při experimentu

C.3.5 Předpověď teplot

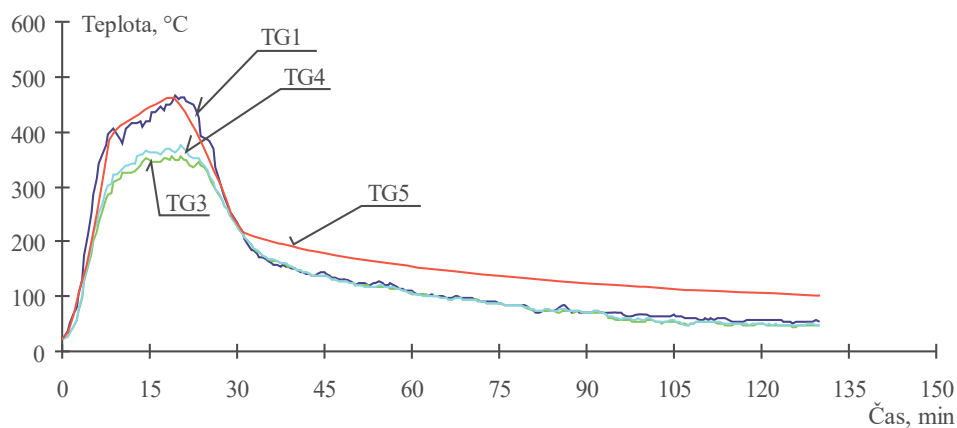
C.3.5.1 Teplota plynu v požárním úseku

Následující obrázky ukazují porovnání naměřených teplot s předpovědí podle zónového modelu. Obrázek C.32 ukazuje porovnání teplot měřených přímo nad požárem pomocí termočlánků TG2, TG7 a TG8. Vzhledem k průběhu požáru a výšce plamenů, byly tyto termočlánky přímo vystaveny plamenům, změřená teplota tedy neodpovídá teplotě horní horké vrstvy plynů, ale teplotě plamenů. Pro porovnání je vykreslena náhradní teplota lokálního požáru vypočítaná programem OZone, která se používá pro výpočet teploty prvků stropní konstrukce zasažených plameny. Obrázek C.32 ukazuje dobrou shodu předpovědi s experimentem, teploty poskytované zónovým modelem jsou poněkud nižší než naměřené teploty. To může být důsledkem použití některých vstupních údajů, jejichž přesná hodnota není známa: rychlost uvolňování tepla, emisivita a součinitel přestupu tepla.

Obrázek C.33 ukazuje porovnání teploty horké vrstvy plynů spočtené zónovým modelem s naměřenými teplotami. Termočlánky byly umístěny podél osy požárního úseku 300 mm pod stropní konstrukcí. Předpověď se velmi dobře shoduje s teplotou termočlánku TG1, zatímco teploty naměřené termočlánky TG3 a TG4 byly o 80 až 100°C nižší. Důvodem je zřejmě ochlazování vlivem vzduchu, který proudil do požárního úseku oknem v čelní stěně.



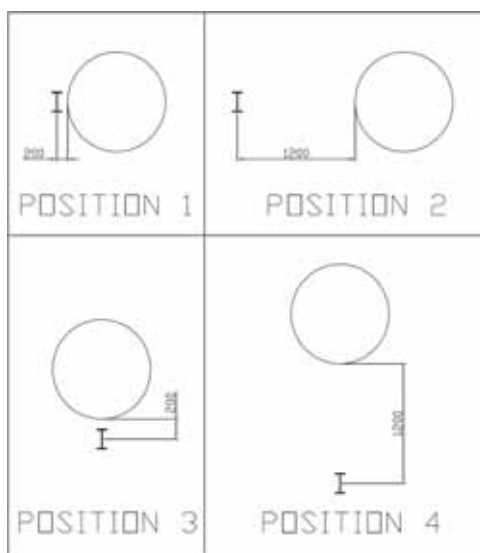
Obrázek C.32 Porovnání teploty plynů při lokálním požáru, termočlánky nad požárem



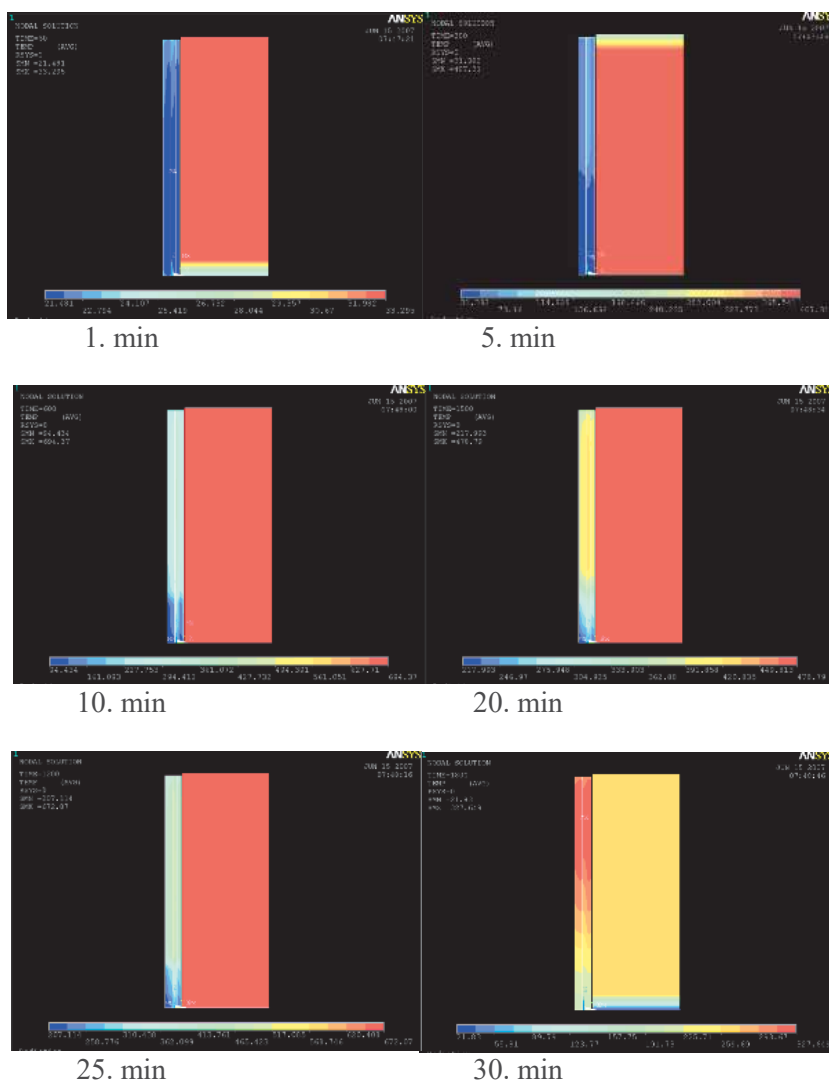
Obrázek C.33 Porovnání teplota plynů při lokálním požáru, termočlánky pod stropní konstrukcí

C.3.5.2 Studie citlivosti numerického modelu teploty sloupu

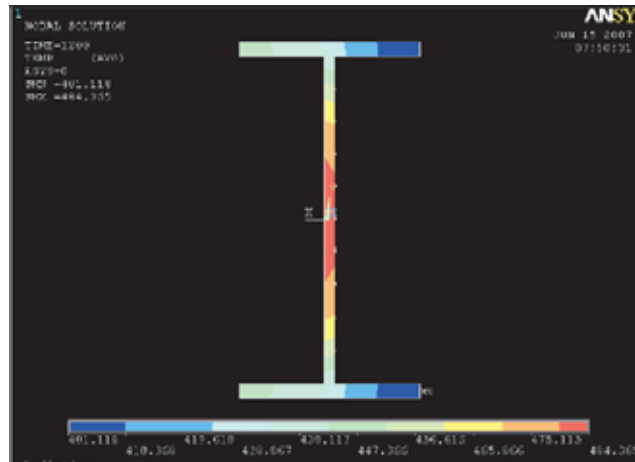
Numerický model byl použit pro parametrickou studii sledující vliv teploty sloupu s ohledem na polohu a vzdálenost požáru od sloupu. Byly vyšetřovány případy, kdy je požáru vystavena pásnice nebo stěna sloupu, v obou případech byl lokální požár ve vzdálenosti 200 mm a 1200 mm od osy sloupu, viz obrázek C.34. Průběh teploty v průřezu sloupu a ve výšce sloupu 2,1 m ukazují následující obrázky.



Obrázek C.34 Vzájemná poloha sloupu a lokálního požáru

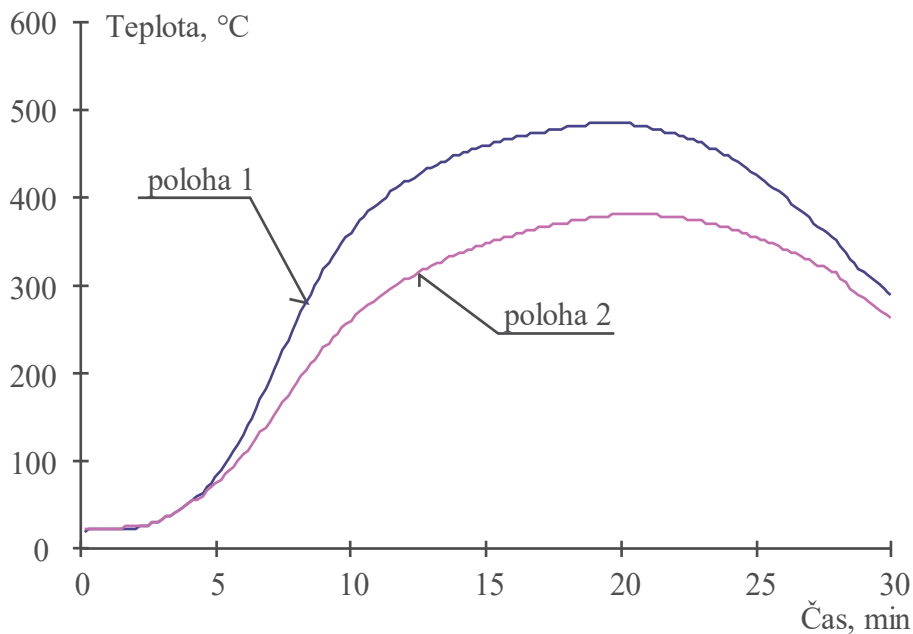


Obrázek C.35 Teplota sloupu v průběhu požáru, poloha 1

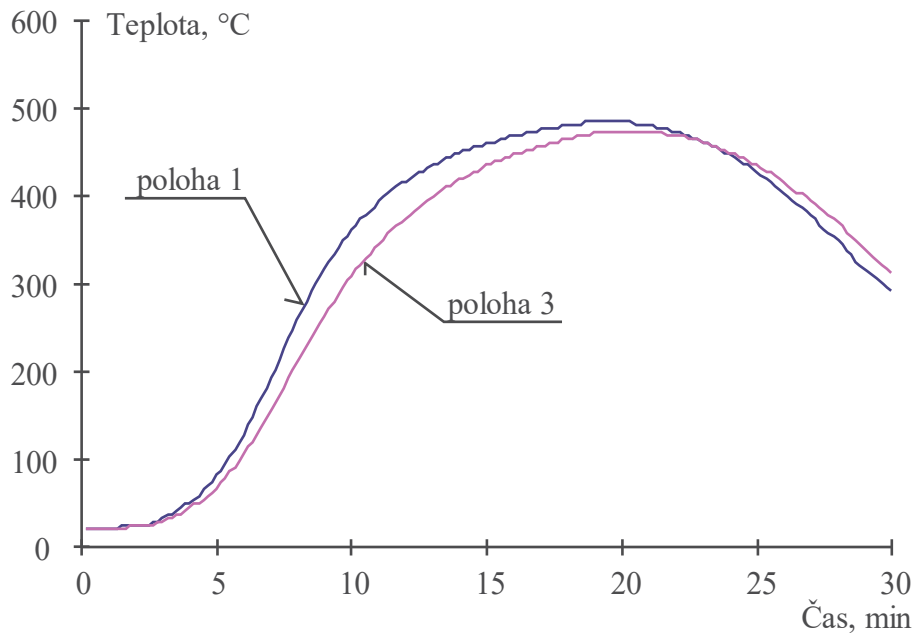


Obrázek C.36 Teplota v průřezu sloupu, výška 2,1 m, 20 min, poloha 1

Následující obrázky ukazují maximální dosaženou teplotu ve sloupu. Dále je z nich také patrný pokles teploty způsobený rostoucí vzdáleností sloupu od požáru. Pokles je velmi výrazný, zvětšením vzdálenosti sloupu od požáru o 1 m došlo k poklesu o 100°C. Při větší vzdálenosti se prodlužuje i čas, kdy je dosaženo maximální teploty, jde o prodloužení o několik minut.

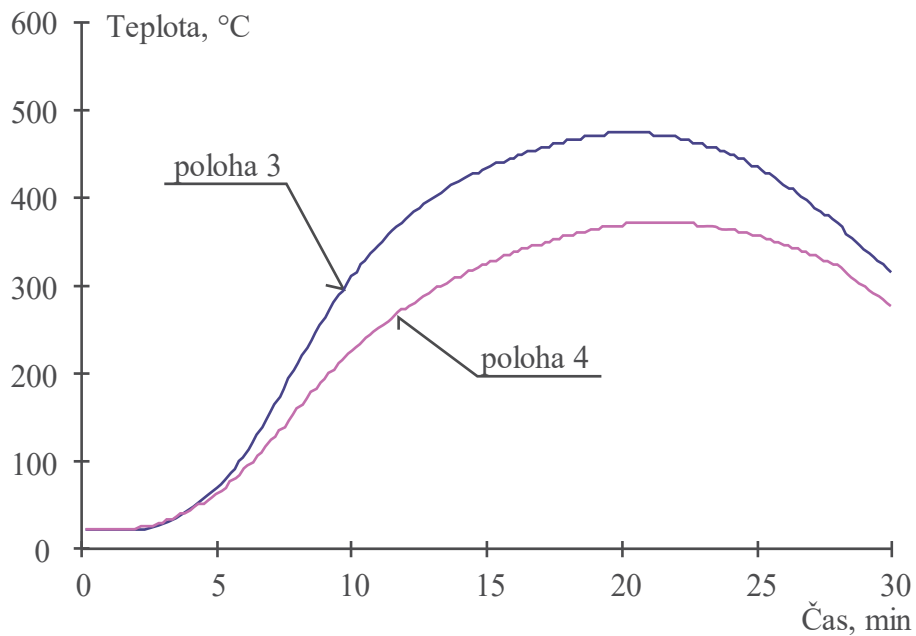


Obrázek C.37 Maximální teplota sloupu – poloha 1 a poloha 2

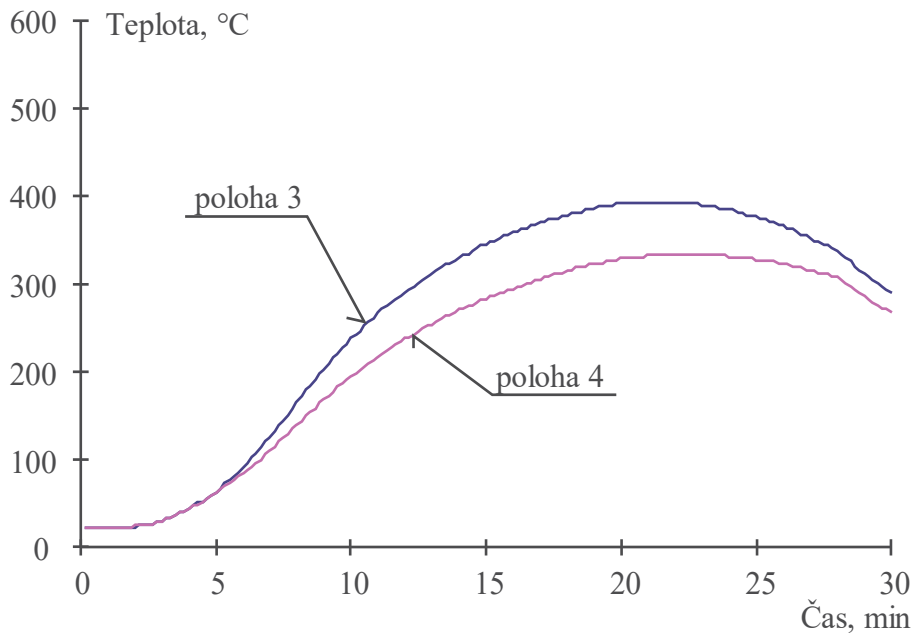


Obrázek C.38 Maximální teplota sloupu – poloha 1 a poloha 3

Při porovnání teploty v poloze 1 a v poloze 3 (obrázek C.38) je vidět, že orientace sloupu nemá na maximální dosaženou teplotu prakticky žádný vliv, v obou případech byla dosažena téměř stejná maximální teplota, rozdíl činil 10°C. Porovnávána je maximální teplota, která byla u sloupu v poloze 1 dosažena ve stěně, zatímco u sloupu v poloze 3 v pásnici blíž požáru. Velmi podobný je také čas, kdy bylo dosaženo maximální teploty.



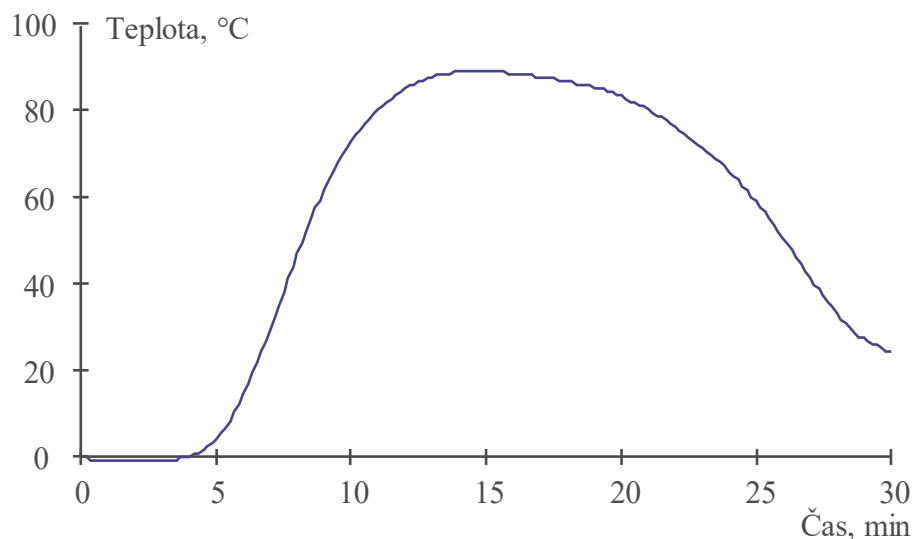
Obrázek C.39 Maximální teplota sloupu – poloha 3 a poloha 4, bližší pásnice



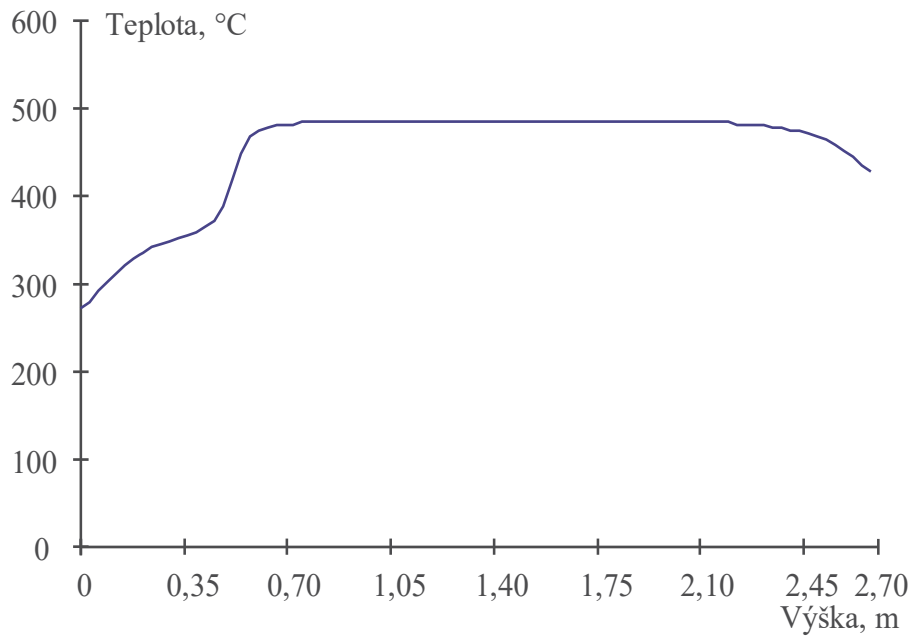
Obrázek C.40 Maximální teplota sloupu – poloha 3 a poloha 4, vzdálená pásnice

Obrázky C.39 a C.40 ukazují teploty dosažené v pásnicích sloupu. Vyšší teplota je dosažena v pásnici blíže k požáru, to je způsobeno rozdílností ve vzdálenosti pásnic od zdroje tepla (vliv polohového součinitele na přenos tepla sáláním) a zastínění stěny a vzdálenější pásnice.

Rozdíl teplot mezi pásnicemi (tepelný gradient) se zmenšuje při větší vzdálenosti sloupu od požáru. Přenos tepla prouděním je v obou případech stejný, protože stejná část sloupu je v horké nebo chladné vrstvě plynů, zatímco přenos tepla sáláním do pásnic průřezu je vyrovnanější v důsledku menšího rozdílu polohových součinitelů.



