



Verifikace modelů konstrukce

VI20162019034

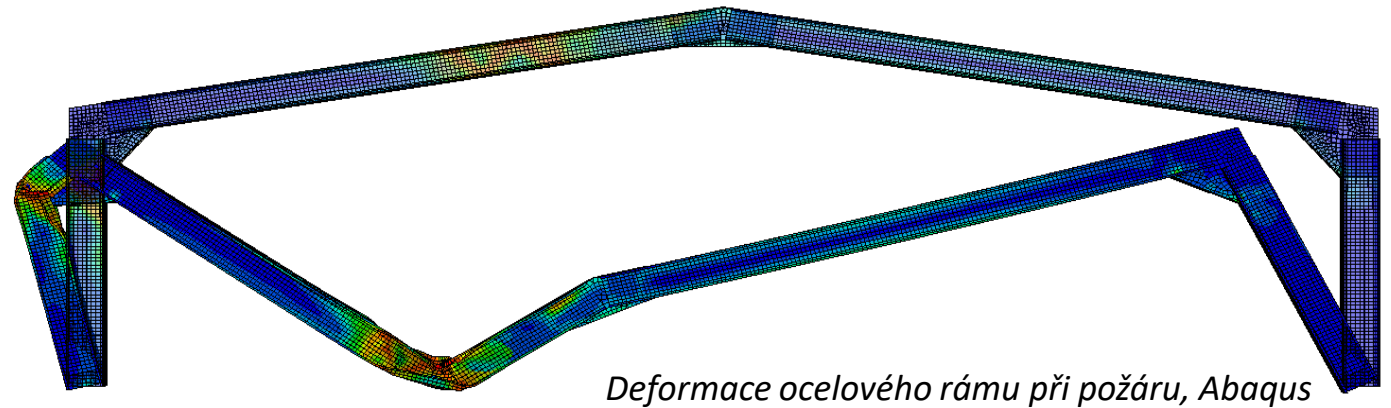
Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob
a jejich praktická aplikace
při posuzování požární bezpečnosti staveb

Kamila Cábová

Motivace

MOTIVACE

- Pokročilé modely konstrukcí jsou velmi komplexní a náročnou disciplínou.
- Uživatel může velmi snadno získat **výsledky**, které však mohou být **zatížené řádovými chybami**.



- **Chyby** jsou nejčastěji způsobené:
 - nevhodným použitím softwaru
 - neodborností uživatele
 - použití nedostatečných vstupních dat