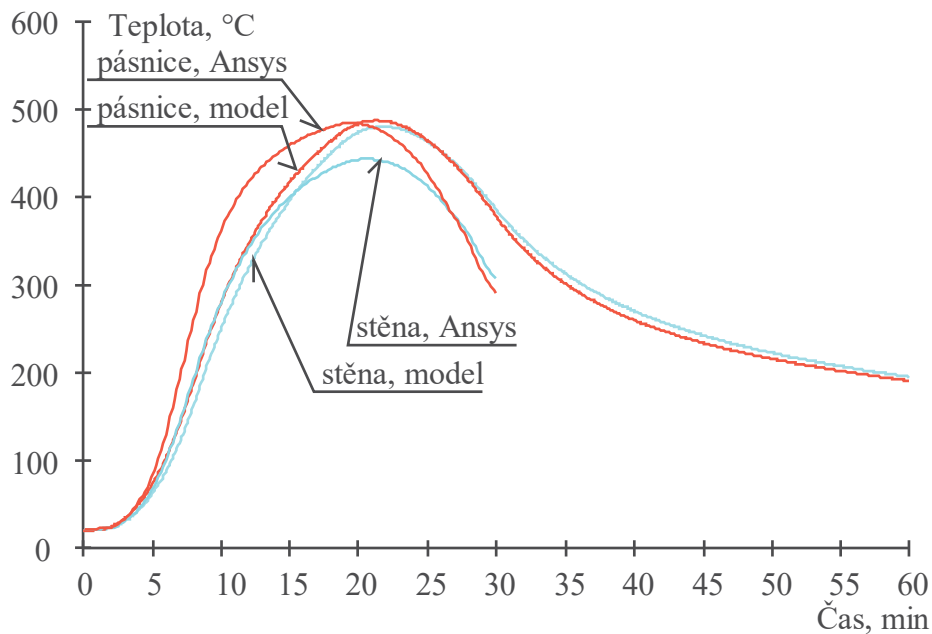
Obrázek C.41 Teplotní gradient průřezu ve výšce 2,1 m, poloha 3



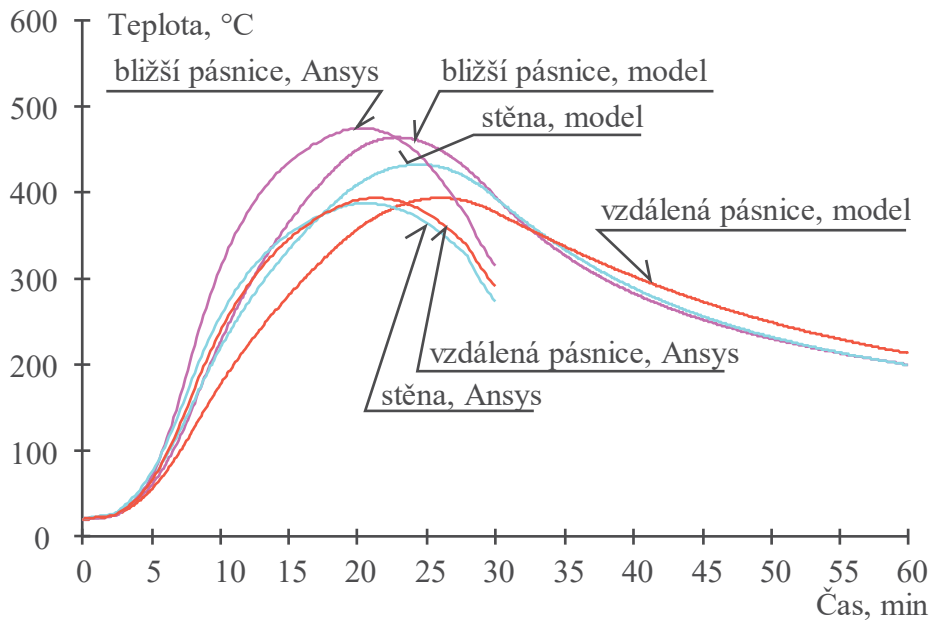
Obrázek C.42 Průběh teploty po výšce sloupu, čas 20 minut, poloha 1

Průběh teploty po výšce sloupu je na obrázku C.42. Teplota sloupu je téměř konstantní, ovlivněn je konec sloupu, kde je nižší teplota vlivem okrajových podmínek, a spodní část sloupu, která je v chladné oblasti požárního úseku, kde je vystavena plynům o nižší teplotě než v horní části.

C.3.5.3 Validace modelu - vliv vzdálenosti sloupu od požáru



Obrázek C.43 Model, vypočtená teplota pásnice a stěny sloupu, porovnání s polohou 1 (výpočet Ansys)



Obrázek C.44 Model, vypočtená teplota pásnic a stěny sloupu, porovnání s polohou 3 (výpočet Ansys)

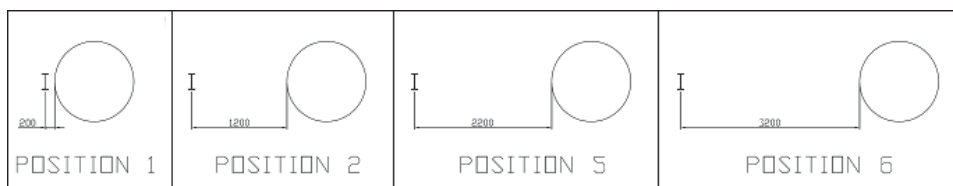
Vzdálenost sloupu od požáru má výrazný vliv na výslednou teplotu. Vzdálenost je zohledněna součinitelem

$$\beta = \frac{512}{\left(\frac{S}{R}\right)^{\frac{1}{4.5}}} \quad (\text{C.13})$$

kterým se upraví výsledný průběh teplot ve stěně nebo pásnici sloupu. S je vzdálenost osy sloupu od osy požáru a R je poloměr požáru. Požaduje se, aby sloup nebyl obklopen plameny a tím vystaven účinkům sálavé složky tepelného toku po všech stranách. Výraz tedy platí pro

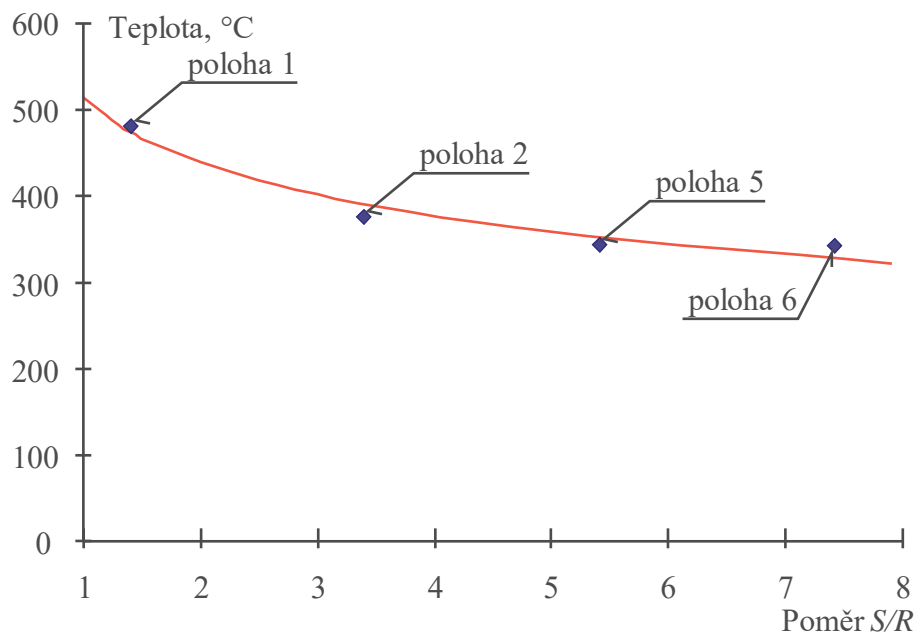
$$\frac{S}{R} > 1 \quad (\text{C.14})$$

Pro určení parametrů v součiniteli β byly provedeny dva další výpočty vycházející z polohy sloupu 1, ale sloup byl posunut do vzdálenosti $S = 2,7$ a $S = 3,7$ m od osy požáru, viz obrázek C.45 (poloha 5 a 6). Byla porovnávána teplota stěny ve výšce 2,1 m nad podlahou v čase 20 minut.

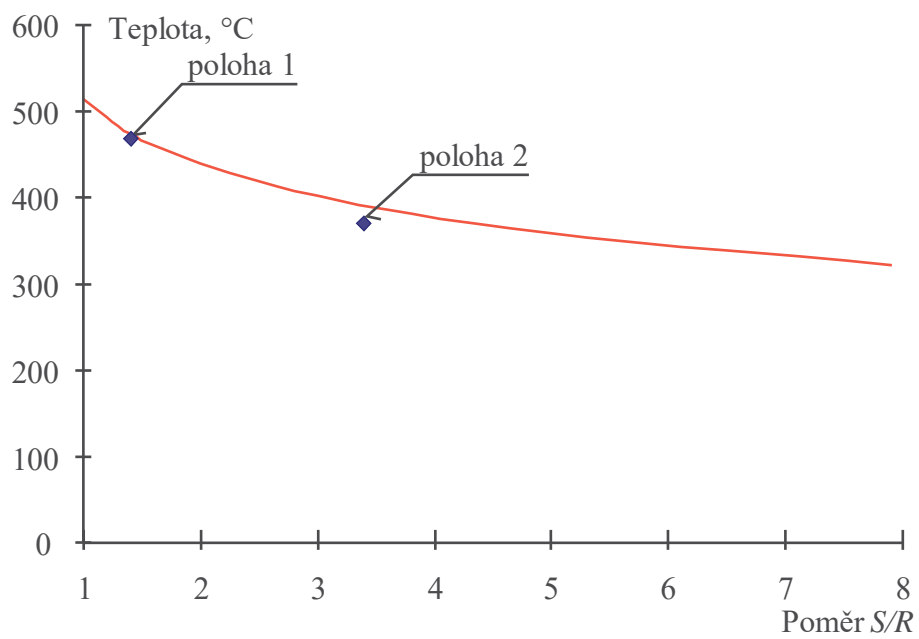


Obrázek C.45 Polohy sloupu pro určení součinitel vzdálenosti β

Teplota stěny pro polohy sloupu 1, 2, 5 a 6 spolu se součinitelem vzdálenosti β je na obrázku C.46. Teploty a součinitel vzdálenosti pro polohy sloupu 3 a 4 jsou na obrázku C.47.



Obrázek C.46 Součinitel vzdálenosti β pro polohy sloupu 1, 2, 5 a 6



Obrázek C.47 Součinitel vzdálenosti β pro polohy sloupu 3 a 4

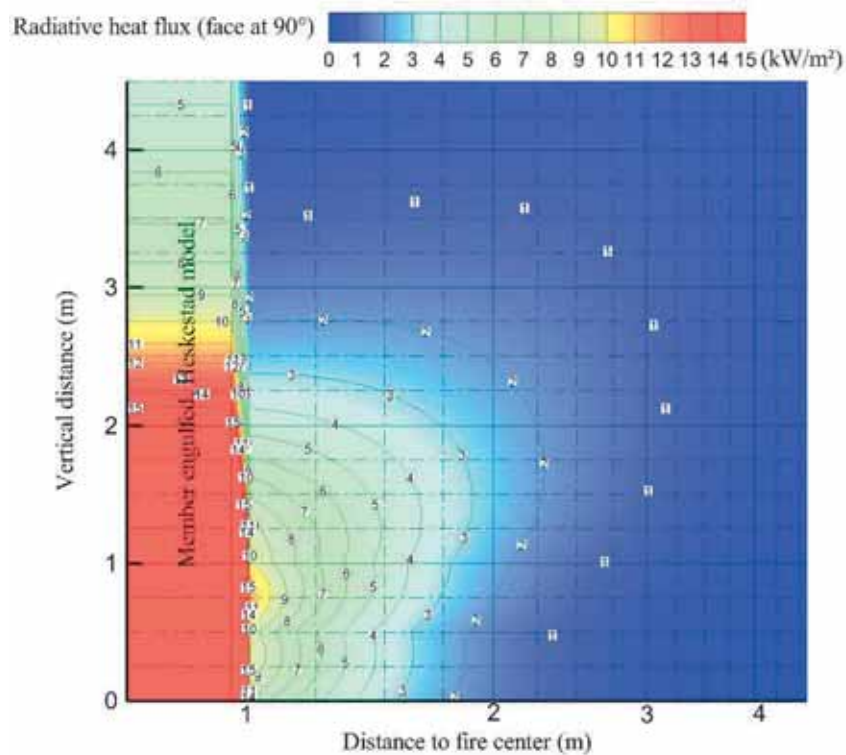
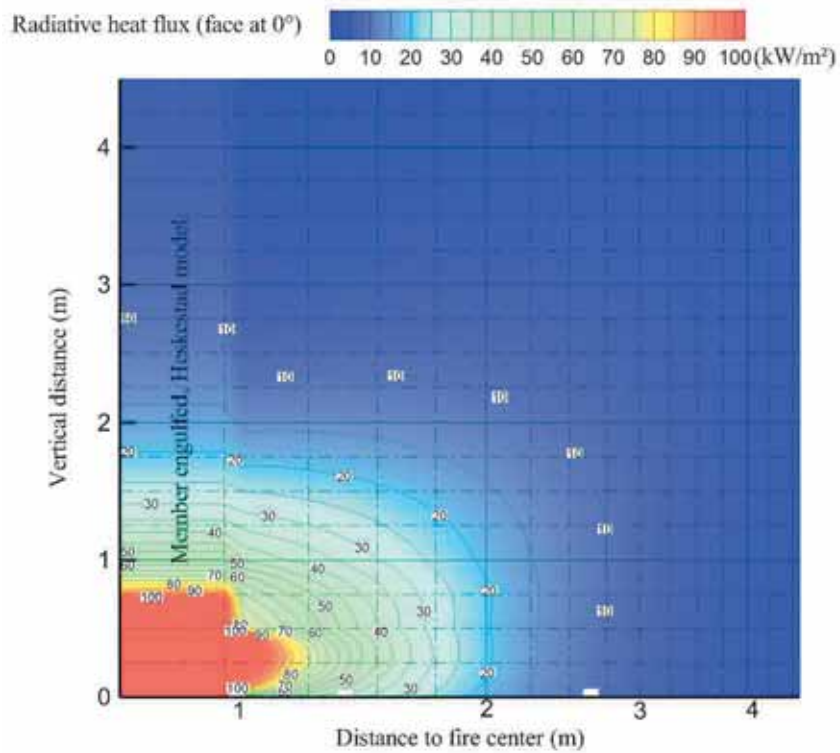
PŘÍLOHA D

VRSTEVNICE TEPELNÉHO TOKU

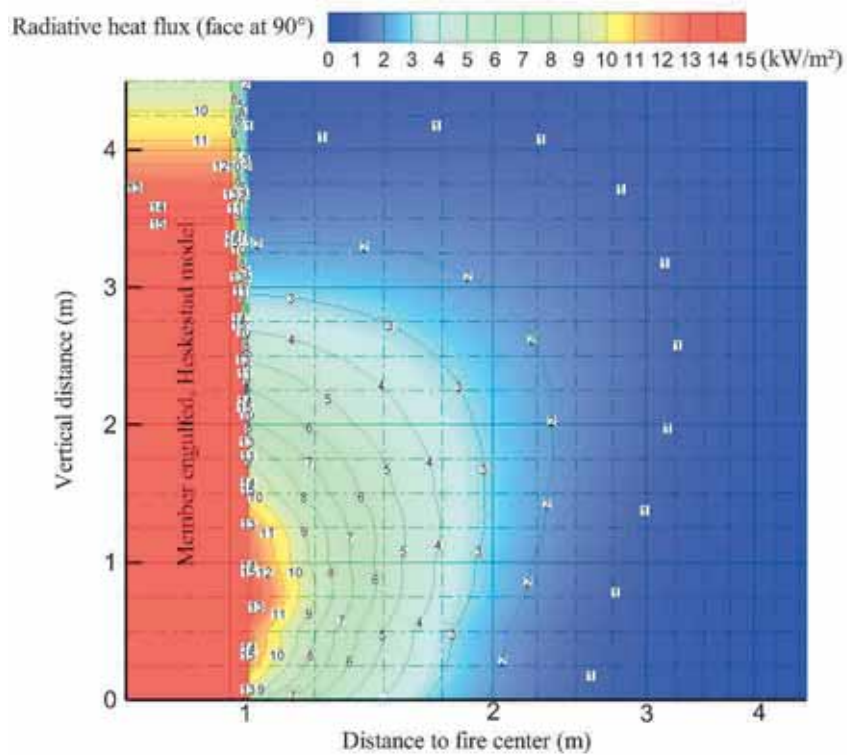
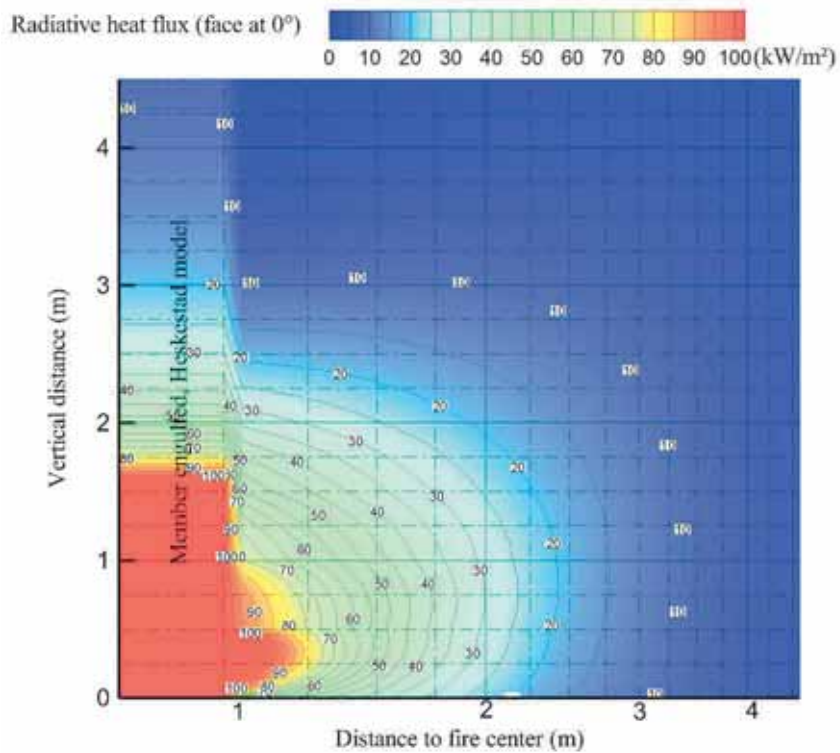
Tabulka D.1 uvádí přehled grafů vrstevnic teplot.

Tabulka D.1 Přehled grafů

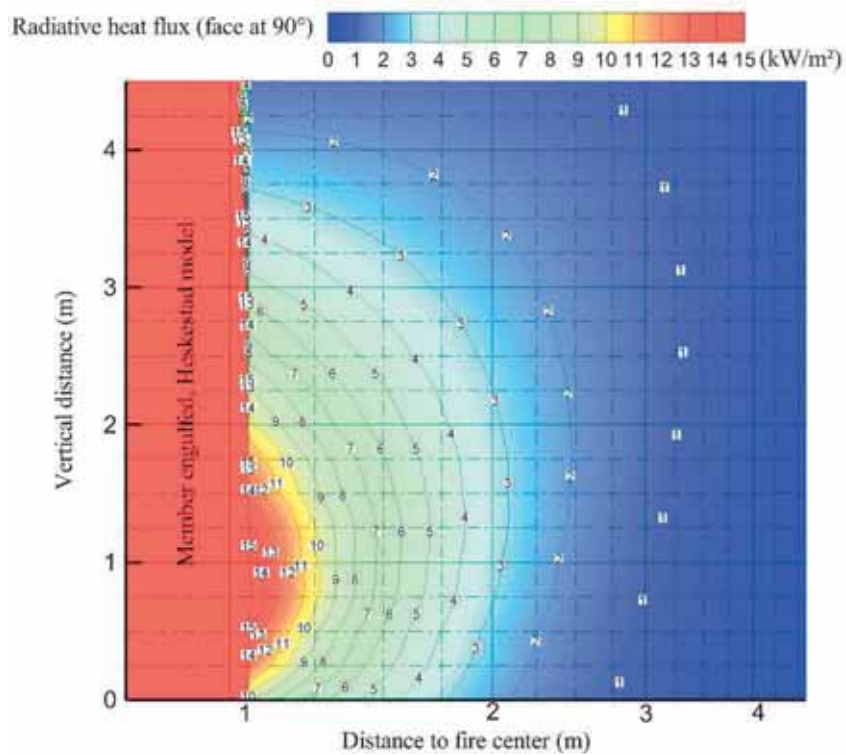
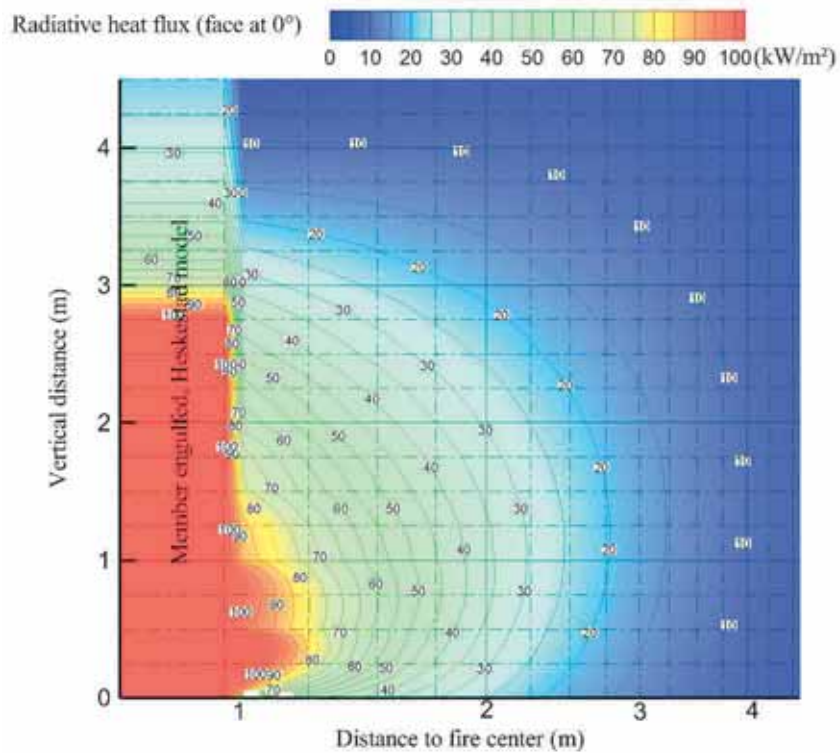
| Obrázek č. | D (m) | HRR (kW/m ²) | |
|------------|-------|--------------------------|------|
| | | (kW/m ²) | (MW) |
| C.1 | 2 | 250 | 0,8 |
| C.2 | 2 | 500 | 1,6 |
| C.3 | 2 | 1000 | 3,1 |
| C.4 | 2 | 1500 | 4,7 |
| C.5 | 3 | 250 | 1,8 |
| C.6 | 3 | 500 | 3,5 |
| C.7 | 3 | 1000 | 7,1 |
| C.8 | 3 | 1500 | 10,6 |
| C.9 | 4 | 250 | 3,1 |
| C.10 | 4 | 500 | 6,3 |
| C.11 | 4 | 1000 | 12,6 |
| C.12 | 4 | 1500 | 18,8 |
| C.13 | 6 | 250 | 7,1 |
| C.14 | 6 | 500 | 14,1 |
| C.15 | 6 | 1000 | 28,3 |
| C.16 | 6 | 1500 | 42,4 |
| C.17 | 8 | 250 | 12,6 |
| C.18 | 8 | 500 | 25,1 |
| C.19 | 8 | 1000 | 50,3 |
| C.20 | 9 | 250 | 15,9 |
| C.21 | 9 | 500 | 31,8 |
| C.22 | 9 | 750 | 47,7 |
| C.23 | 10 | 250 | 19,6 |
| C.24 | 10 | 500 | 39,3 |



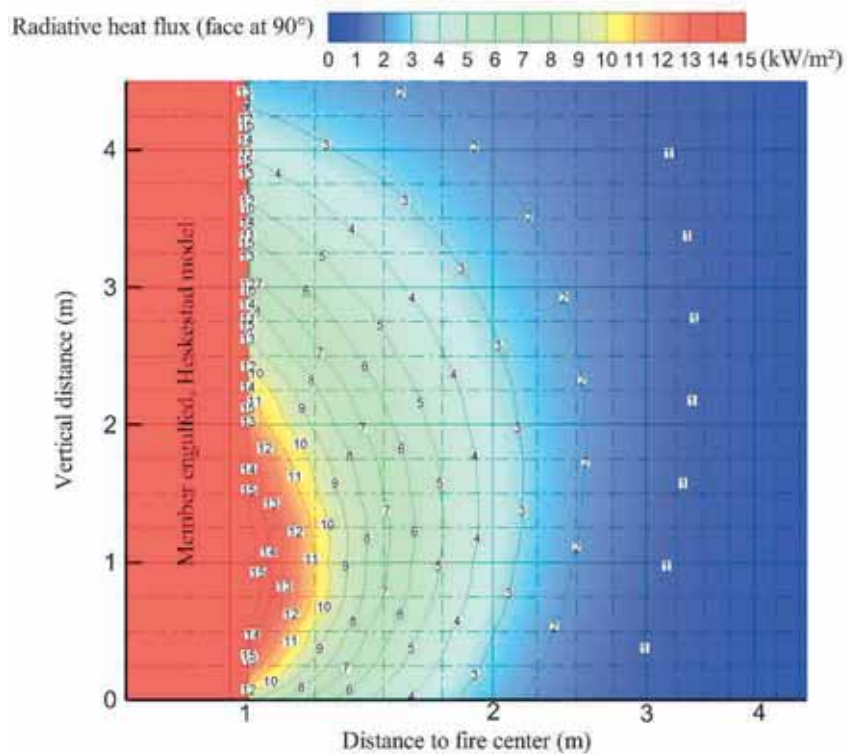
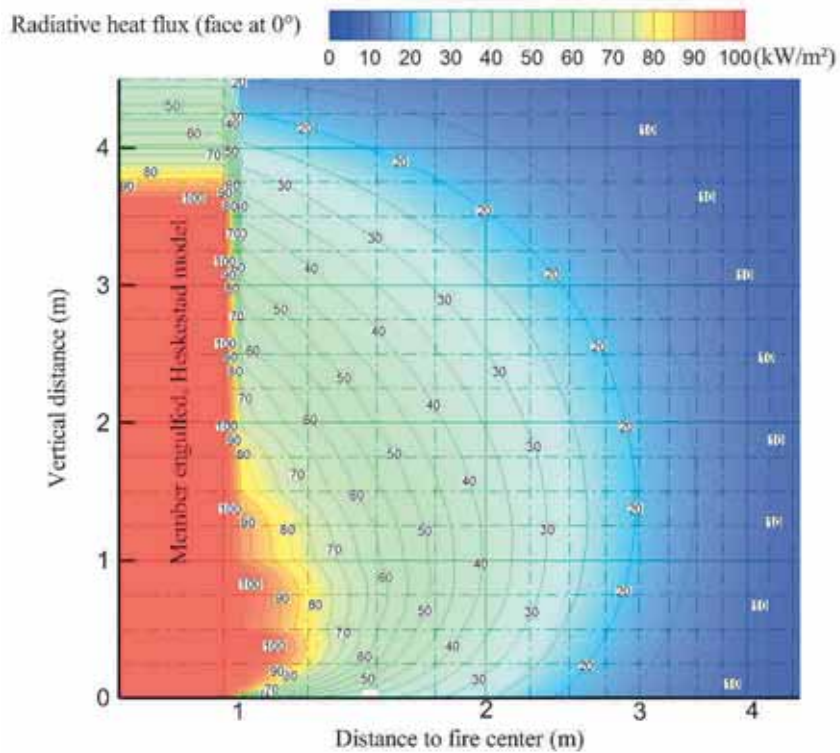
Obrázek D.1 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 2$ m a $HRR = 250$ kW/m²



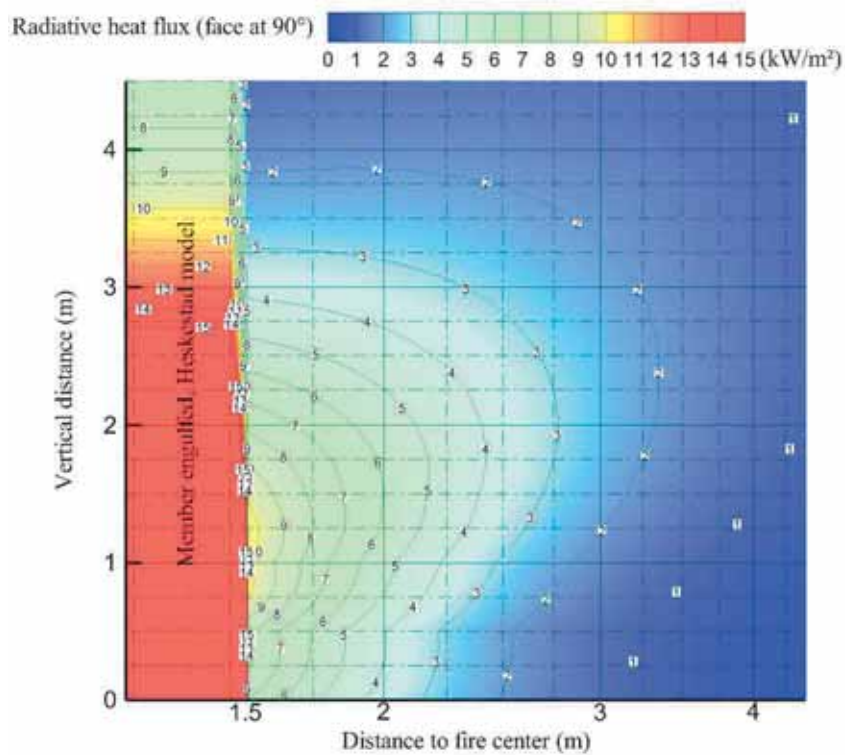
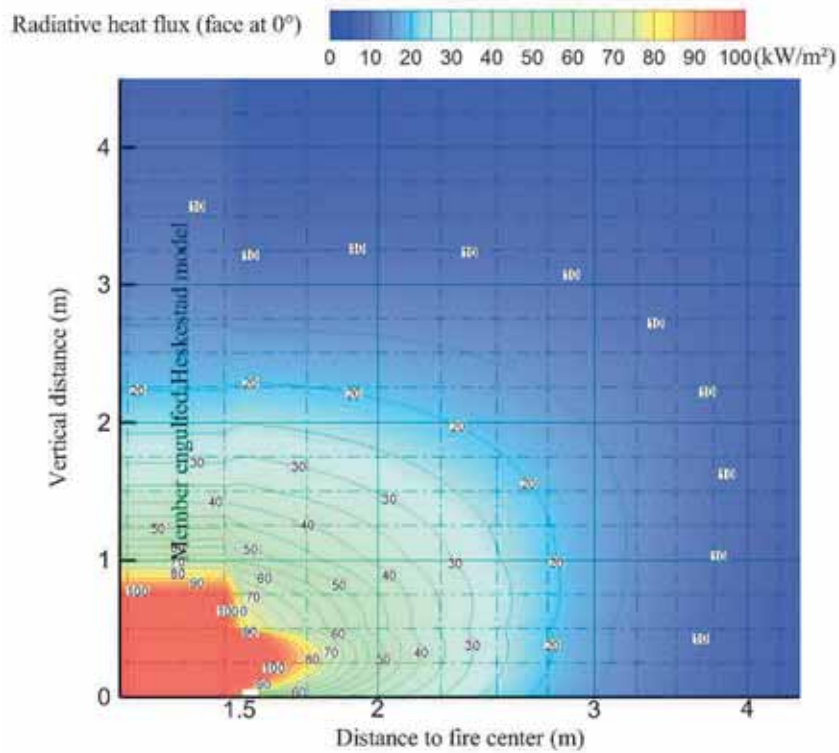
Obrázek D.2 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 2$ m a $HRR = 500$ kW/m²



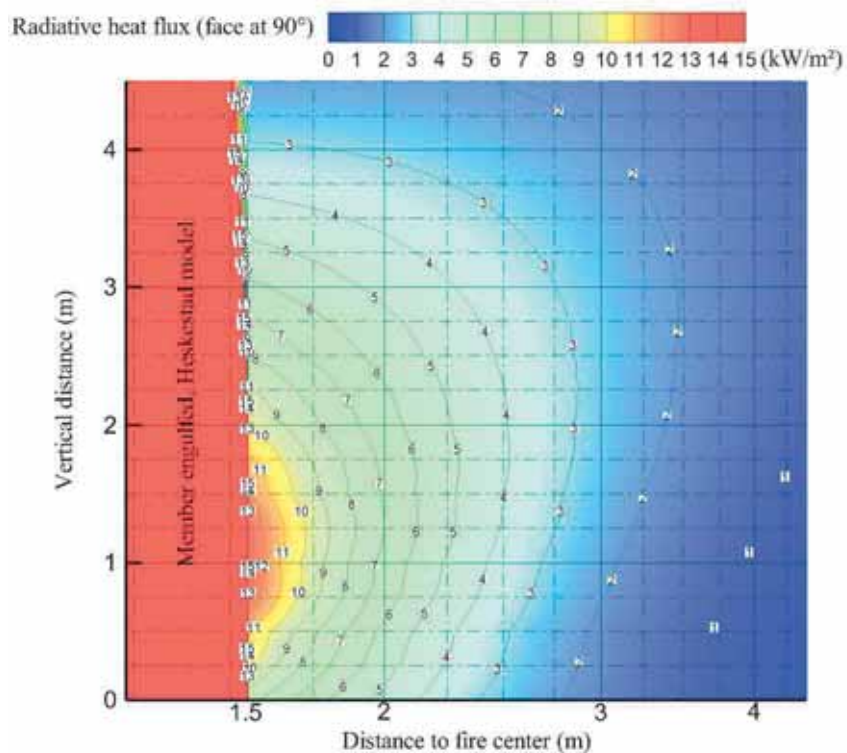
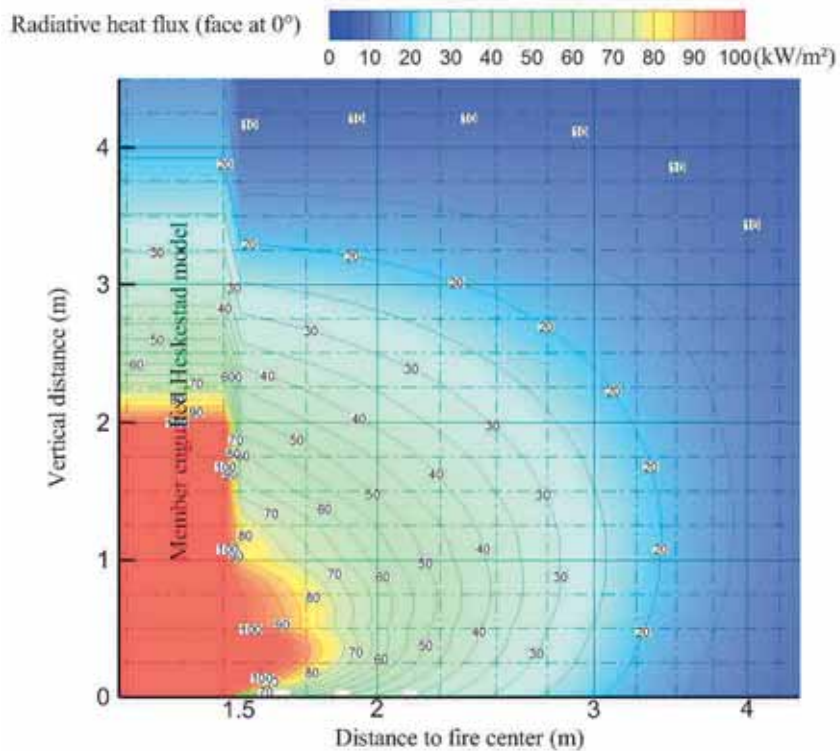
Obrázek D.3 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 2$ m a $HRR = 1000$ kW/m²



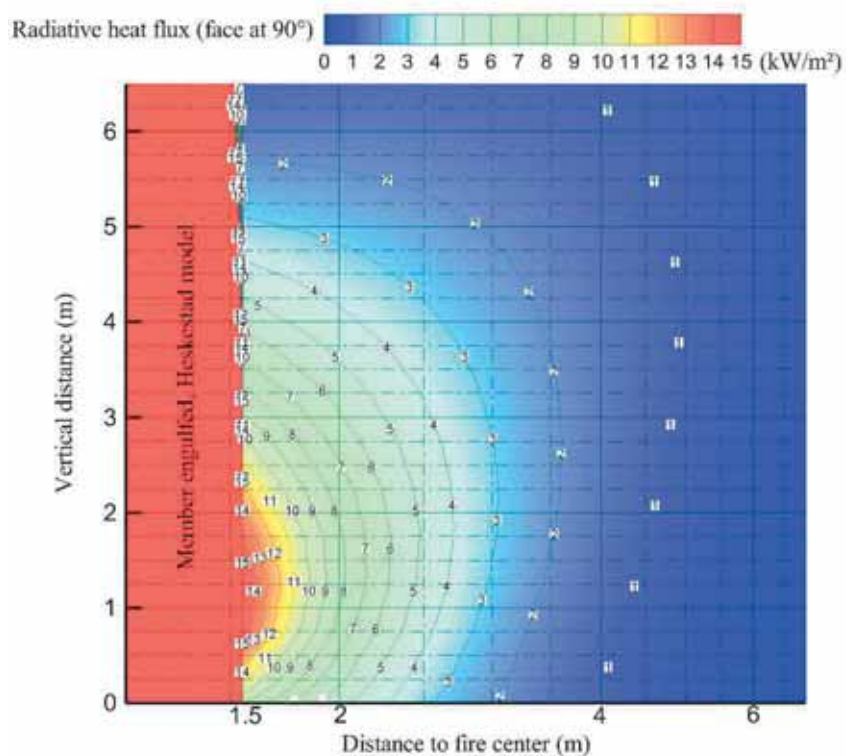
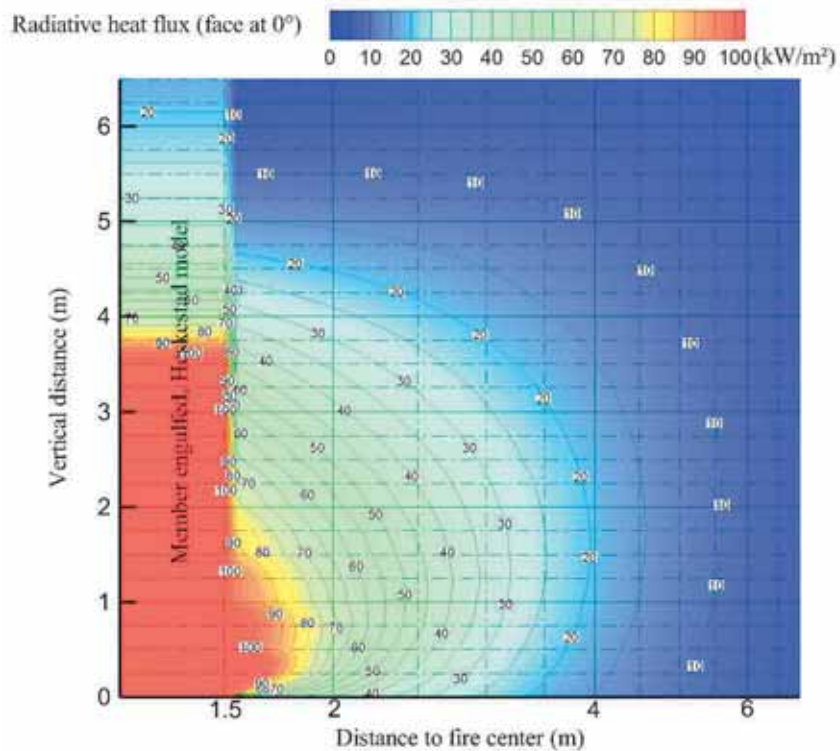
Obrázek D.4 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 2$ m a $HRR = 1500$ kW/m²



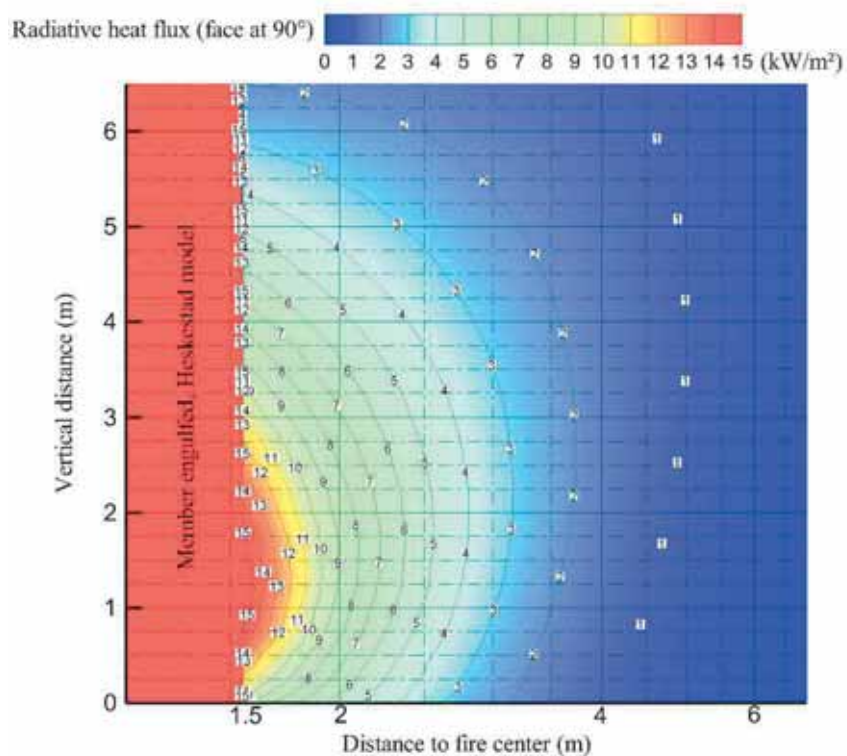
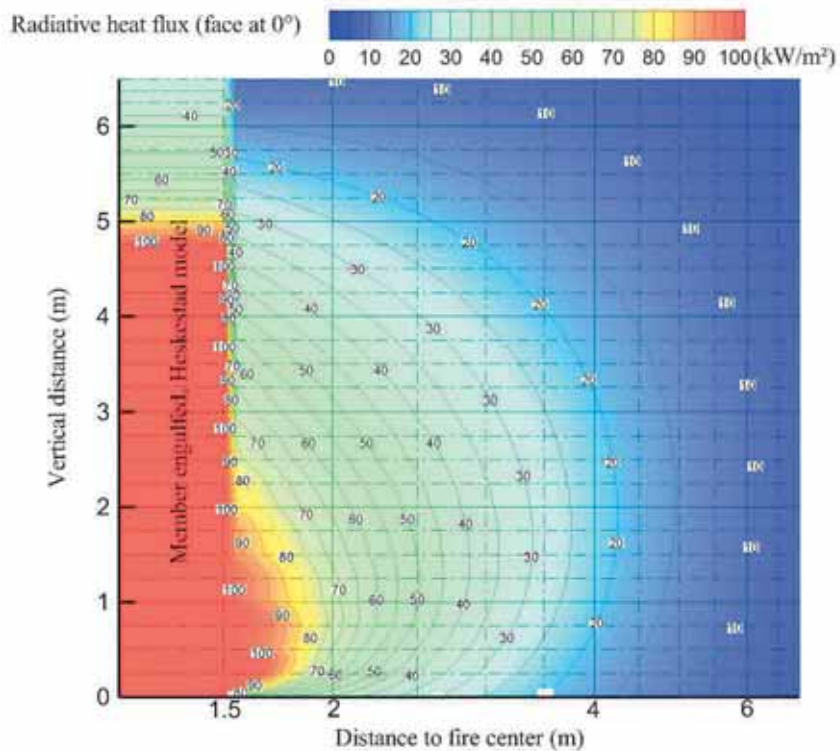
Obrázek D.5 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 3$ m a $HRR = 250$ kW/m²



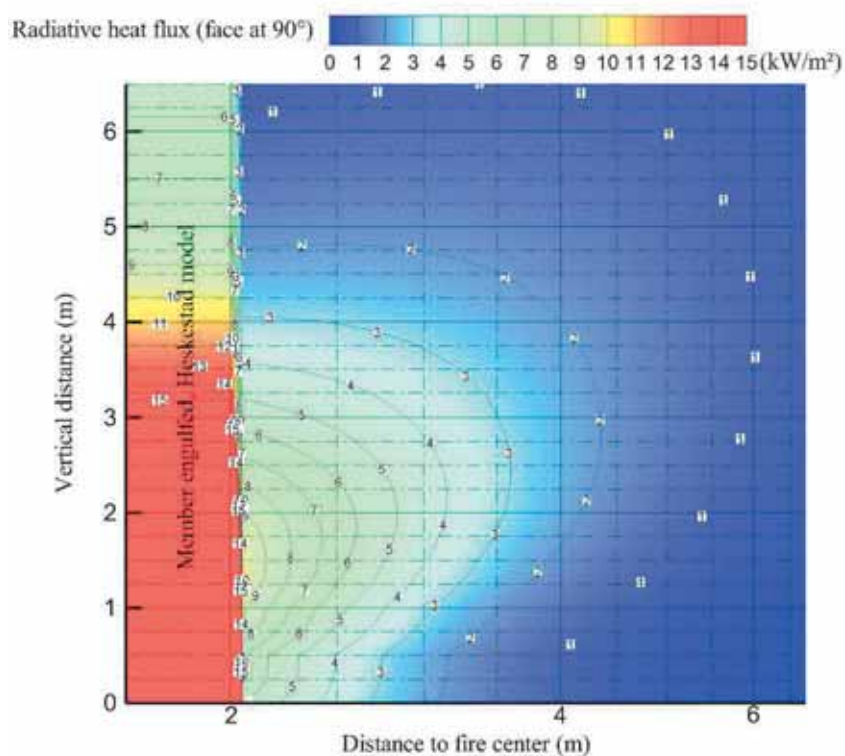
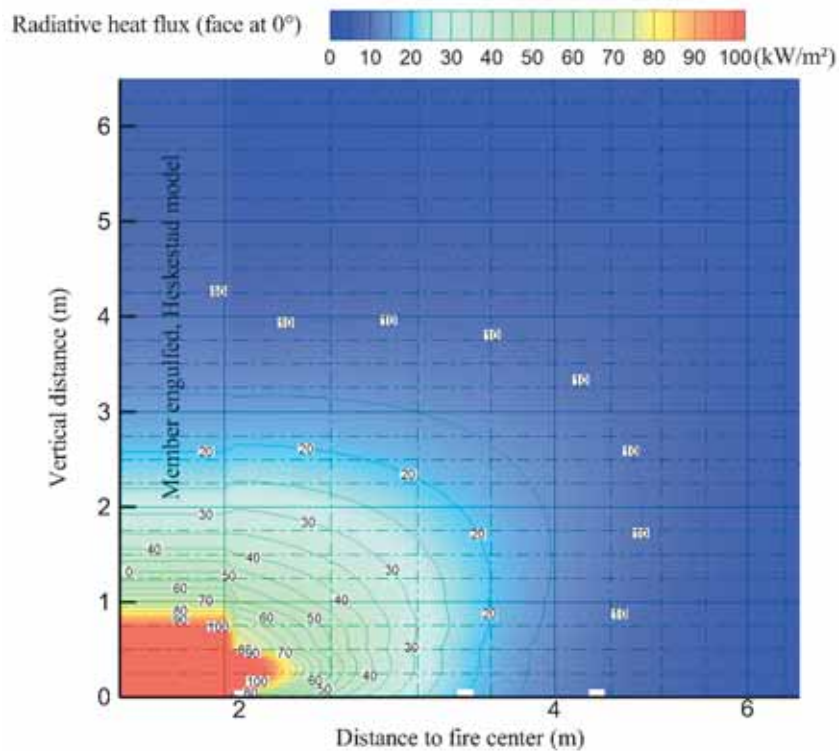
Obrázek D.6 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 3$ m a $HRR = 500$ kW/m²