→ nutnost ověření modelů

MOTIVACE

- Ověřování modelů konstrukcí je součástí dokumentu

Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů

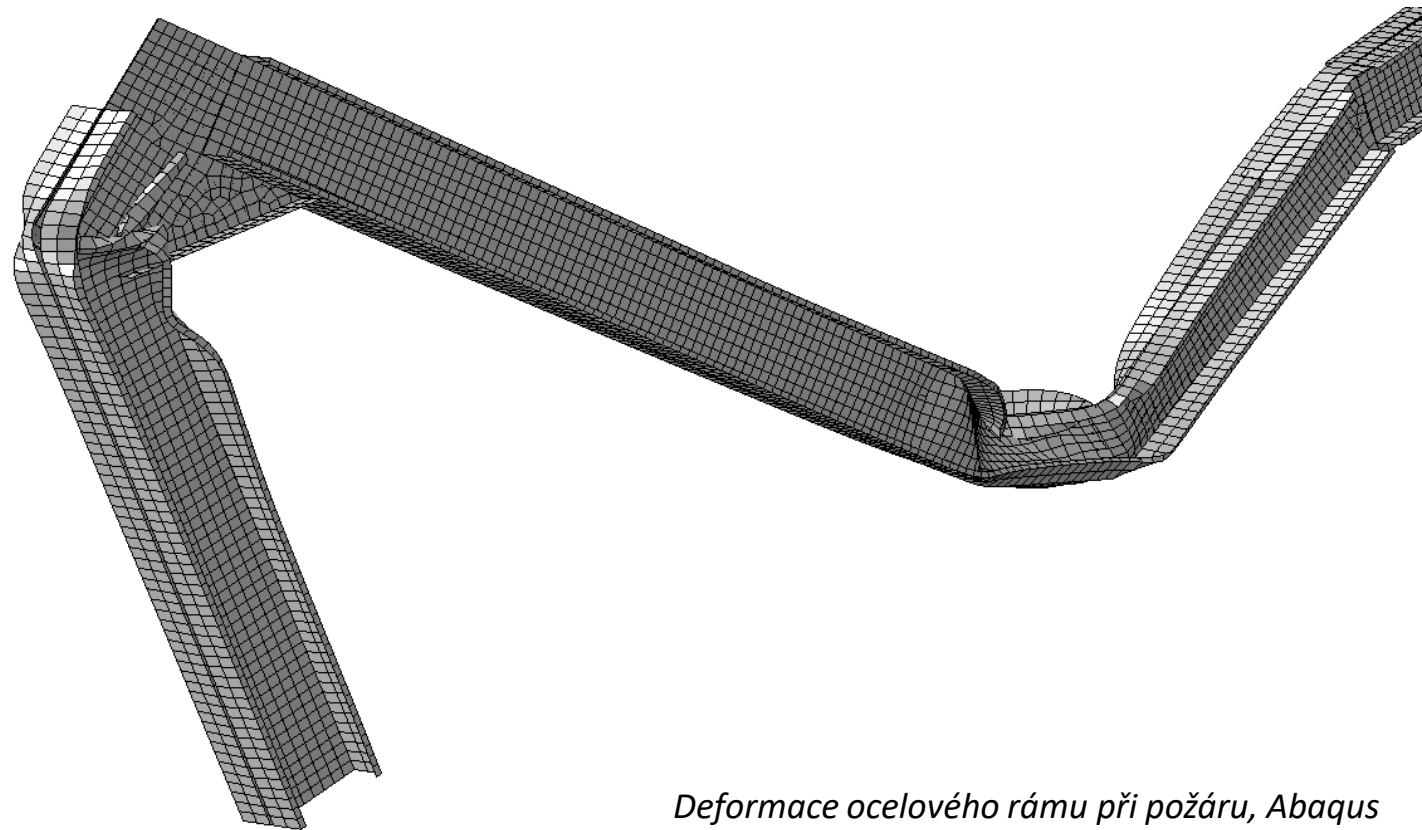
Přílohy

- **Verifikační příklady**
 - ověření správnosti řešení, vstupních dat a relevantnosti výstupů
- **Check-list**
 - rychlá kontrola správného postupu a relevantnosti vstupů a výstupů

Obsah prezentace

OBSAH PREZENTACE

- Modely konstrukcí
 - Volba modelu
 - Vstupní data modelu
- Verifikace modelů
 - Verifikační příklady
 - Check-list



Deformace ocelového rámu při požáru, Abaqus

Modely konstrukcí

MODELY KONSTRUKCÍ

Zjednodušené

- Analytické řešení (vzorce)
 - Výpočet přestupu tepla přírůstkovou metodou
 - Hodnocení požární odolnosti pomocí kritické teploty, zavedením redukčních součinitelů materiálů a redukce mech. zatížení
 - Hodnocení pomocí tabulek

$$M_{\max} \leq R_d$$
$$\frac{qL^2}{8} \leq W_{pl} f_y$$

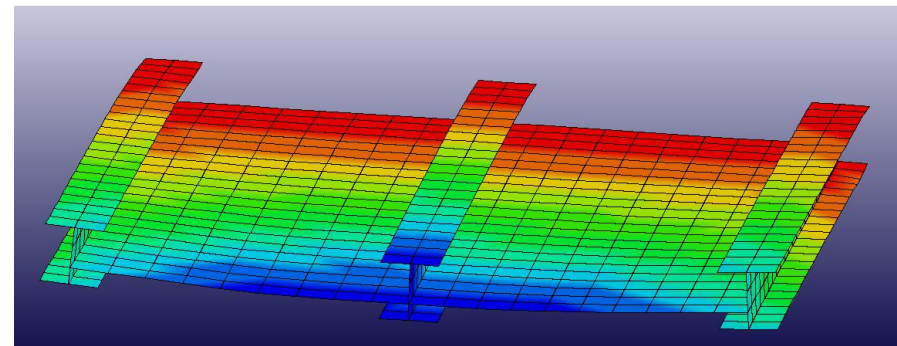
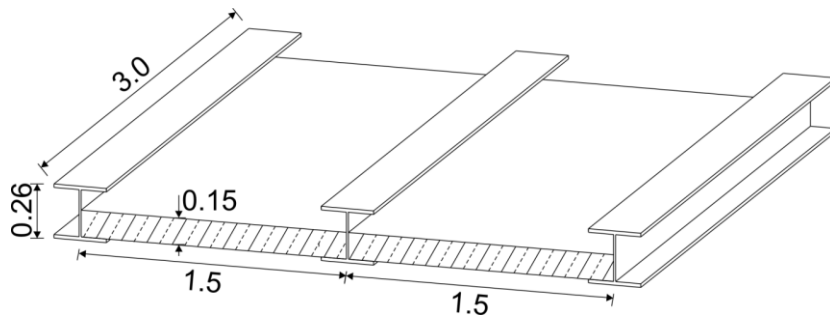
Pokročilé