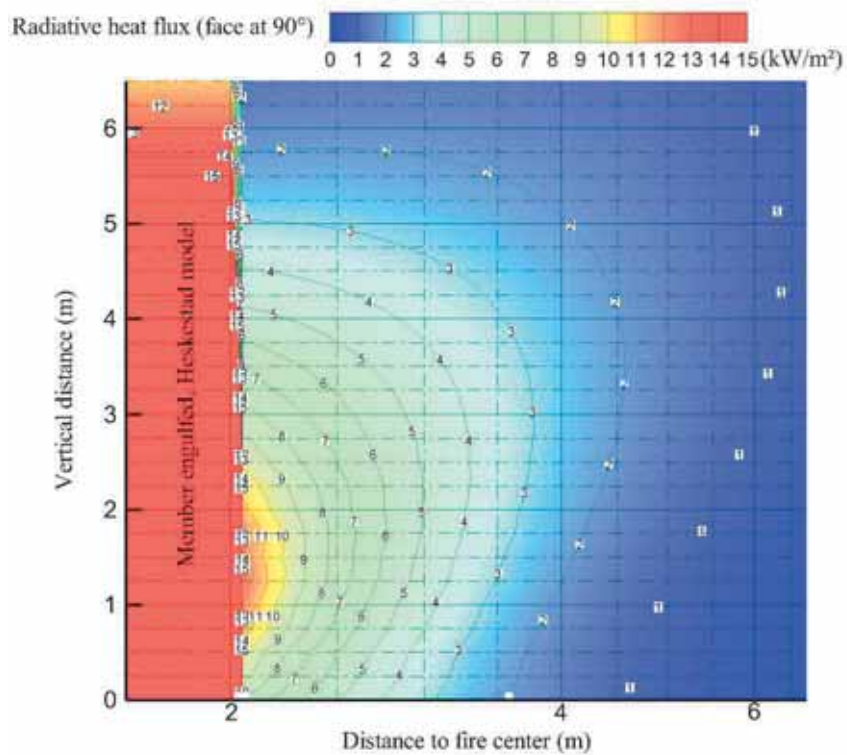
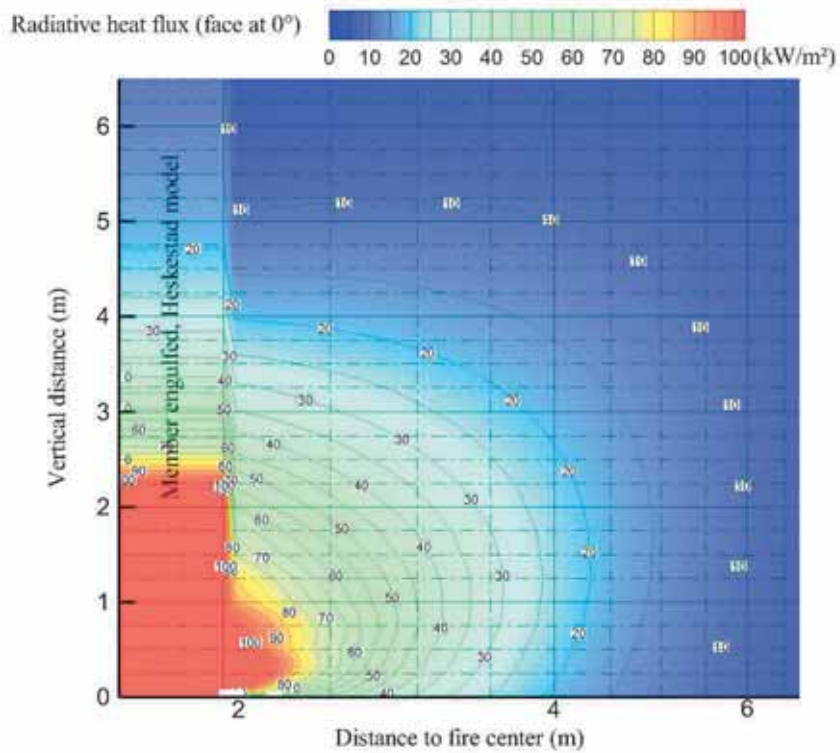
Obrázek D.7 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 3$ m a $HRR = 1000$ kW/m²



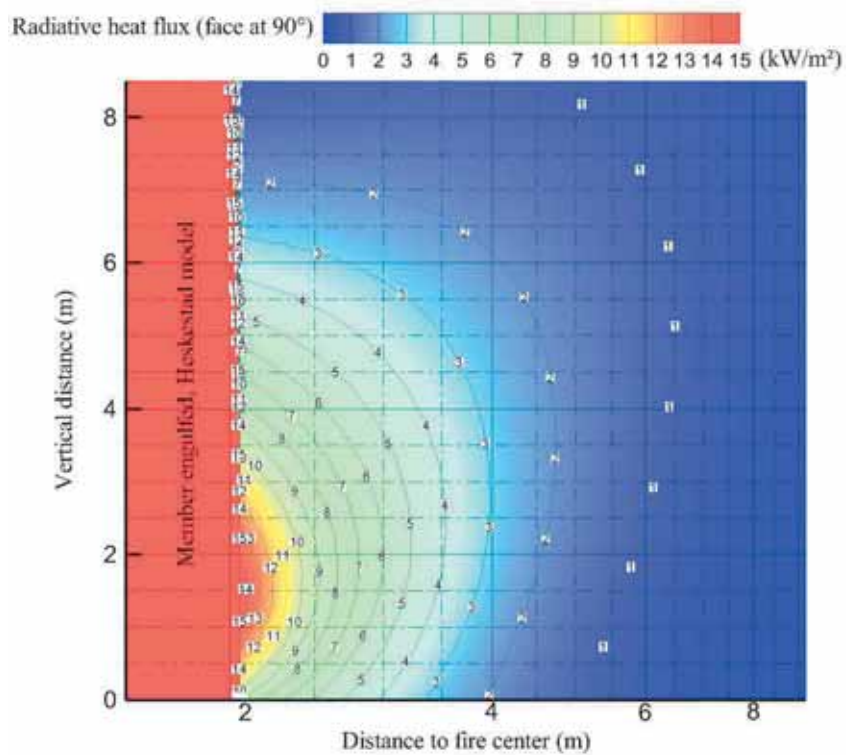
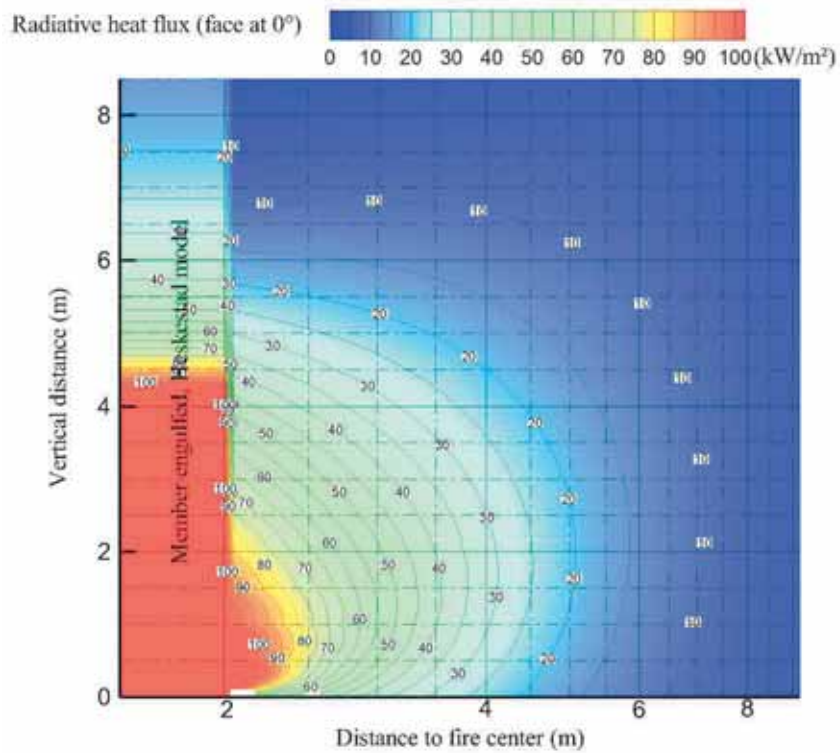
Obrázek D.8 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 3$ m a $HRR = 1500$ kW/m²



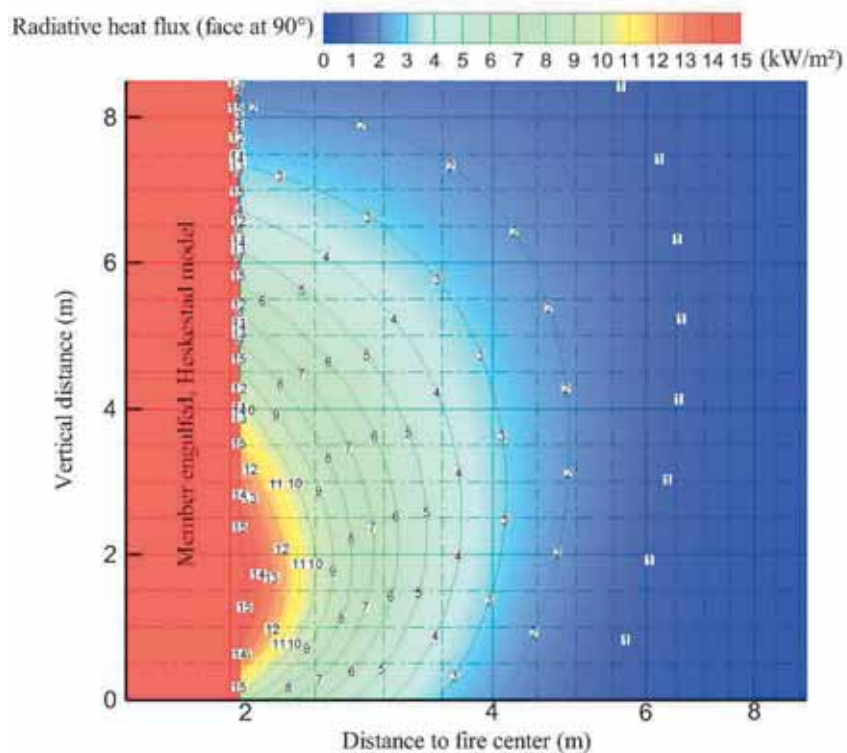
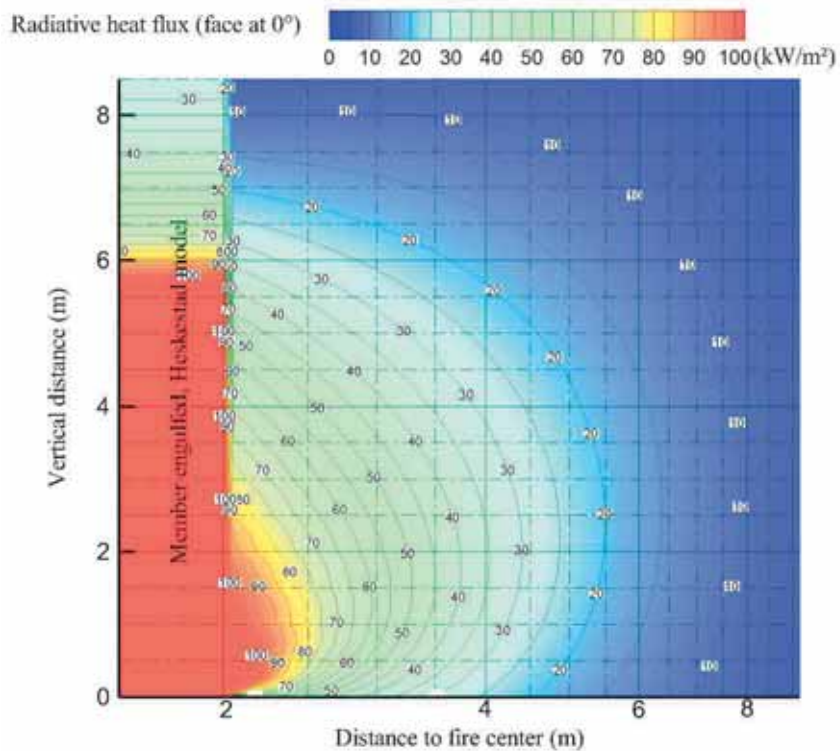
Obrázek D.9 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 4$ m a $HRR = 250$ kW/m²



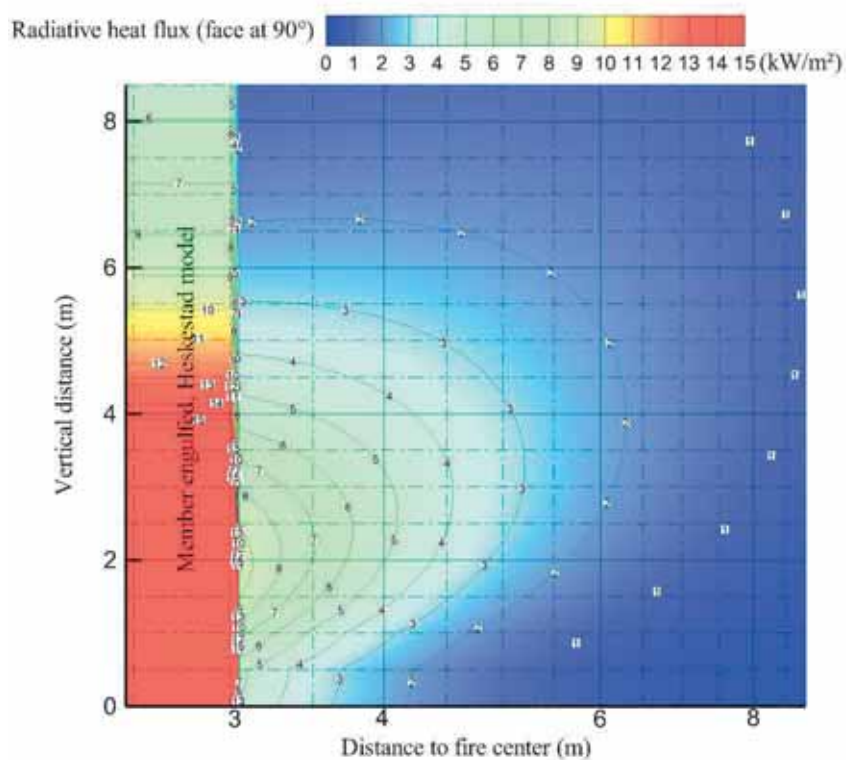
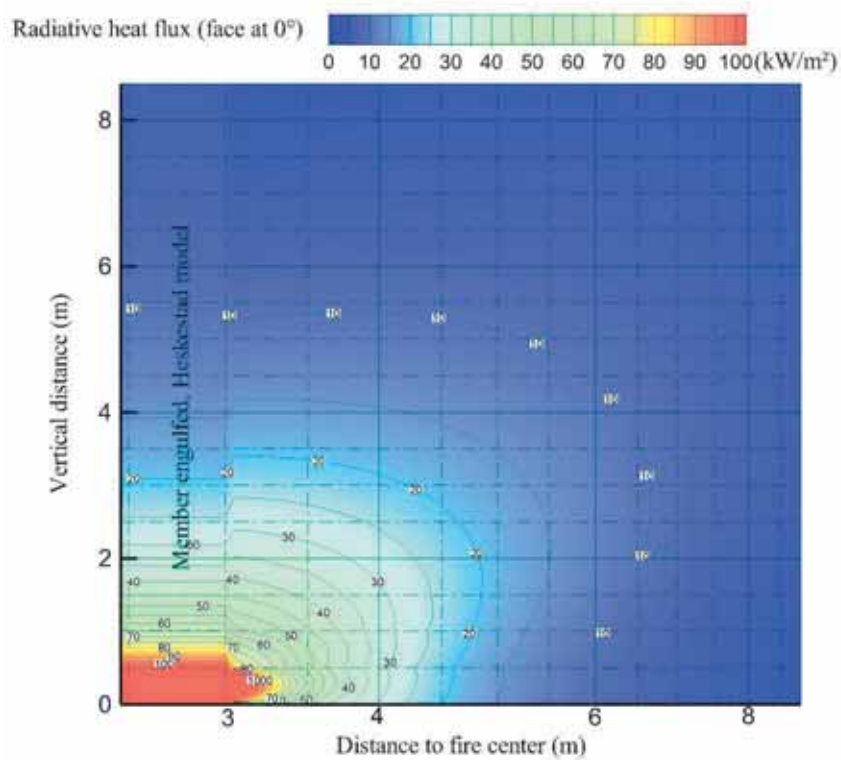
Obrázek D.10 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 4$ m a $HRR = 500$ kW/m²



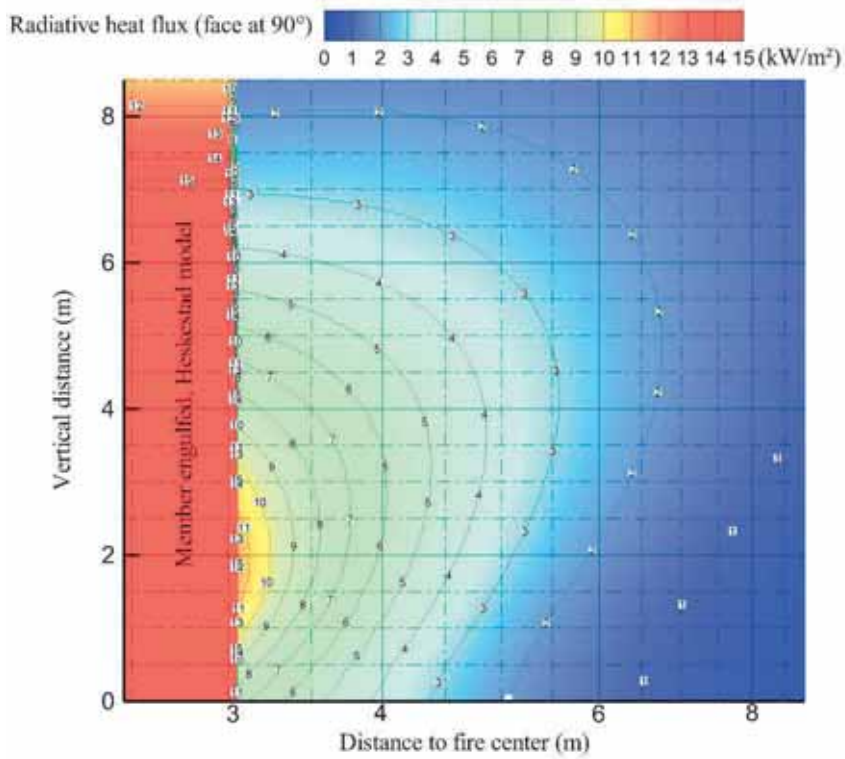
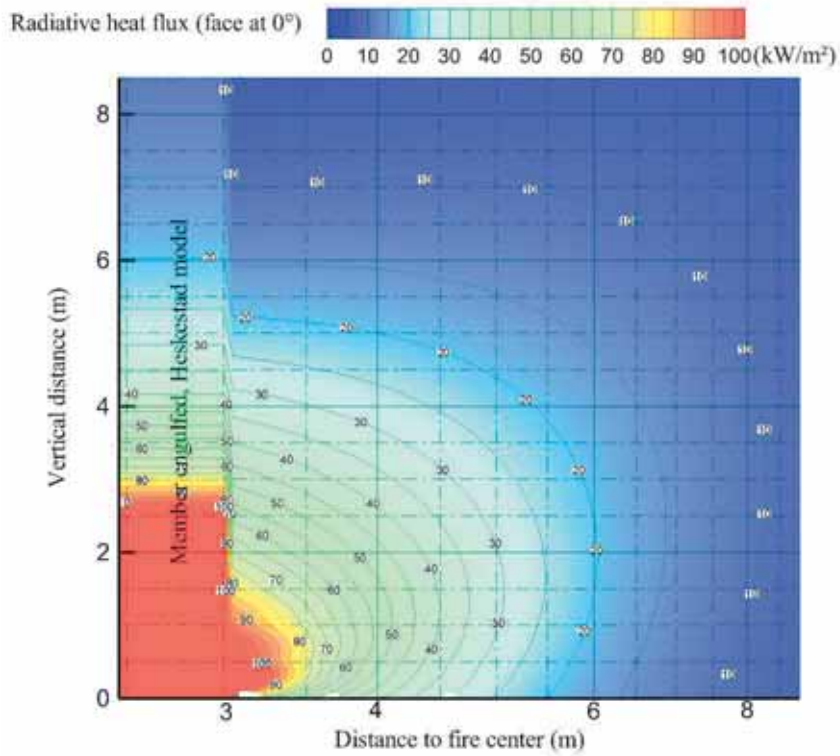
Obrázek D.11 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 4$ m a $HRR = 1000$ kW/m²



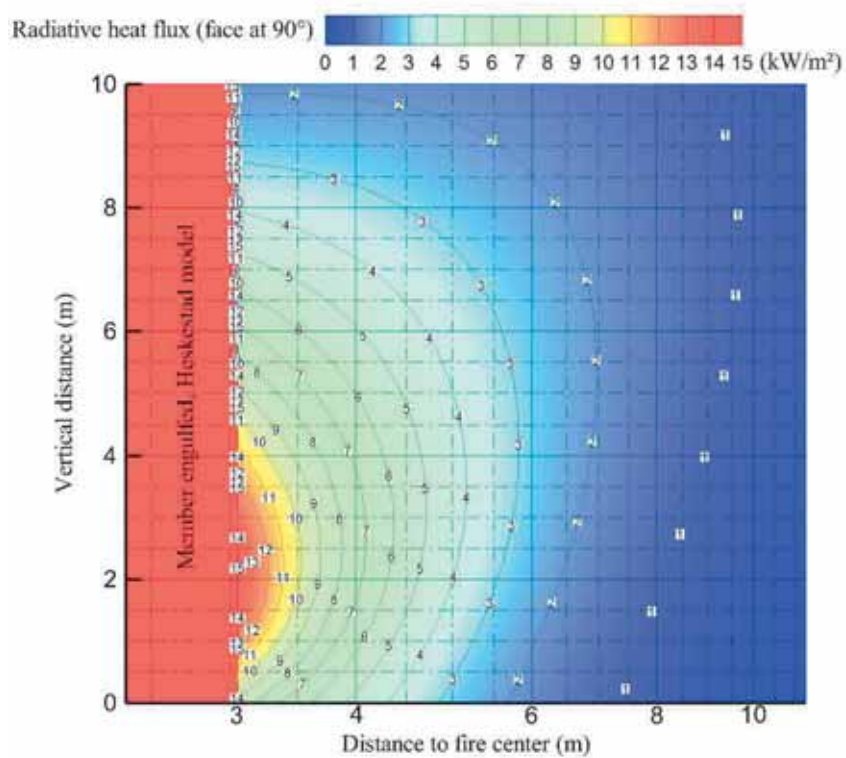
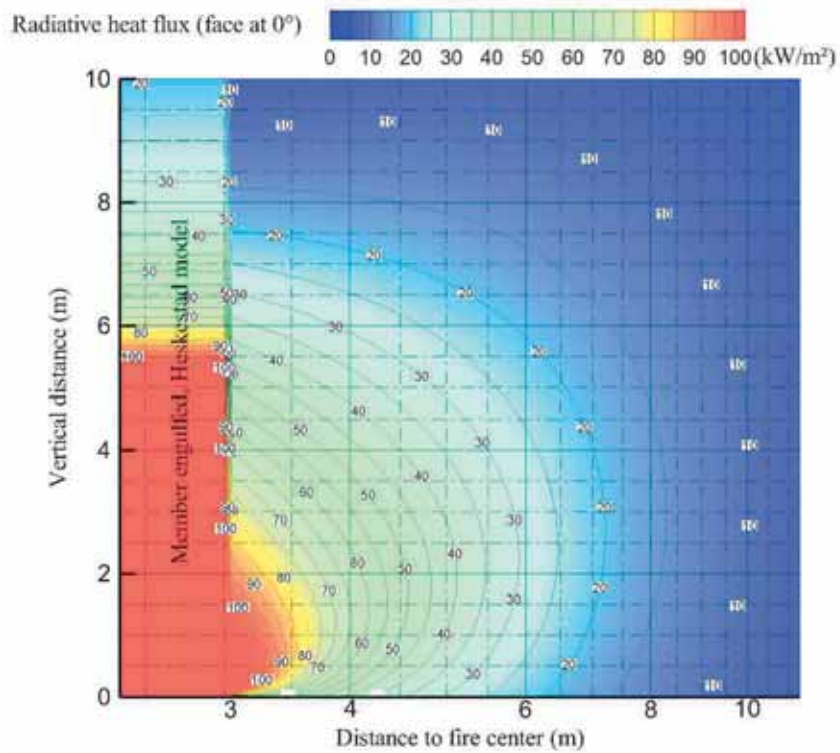
Obrázek D.12 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 4$ m a $HRR = 1500$ kW/m²



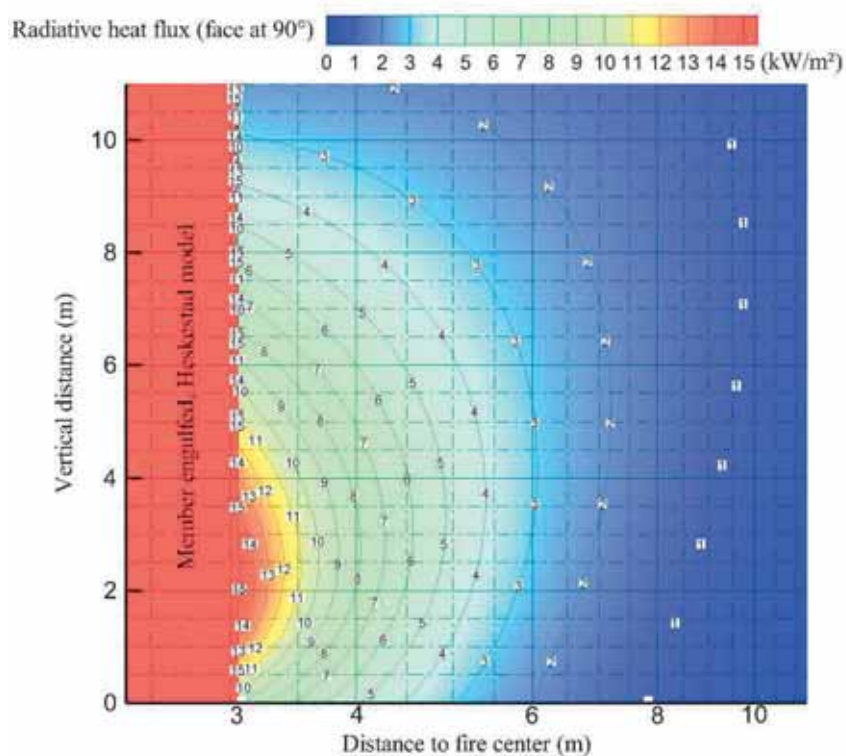
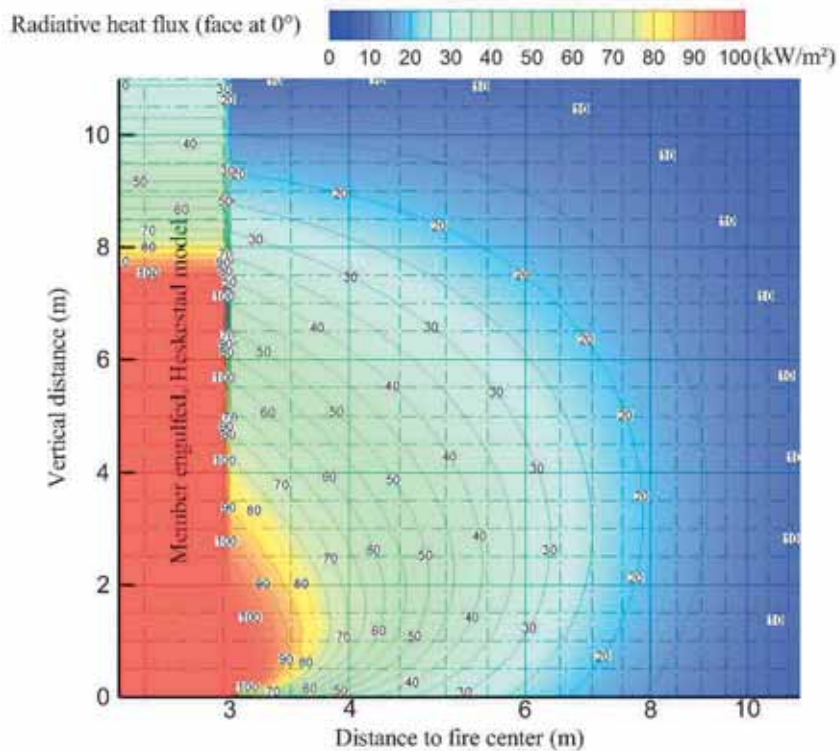
Obrázek D.13 Vrstevníce tepelného toku pro $D = 6$ m a $HRR = 250$ kW/m²



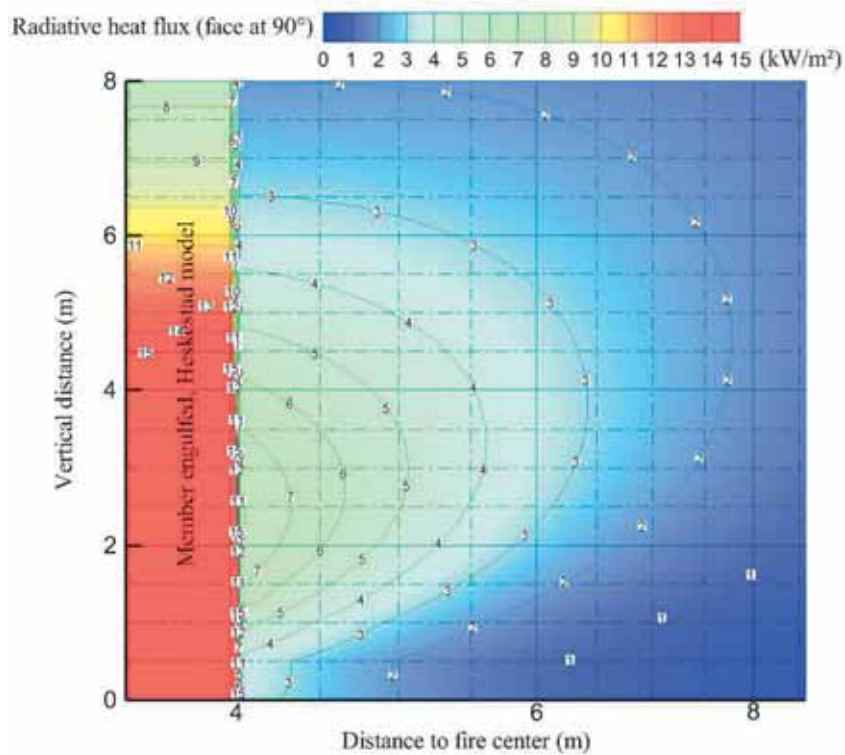
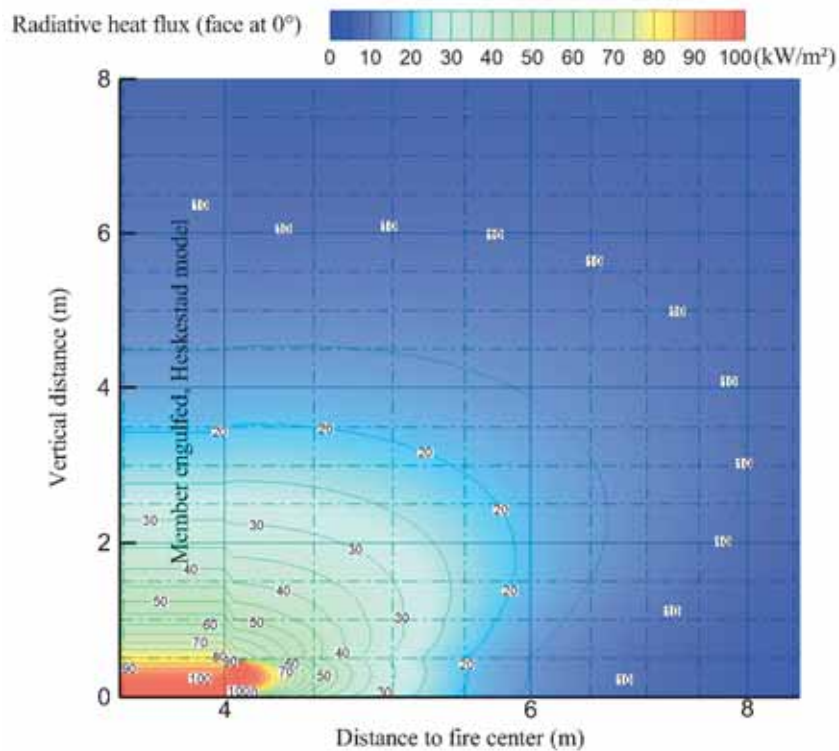
Obrázek D.14 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 6$ m a $HRR = 500$ kW/m²



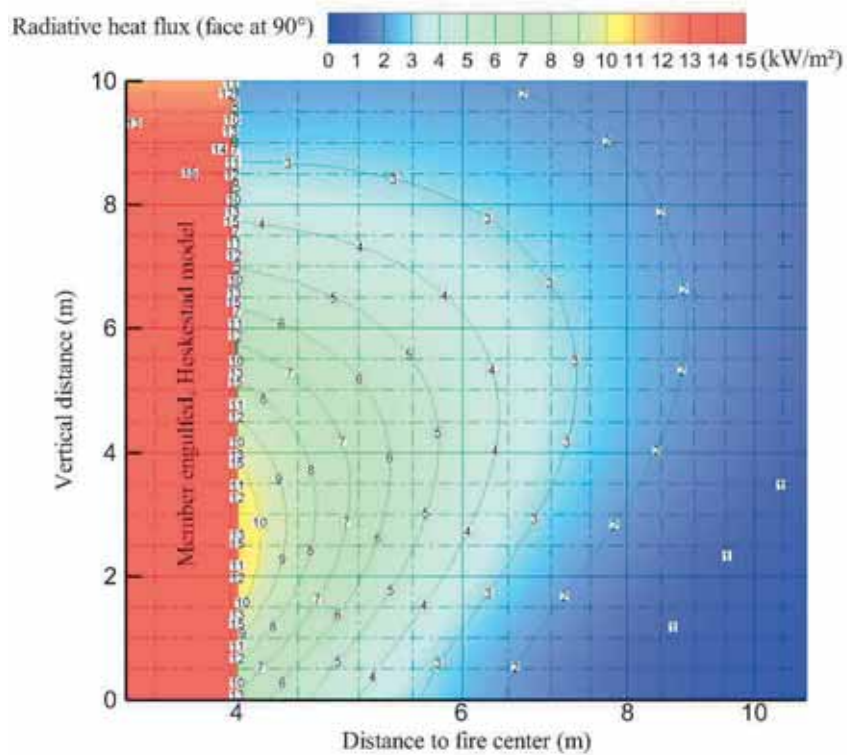
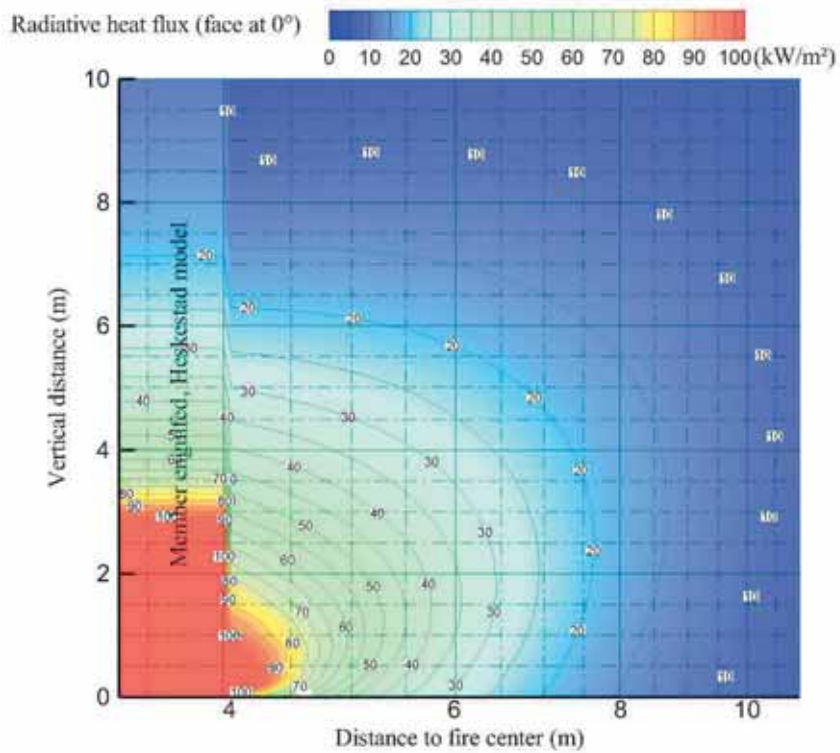
Obrázek D.15 Vrstevníce tepelného toku pro $D = 6$ m a $HRR = 1000$ kW/m²



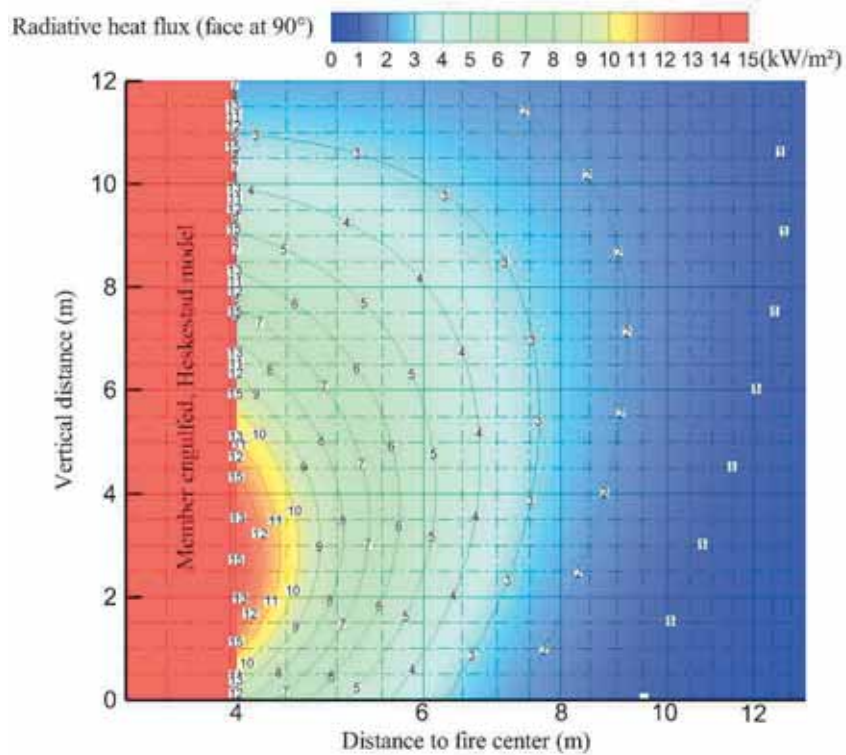
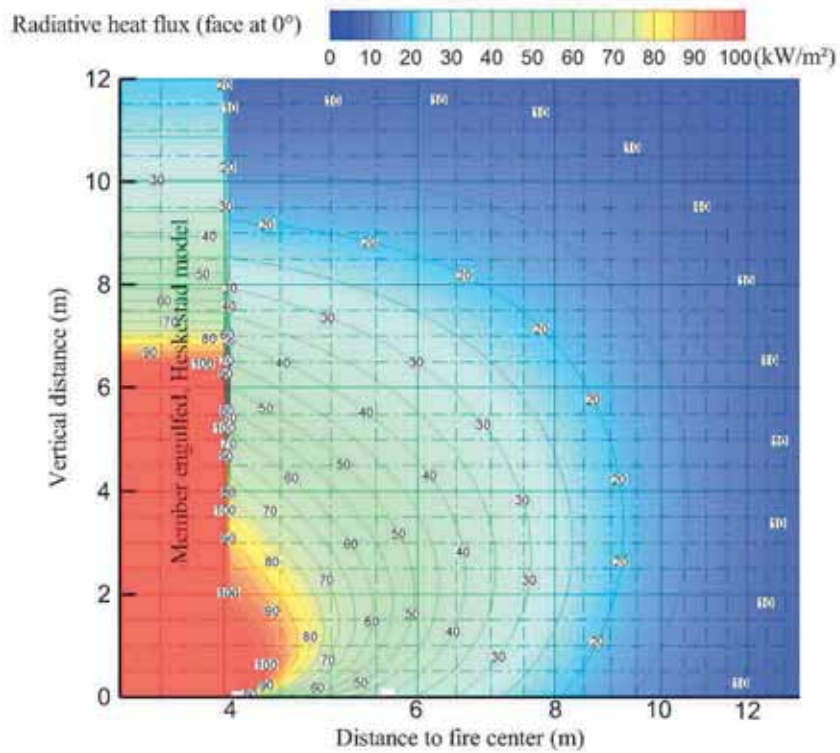
Obrázek D.16 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 6$ m a $HRR = 1500$ kW/m²



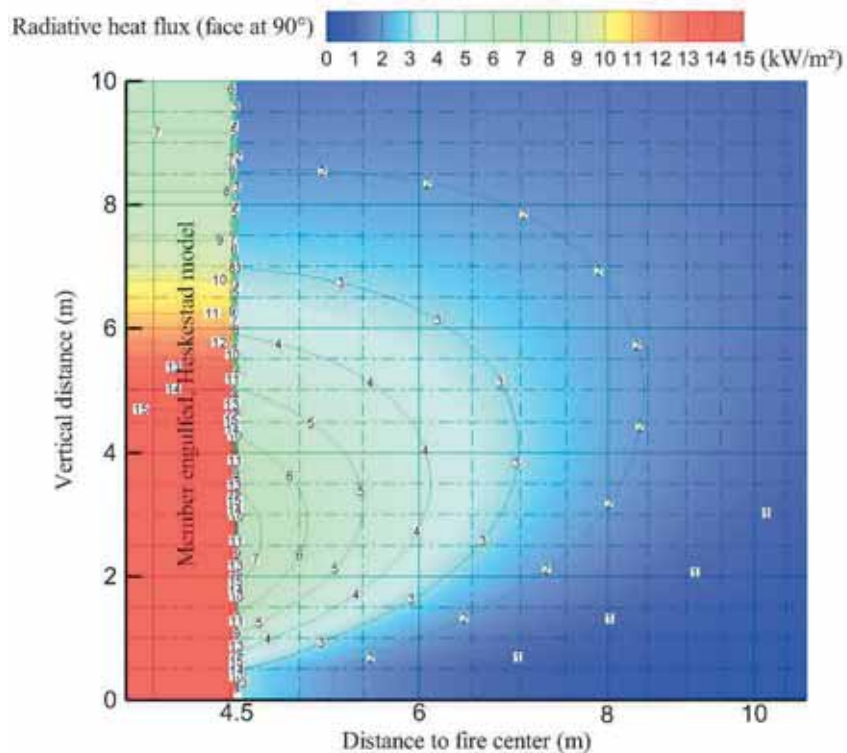
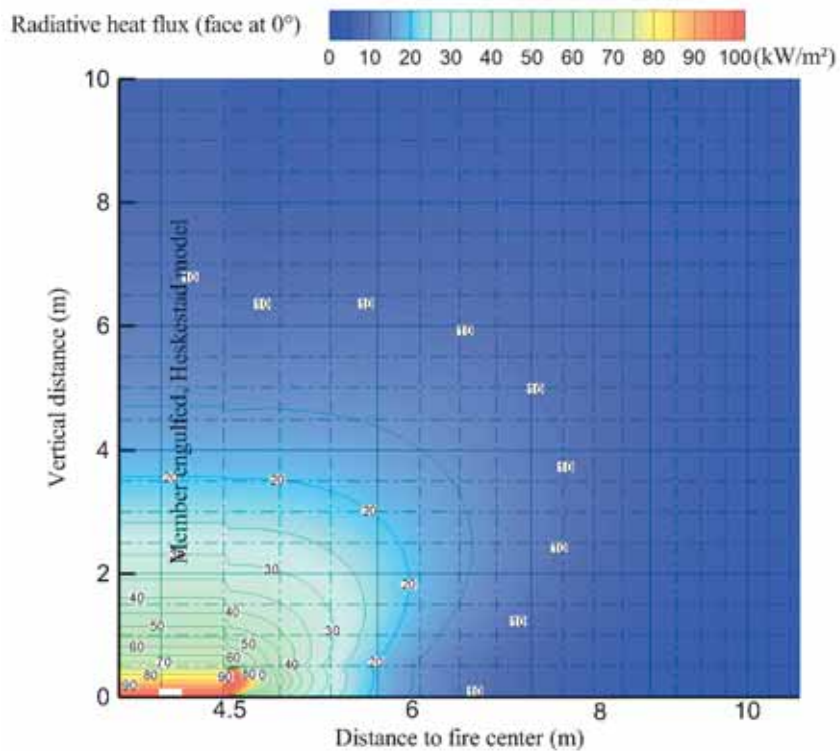
Obrázek D.17 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 8$ m a $HRR = 250$ kW/m²



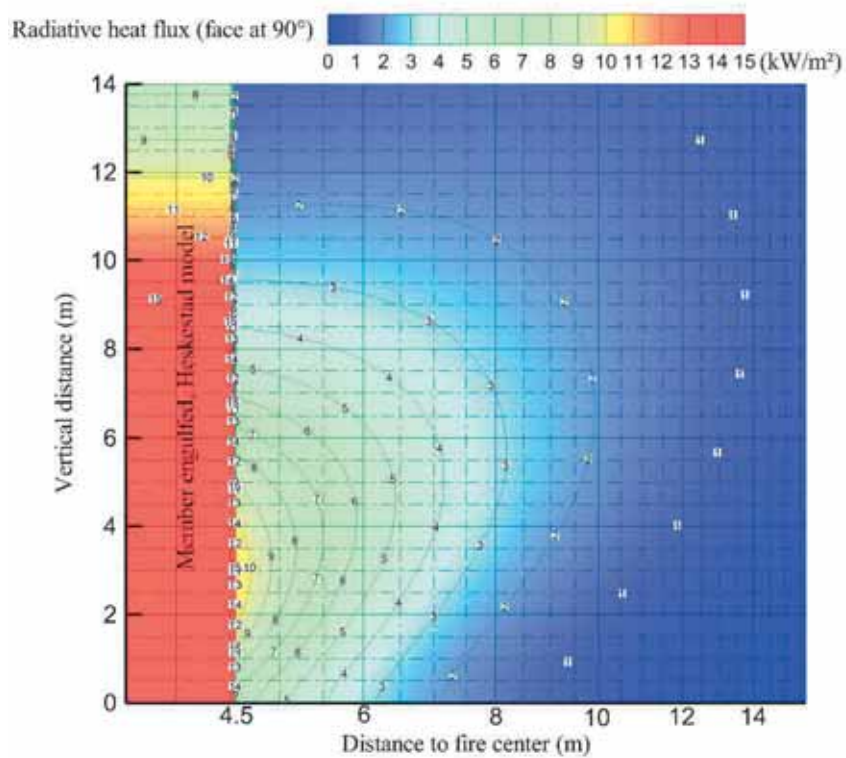
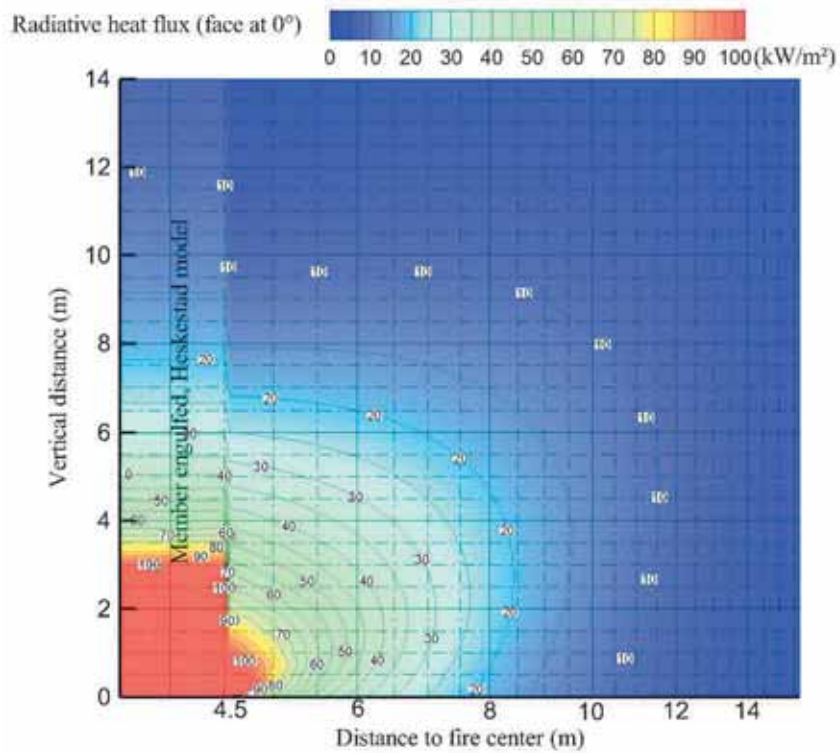
Obrázek D.18 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 8$ m a $HRR = 500$ kW/m²



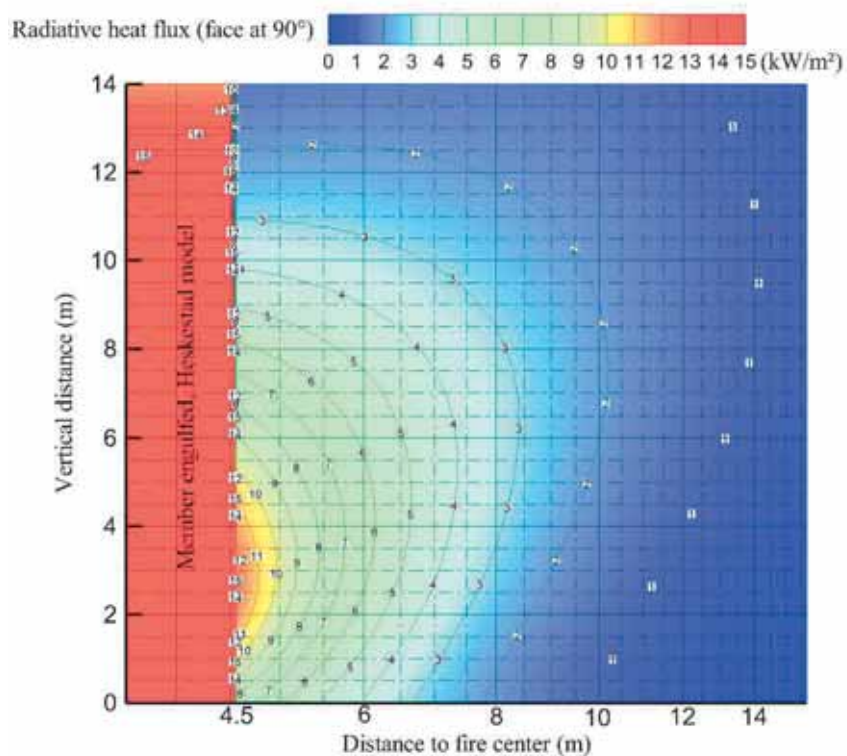
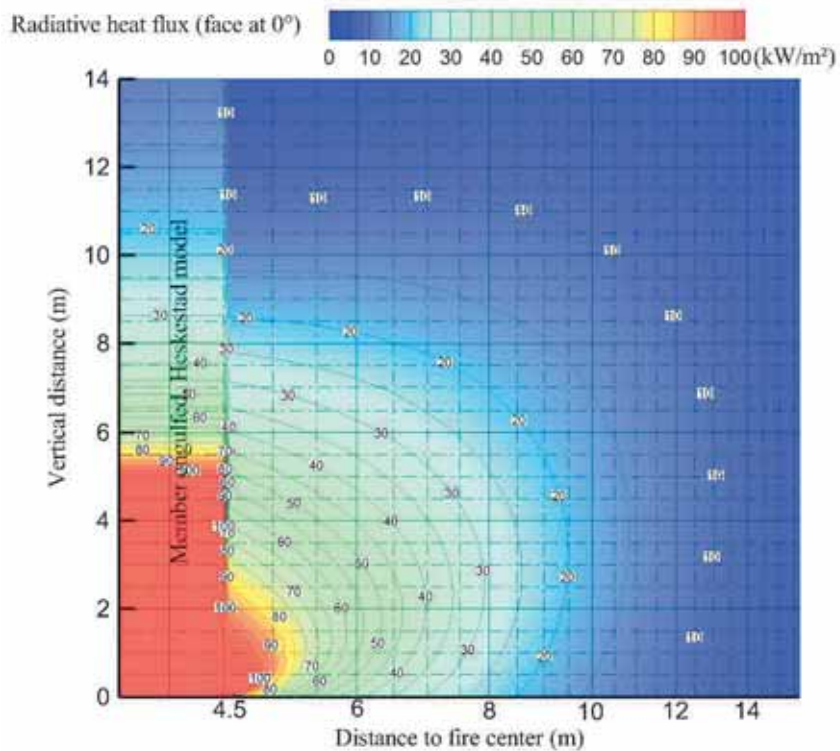
Obrázek D.19 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 8$ m a $HRR = 1000$ kW/m²



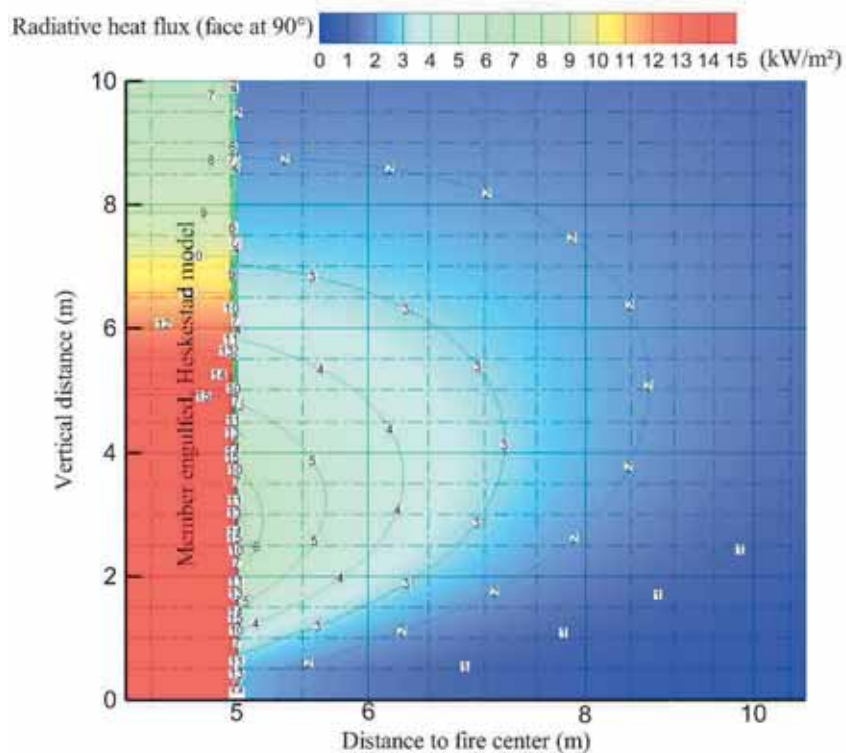
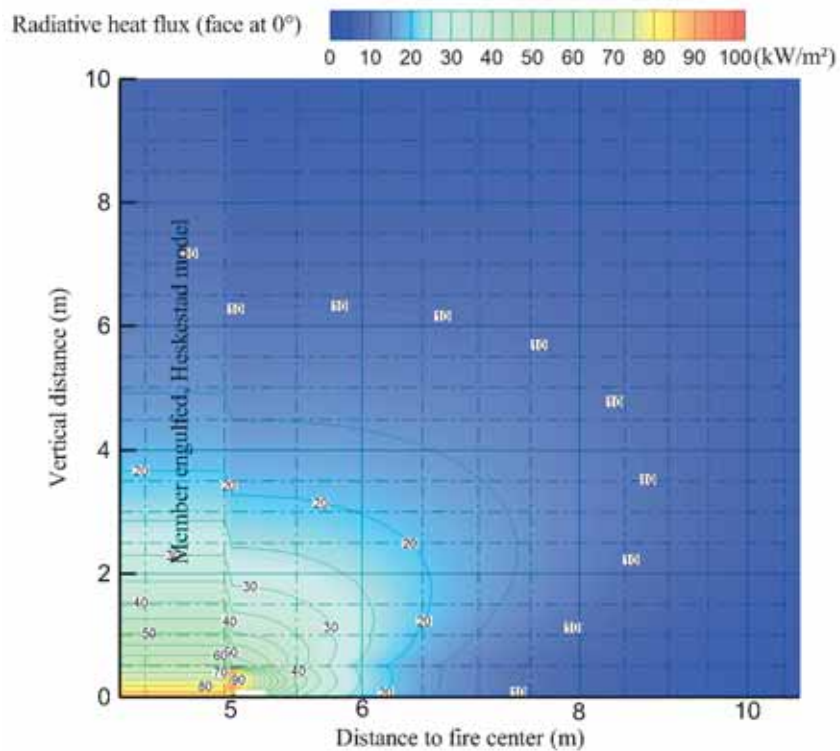
Obrázek D.20 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 9$ m a $HRR = 250$ kW/m²



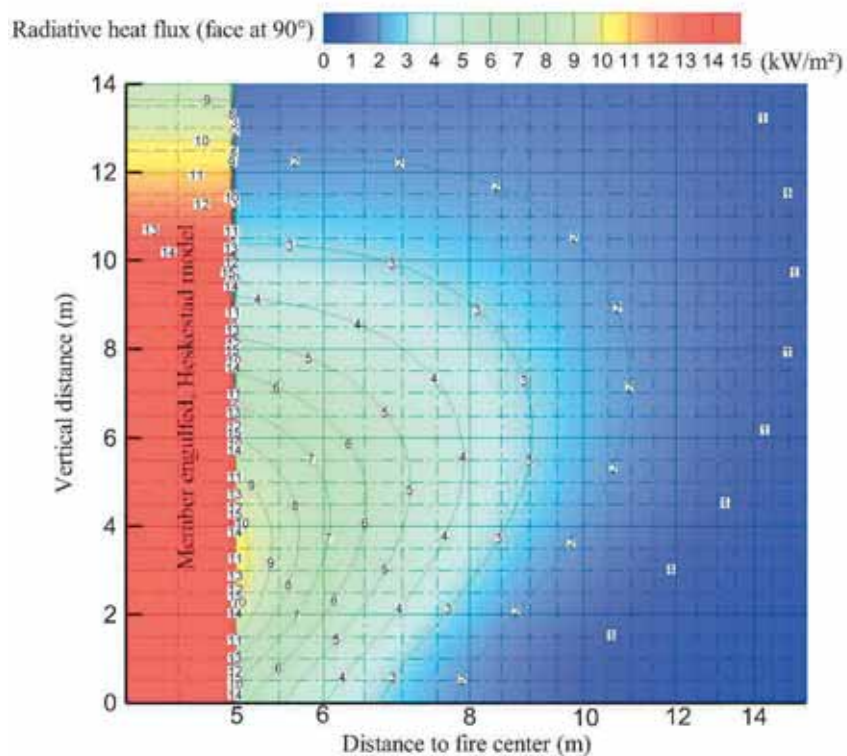
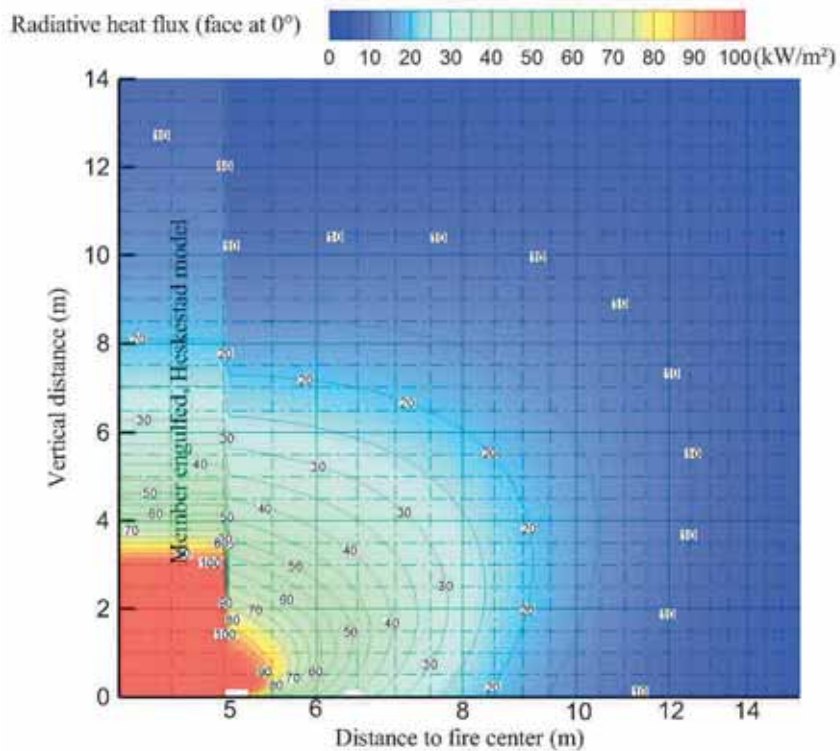
Obrázek D.21 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 9$ m a $HRR = 500$ kW/m²



Obrázek D.22 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 9$ m a $HRR = 750$ kW/m²



Obrázek D.23 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 10$ m a $HRR = 250$ kW/m²



Obrázek D.24 Vrstevnice tepelného toku pro $D = 10$ m a $HRR = 500$ kW/m²

PŘÍLOHA E

ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

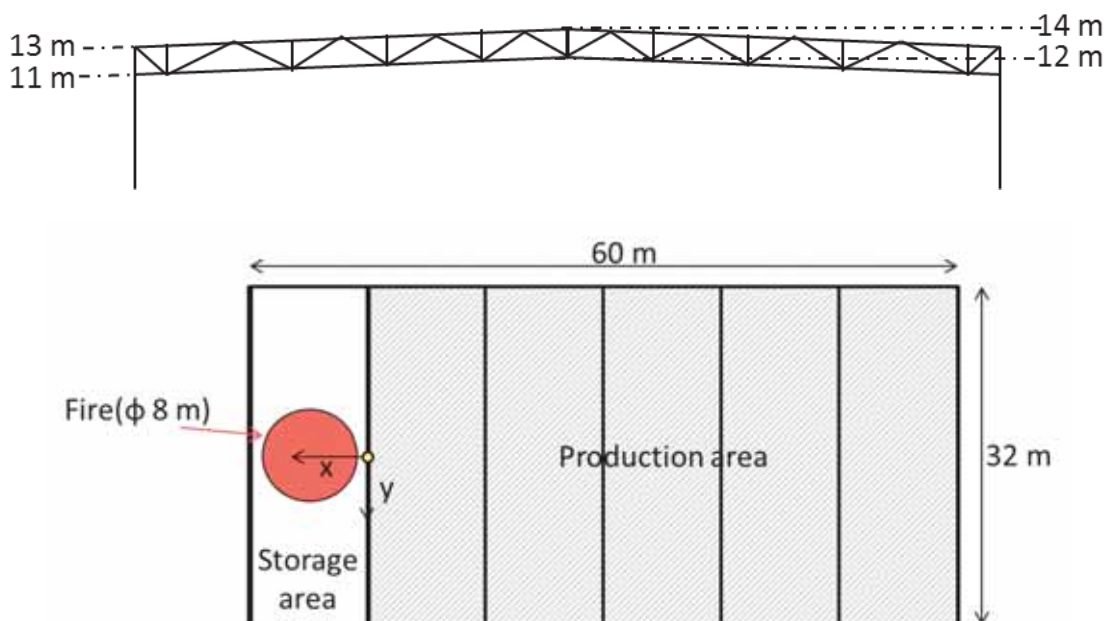
V řešených příkladech je použita metodika popsaná v kapitole 4. První příklad rozšiřuje metodu pro sloupy ve vrstvě kouře mimo plamen. Druhý příklad aplikuje model obrysových ploch a program OZone. Třetí příklad zahrnuje čtyři zdroje hoření a neobvyklé křivky HRR.

E.1 Průmyslová budova

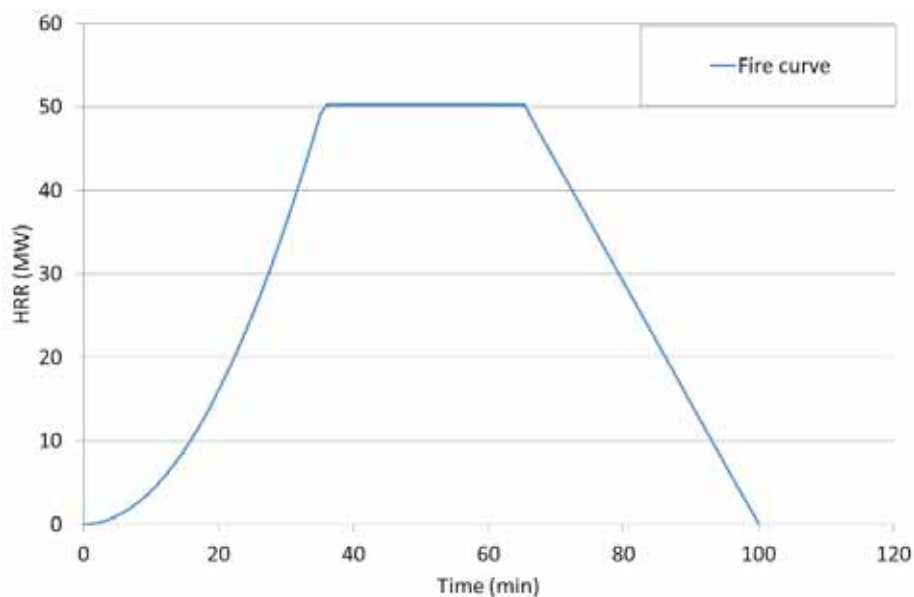
E.1.1 Požární scénář

Sklad na obrázku E.1 je 60 m dlouhý a 32 m široký s vrcholem ve výšce 14 m. Vazby s vazníky s pasy průřezu HEA 220 a diagonálami L60×60×6 jsou umístěny každých 10 m. Hala je navržena pro výrobu. Na konci budovy je malá skladovací plocha, ve které se předpokládá lokální požár. Uvažuje se skladování 10 t celulózy na ploše 50 m², což odpovídá průměru požáru o velikosti 8 m. Křivka HRR na obrázku E.2 se uvažuje podle přílohy E v ČSN EN 1991-1-2. Výpočet uvažuje s

- střední rychlost rozvoje požáru je $t_{\alpha} = 300$ s,
- zdroj požáru je celulóza s výhřevností 17,5 MJ/kg a
- rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy je 1000 kW/m².



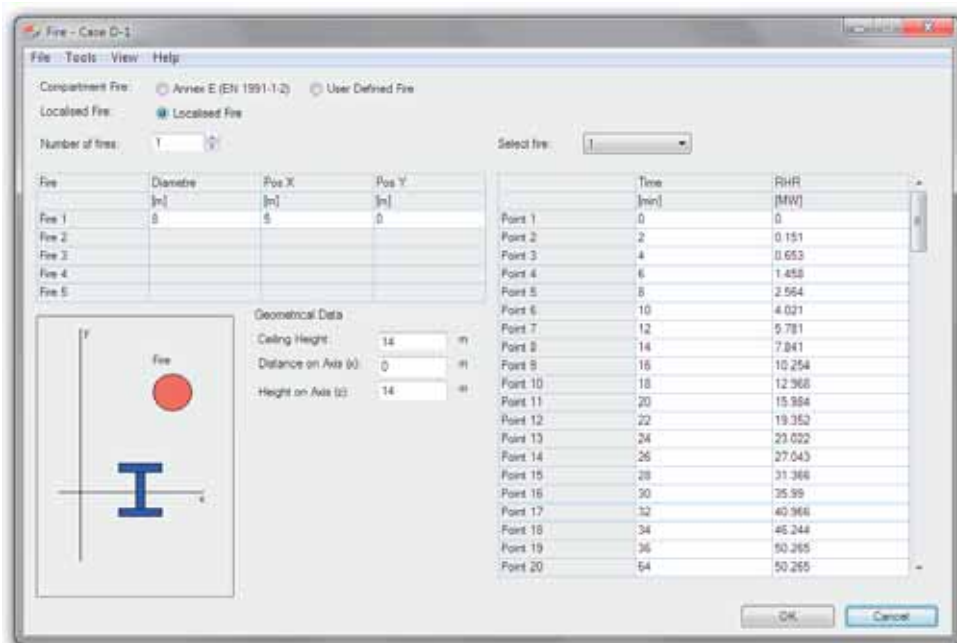
Obrázek E.1 Průmyslová budova – Řez a Půdorys



Obrázek E.2 Křivka HRR pro lokální požár v hale

E.1.2 Vstupní data pro program OZone

Analýza je zaměřena na vazníky, jejichž prvky jsou vystaveny plamenům, tj. dolní pas ve výšce 12 m a horní pas vazníku ve výšce 14 m. Vstupní data vychází z předchozí kapitoly. V programu Ozone se zadávají se v tabulkách "Fire" a "Steel Profile", jak je uvedeno na obrázcích E.3 a E.4.



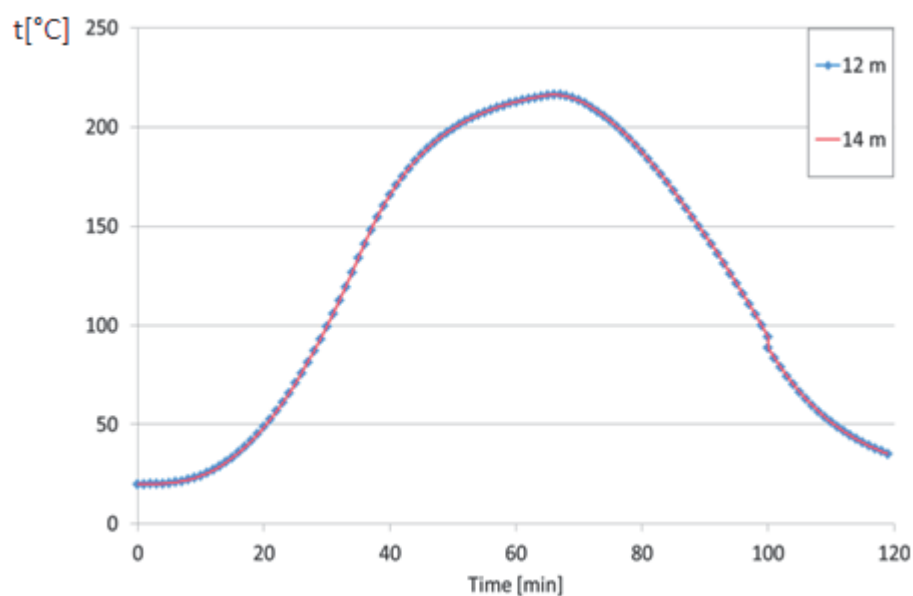
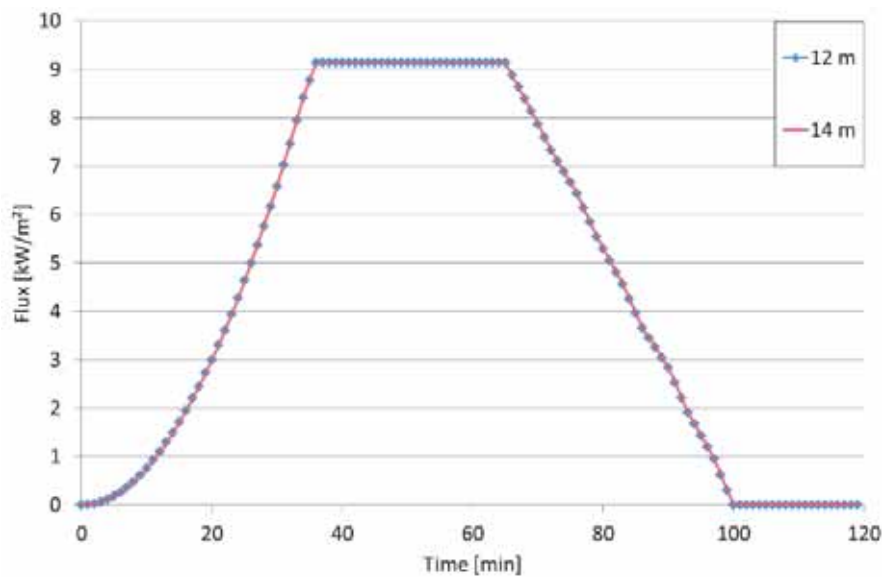
Obrázek E.3 Vstupní data v záložce "Fire"



Obrázek E.4 Vstupní data v záložce “Steel Profile”

E.1.3 Výsledky programu OZone

Při požáru o průměru 8 m a maximální HRR 50 MW je výška plamene 9,7 m. Plameny nezasáhnou strop. Teplota dolního pasu vazníku dosáhne 210°C, viz obrázek E.5.

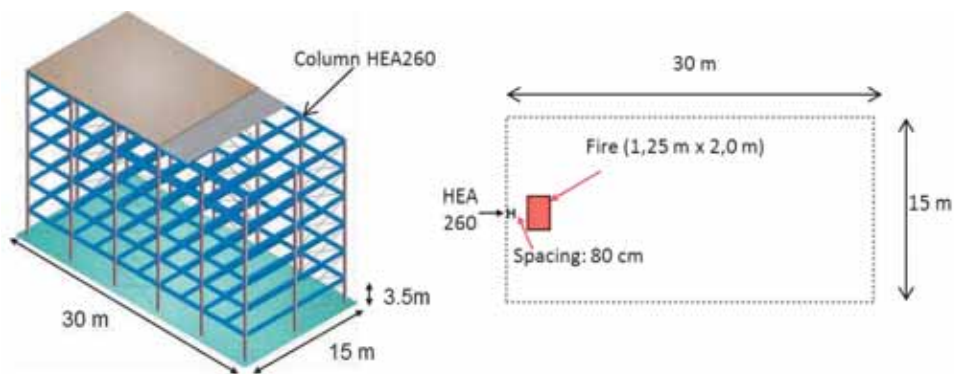


Obrázek E.5 Přijatý tepelný tok (horní graf) a průběh teplota pasy vazníku (spodní graf)

E.2 Kancelářská budova

E.2.1 Požární scénář

V příkladu se řeší pětipatrová administrativní budova, viz obrázek E.6, o rozměrech 30 m x 15 m a výšce stropů 3,5 m. Sloupy HEA 260 jsou umístěny po obvodu budovy. Požární scénář řeší vzplanutí tiskařského papíru na paletě o hmotnosti 500 kg na ploše 2,5 m² (2 m × 1,25 m). Plocha, je umístěna 0,8 m před pásnicí sloupu, viz obrázek E.6.

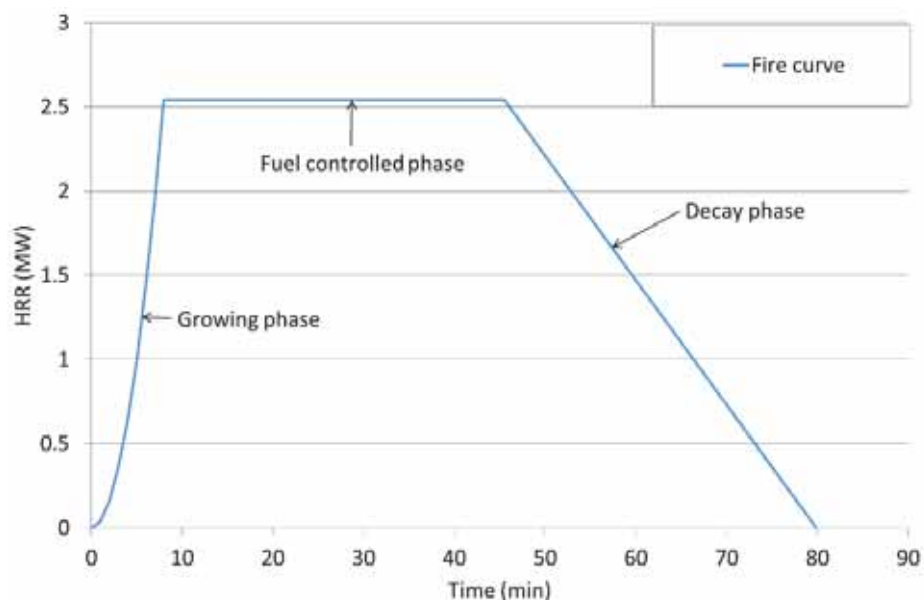


Obrázek E.6 Rozměry administrativní budovy (vlevo) a umístění zdroje požáru (vpravo)

Křivka HRR podle přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2 má část rostoucí, konstantní a klesající, viz obrázek E.7. Rostoucí fáze je definována vztahem

$$Q(t) = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (\text{E.1})$$

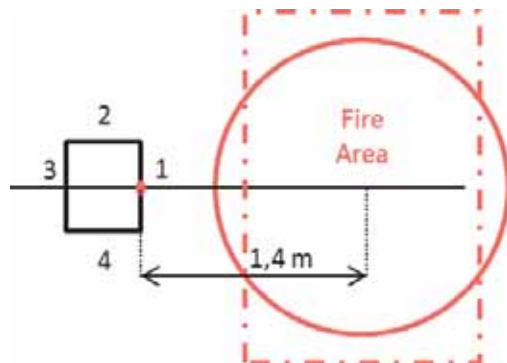
kde Q je HRR, t je čas v sekundách a t_α je čas potřebný k dosažení HRR 1 MW. Pro kancelářskou budovu se t_α rovná 300 s. V případě lokálního požáru není HRR omezeno větráním, ale velikostí prostoru. Za předpokladu, že $\text{HRR} = 1000 \text{ kW/m}^2$, bude dosaženo maximální HRR 2,5 MW. Klesající část začne při spálení 70 % paliva a ukončí se při vyhoření 100 % paliva.



Obrázek E.7 Křivka HRR dle přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2

E.2.2 Výpočet pomocí vrstevnic tepelného toku

Podle kapitoly 4.1.1 lze požár uvažovat o kruhovém půdoryse 1,8 m s plochou 2,5 m², viz obrázek E.8. Nejširší strana sloupu 260 mm je 1,4 m od středu plamene.



Obrázek E.8 Půdorys modelu sloupu a plamenů

Maximální HRR je 1000 kW/m^2 , což odpovídá hodnotě přístupné v seznamu vrstvic tepelných toků. Je vybrán požár průměru 2 m. Hodnoty pocházejí z Přílohy D obr. D3.

Sloup je rozdělen na segmenty o výšce 0,5 m. Průměrný tepelný tok pro segment pak vypočítá z rovnice (4.1). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce E.1. Hodnoty v horké vrstvě, nad 3,15 m, se nezobrazují.

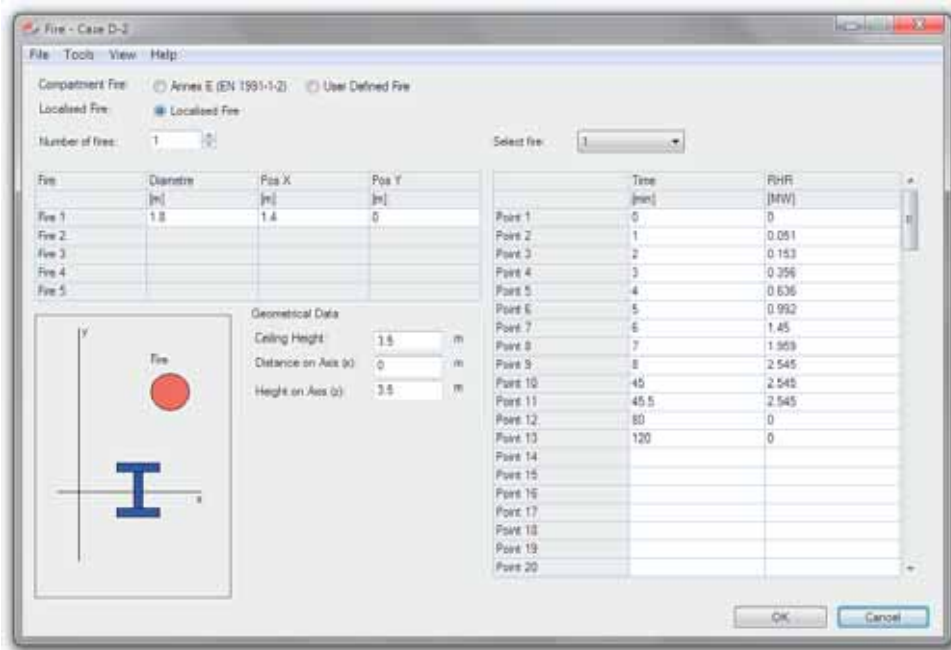
Tabulka E.1 Tepelný tok

| Výška (m) | Tepelný tok | | |
|-----------|-------------|----------|--------|
| | Povrch 1 | Povrch 2 | Průměr |
| 0,5 | 65 | 7 | 19,75 |
| 1 | 60 | 7,5 | 18,75 |
| 1,5 | 55 | 7 | 17,25 |
| 2 | 45 | 6 | 14,25 |
| 2,5 | 35 | 5 | 11,25 |
| 3 | 25 | 4 | 8,25 |

V zóně 1 o průměru 0,5 m dosahuje tepelný tok $19,75 \text{ kW/m}^2$. V obrázku 4.9 je teplota stanovena na 300°C .

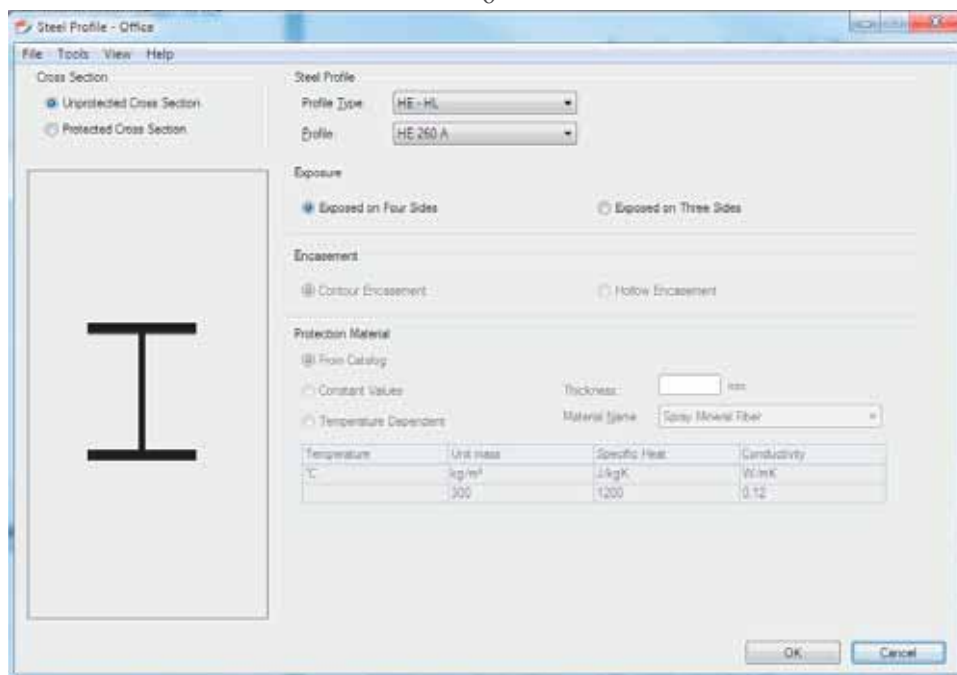
E.2.3 Vstupní data pro program OZone

Postup výpočtu vývoje tepelného toku a teploty sloupu se počítá jako v předešlém příkladě. Nejprve se uvede poloha zdroje požáru vzhledem ke sloupu ($X = 0$ a $Y = 0$) a HRR v záložce "Localised Fire". Při vzdálenosti 0,5 m a průměru požáru 1,8 m je střed plamene vzdálen 1,4 m, viz obrázek E.9. Ve stejné záložce je výška požárního úseku a poloha vyšetřovaného bodu, od $z = 0,5 \text{ m}$ do $3,5 \text{ m}$. V záložce "Steel profile" se vybere průřez sloupu HE260A, viz obr. E.10.



Obrázek E.9 Vstupní data v záložce “Fire”

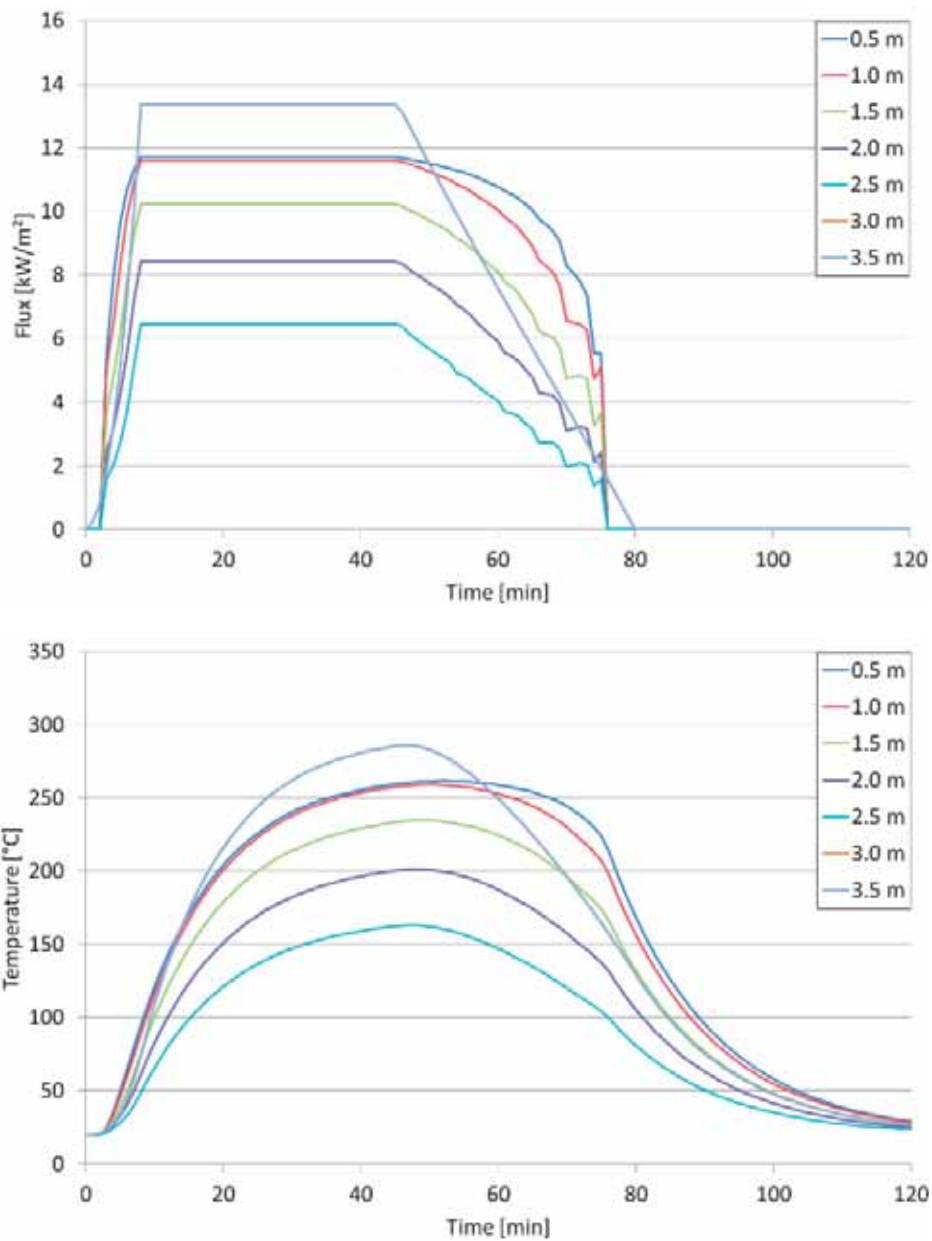
6



Obrázek E.10 Vstupní data v záložce “Steel Profile”

E.2.4 Výsledky programu

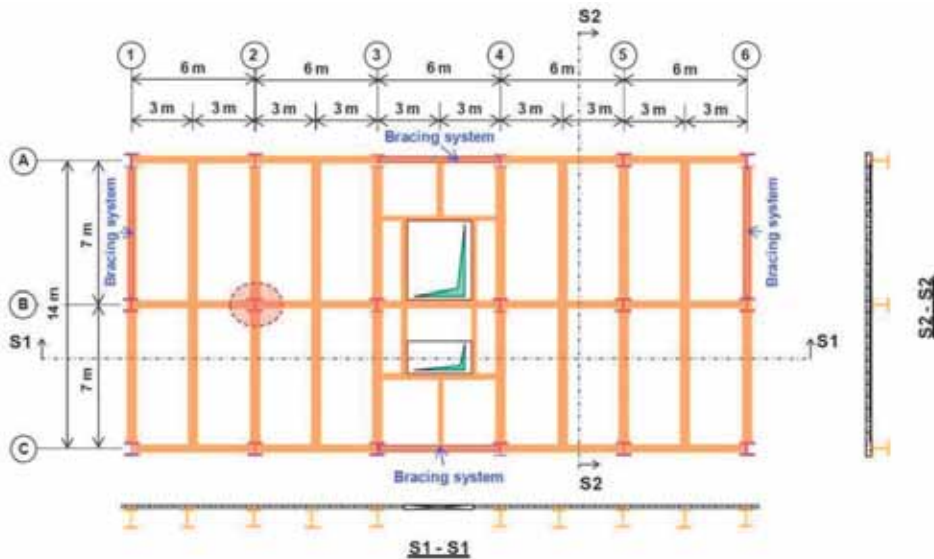
Výsledky jsou uvedeny na obrázku E.11 po výšce sloupu (0,5 m – 1,0 m – 1,5 m – 2,0 m – 2,5 m – 3,0 m – 3,5 m). Maximální vypočítaná teplota je 250°C ve výšce 0,5 m a 1,0 m. Lze předpokládat, že teplota ve výšce 0,75 m dosahuje asi 260°C.



Obrázek E.11 Tepelný tok (horní graf) a průběh teploty po výšce sloupu (spodní graf)

E.2.5 Návrh sloupu

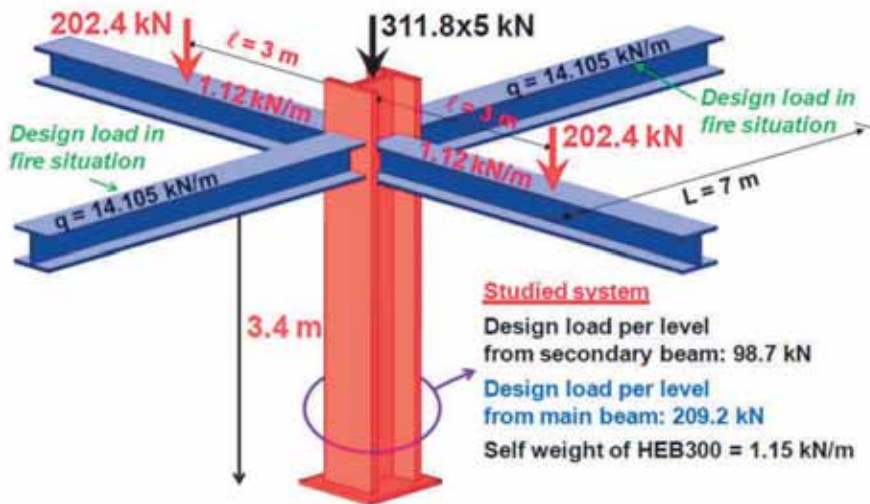
Pro známou nejvyšší dosaženou teplotu lze sloup navrhnout. Budova v příkladu je převzata z monografie Eurocodes: Background and applications, Structural fire design, Worked examples^[26].



Obrázek E.12 Pozice sloupu

E.2.5.1. Zatížení

Na každém podlaží přenáší sloup zatížení ze dvou stropnic a dvou průvlaků. Nosníky jsou uvažovány jako prostě uložené. V případě požáru je rovnoměrně zatížení stropnic 14,105 kN/m. Na průvlaky se uvažuje koncentrované zatížení ve středu rozpětí 202,4 kN a rovnoměrné 1,12 kN/m. Dále se uvažuje vlatní tíha sloupu 1,15 kN/m, viz obr. E.13.



Obrázek E.13 Zatížení sloupu v přízemí

Na každé úrovni je soustředěné zatížení

$$P_{fi,d,t} = \Sigma(G_{k,1} + \psi_{2,1}Q_{k,1}) = 14.105 \times 7 + 202.4 + 112.6 \approx 307.9 \text{ kN} \quad (\text{E.2})$$

Vlastní hmotnost sloupu lze konzervativně uvažovat

$$q_{fi,d,t} = 1.148 \times 3.4 \approx 3.9 \text{ kN/m} \quad (\text{E.3})$$

Celkové osově zatížení sloupu je

$$N_{fi,d,t} = (307.9 + 3.9) \times 6 = 1870.8 \text{ kN} \quad (\text{E.4})$$

E.2.5.2 Klasifikace průřezů sloupu

Průřez sloupu lze klasifikovat podle tabulky 5.2 normy ČSN EN 1993-1-1 a čl. 4.2 normy ČSN EN 1993-1-2 pro průřez namáhaný tlakem. Rozměry průřezu HEB 300 jsou shrnuty na obrázku E.14.

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

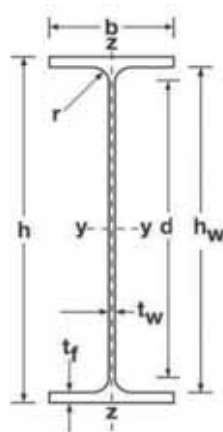
$$t_w = 11 \text{ mm}$$

$$t_f = 19 \text{ mm}$$

$$r = 27 \text{ mm}$$

$$h_w = 262 \text{ mm}$$

$$d = 208 \text{ mm}$$



Obrázek E.14 Rozměry průřezu sloupu

Podle bodu 4.2 normy ČSN EN 1993-1-2 platí

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{235/f_y} = 0.786 \text{ with steel grade S275} \quad (\text{E.5})$$

Podle Tabulky 5.2 normy ČSN EN 1993-1-1 jsou meze pro třídu 1:

$$\text{Stojina} \quad \frac{c}{t_w} \leq 33\varepsilon \Rightarrow \frac{d}{t_w} \leq 33\varepsilon = 25.9$$

$$\text{Pásnice} \quad \frac{c}{t_f} \leq 9\varepsilon \Rightarrow \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} \leq 9\varepsilon = 7.07$$

Pro dané rozměry je

$$\text{Stojina} \quad \frac{d}{t_w} = \frac{208.0}{11} = 18,9 < 25,9$$

$$\text{Pásnice} \quad \frac{\left(\frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r\right)}{t_f} = \frac{\left(\frac{300}{2} - \frac{11.0}{2} - 27\right)}{19} = 6,18 < 7,07$$

Sloup je klasifikován jako průřez třídy 1.

E.2.5.3 Výpočet únosnosti modelem LOCAF1

Na základě teploty a průřezu lze stanovit únosnost sloupu. Teplota konstrukce při požáru je 275°C, viz obrázek E.11. Redukční součinitele materiálu lze tedy získat z tabulky 3.1 v ČSN EN 1993-1-2:

$$k_{y,\theta} = 1.0 \quad (\text{E.6})$$

$$k_{E,\theta} = 0.825$$

Poloměr setrvačnosti průřezu je

$$i = 75.8 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (\text{E.7})$$

Účinná délka plamene je jen 0,7 výšky podlaží, obrázek 5.2. Štíhlost při pokojové teplotě se stanoví jako

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{93.9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}} = \frac{(0.7 \times 3.4)}{(75.8 \times 10^{-3})} \frac{1}{93.9 \sqrt{\frac{235}{275}}} = 0.361 \quad (\text{E.8})$$

Štíhlost za zvýšené teploty se stanoví jako

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0.361 \sqrt{\frac{1.0}{0.825}} = 0.398 \quad (\text{E.9})$$

Pro součinitel vzpěrnosti platí

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.60 \quad (\text{E.10})$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} (1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta) = \frac{1}{2} (1 + 0.6 \times 0.398 + 0.398) = 0.819 \quad (\text{E.11})$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0.819 + \sqrt{0.819^2 - 0.398^2}} = 0.652 \quad (\text{E.12})$$

Únosnost ve vzpěrném tlaku za požáru je

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0.652 \times \frac{14908}{1000} \times 1.0 \times \frac{275}{1.0} = 2672.3 \text{ kN} \quad (\text{E.13})$$

E.2.5.4 Porovnání únosnosti a působícího zatížení

Porovnat únosnost a působící sílu lze pomocí součinitele využití

$$\mu_e = \frac{1871}{2672} = 0.70 \quad (\text{E.14})$$

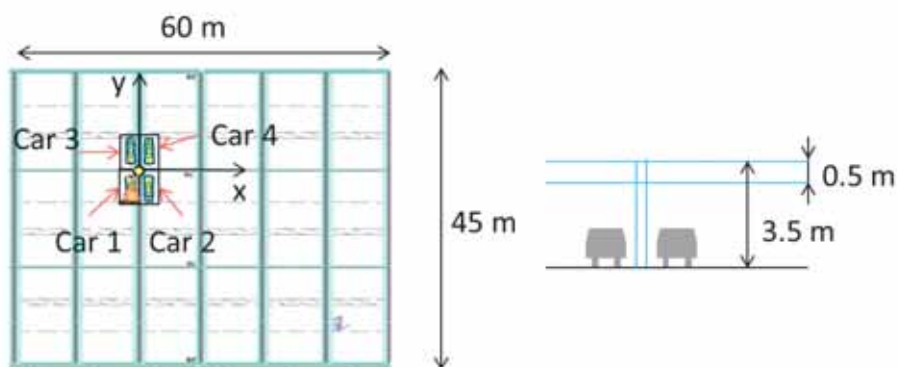
Výpočet dokládá, že sloup má pro daný požární scénář odpovídající únosnost.

E.3 Otevřená garáž

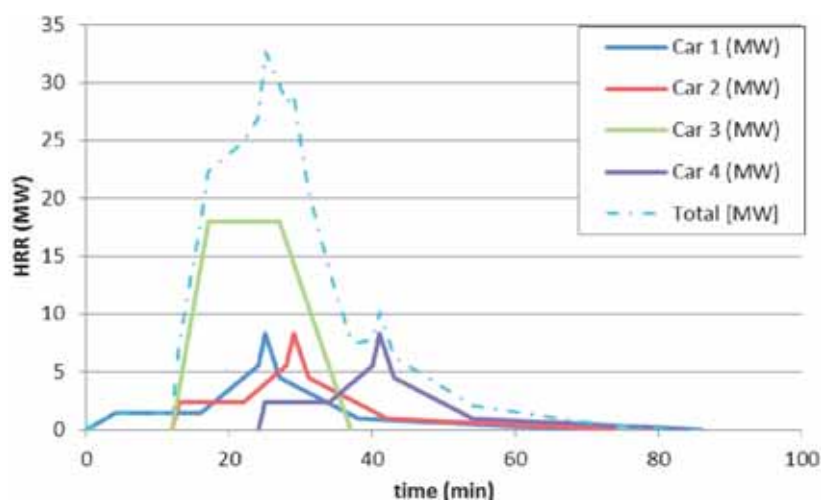
E.3.1 Požární scénář

Projekt předpokládá otevřené parkoviště s délkou 60 m, šířkou 45 m a vnitřním rozdělení na plochu 10 m × 15 m. Výška stropu je 3,5 m, viz obrázek E.15. Hlavní nosníky mají šířku 0,50 m. Sloupy parkoviště jsou HEA 300. Parkovací místa mají standardní rozměry 2,5 m × 5 m; s plochou požáru 12,5 m², čemu odpovídá průměr 4 m. Umístění nosníků ovlivňuje šíření kouře pod stropem.

Požární scénář zahrnuje 4 vozidla kolem sloupu. 3 z nich jsou velké automobily, zatímco poslední je dodávka. Tato situace je jedním ze scénářů, které uvádějí francouzské předpisy. Hodnota HRR odpovídající tomuto požáru je uvedena na obrázku E.16. U velkých vozidel byla HRR měřena během experimentů v roce 1996 v Maizières-lès-Metz, ale pro dodávku křivka pochází z analýzy rizik a je velmi závažná co se týče požáru (z hlediska požární zátěže odpovídá 1000 kg dřeva). Požár začíná u vozu 1 a po 12 min se rozšiřuje na automobily 2 a 3. Po dalších 12 min se oheň šíří na automobil 4.



Obrázek E.15 Rozměry otevřené garáže a umístění vozidel

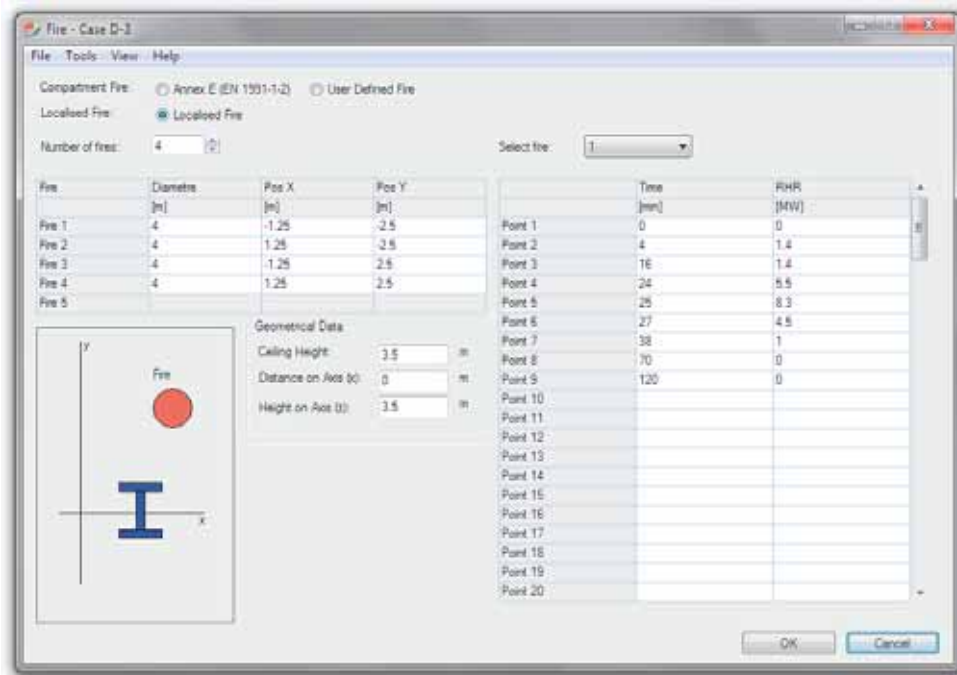


Obrázek E.16 Křivky HRR pro jednotlivá vozidla

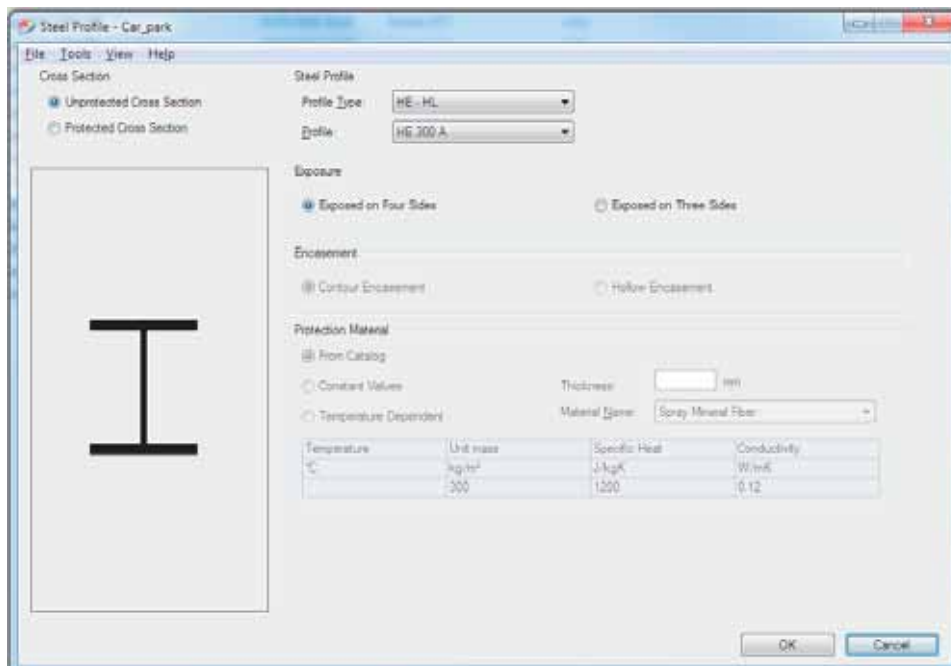
E.3.2 Vstupní data do programu OZone

Pokud jde o vstupní data, musí uživatel vstoupit do záložky "Fire" a vybrat "Localized fire". Obrázek E.17 uvádí údaje, které uživatel vyplňuje. Jsou to:

- Počet zdrojů požáru (4).
- Umístění a křivku HRR pro každý zdroj požáru.
- Výšku stropu (3.5 m).
- Výšku zóny horkých plynů (0.5 m).
- Výšku sloupu, v níž má být proveden výpočet.



Obrázek E.17 Vstupní data v tabulce "Fire"

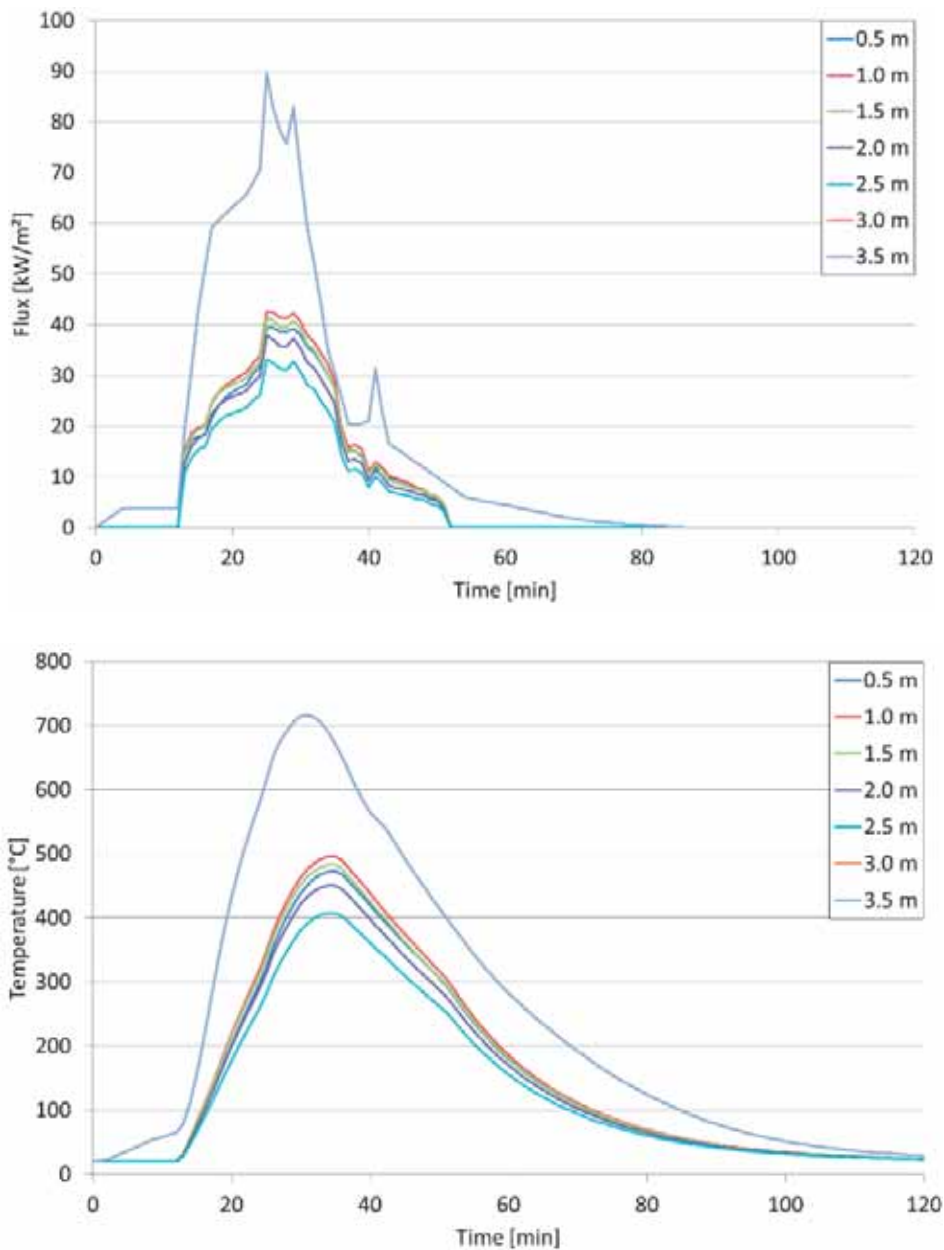


Obrázek E.18 Vstupní data v tab "Steel Profile"

Pro výpočet teploty segmentu uživatel definuje sloup v záložce "Steel Profile", viz obrázek E.18. Výpočet spustí kliknutím na tlačítko "Steel Temperature".

E.3.3 Výsledky OZone

OZone umožňuje graficky zobrazit teplotu požadovaného segmentu a výsledné soubory obsahují data jak pro teplotu, tak pro tepelný tok přijatý tímto segmentem. Obrázek E.19 ukazuje výsledky sloupu ve výšce 0,5 m. Mimo horké kouřové vrstvy činí maximální teplota 500°C při výšce 1 m, zatímco v horké vrstvě (mezi 3,0 m a 3,5 m) dosahuje 700°C.



Obrázek E.19 Tepelný tok přijatý radiací (horní graf) a průběh teploty po výšce sloupu (spodní graf)

Monografie popisuje návrh sloupu ocelové konstrukce, který je vystaven lokálnímu požáru.

V práci jsou prezentovány experimenty, numerické modely a návrhové analytické modely s uvažováním sálání plamene lokálního požáru ve tvaru kužele a v České republice osvědčený model, který vychází z představy plamene ve tvaru válce.

Text doplňují řešené příklady kancelářské patrové budovy, garáže, průmyslové haly při požáru obráběcího stroje, vysokozdvížného vozíku a provozních olejových náplní.



Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru

Francis P., Baddoo N., Hanus F., Thauvoye Ch.,
Cábová K., Lišková N., Sokol Z., Wald F.

Vydalo České vysoké učení technické v Praze
Zpracovala Fakulta stavební ČVUT

První vydání, 2018

ISBN 978-80-01-06475-7 (tištěná verze)

ISBN 978-80-01-06476-4 (online)