- Matematické řešení parc. diferenc. rovnic
- Využití softwarových nástrojů
- Modely založené na MKP
 - Výpočet přestupu tepla
 - Posouzení mechanického chování konstrukcí

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

POKROČILÉ MODELY KONSTRUKCÍ

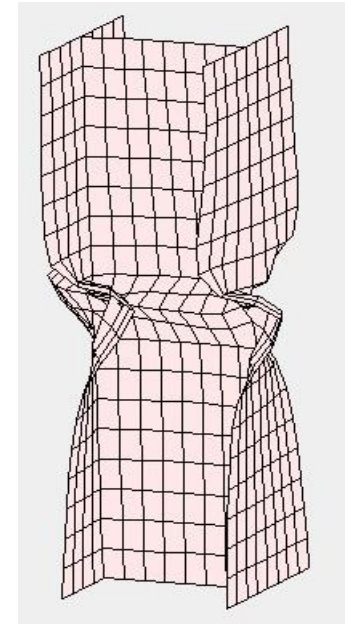
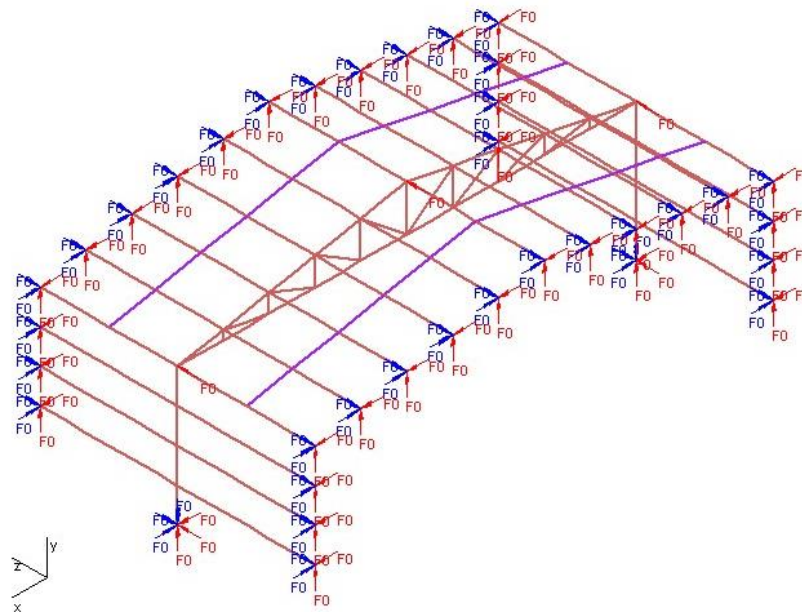
- Potřeba výpočetní techniky a softwarových nástrojů
- Požadavky na numerické modely
 - Geometrická reprezentace vzorku
 - Teplotní okrajové podmínky
 - Materiálové vlastnosti závislé na teplotě
 - Mechanické okrajové podmínky (způsob uložení)
 - Mechanické zatížení



POKROČILÉ MODELY KONSTRUKCÍ

Možnosti modelování

- Analýza prvků, části konstrukce nebo celé konstrukce
- Mechanická analýza, teplotní analýza či sdružené modely mechanicko-teplotní
- Komerční softwary či vědecky orientované specializované programy
- Lineární/nelineární výpočet (typ prvků/mat. vlast.)
- Statická/dynamická analýza



Volba modelu

Volba modelu

- Jeden z nejdůležitějších bodů procesu
- Neexistuje jednotný návod!
- **Obvykle kompromis mezi očekávaným výstupem a možnostmi modelu, dostupností vstupních dat a schopnostmi uživatele**
- **Zodpovídá zpracovatel**
- **Volit co nejjednodušší model, který dokáže daný problém řešit**
- Musí být jasně definován cíl výpočtu a kritéria přijatelnosti, podle kterých se bude rozhodovat, zda je navržené a posuzované řešení vhodné či ne
- **V dokumentaci zdůvodnit výběr modelu**

Volba MKP modelu

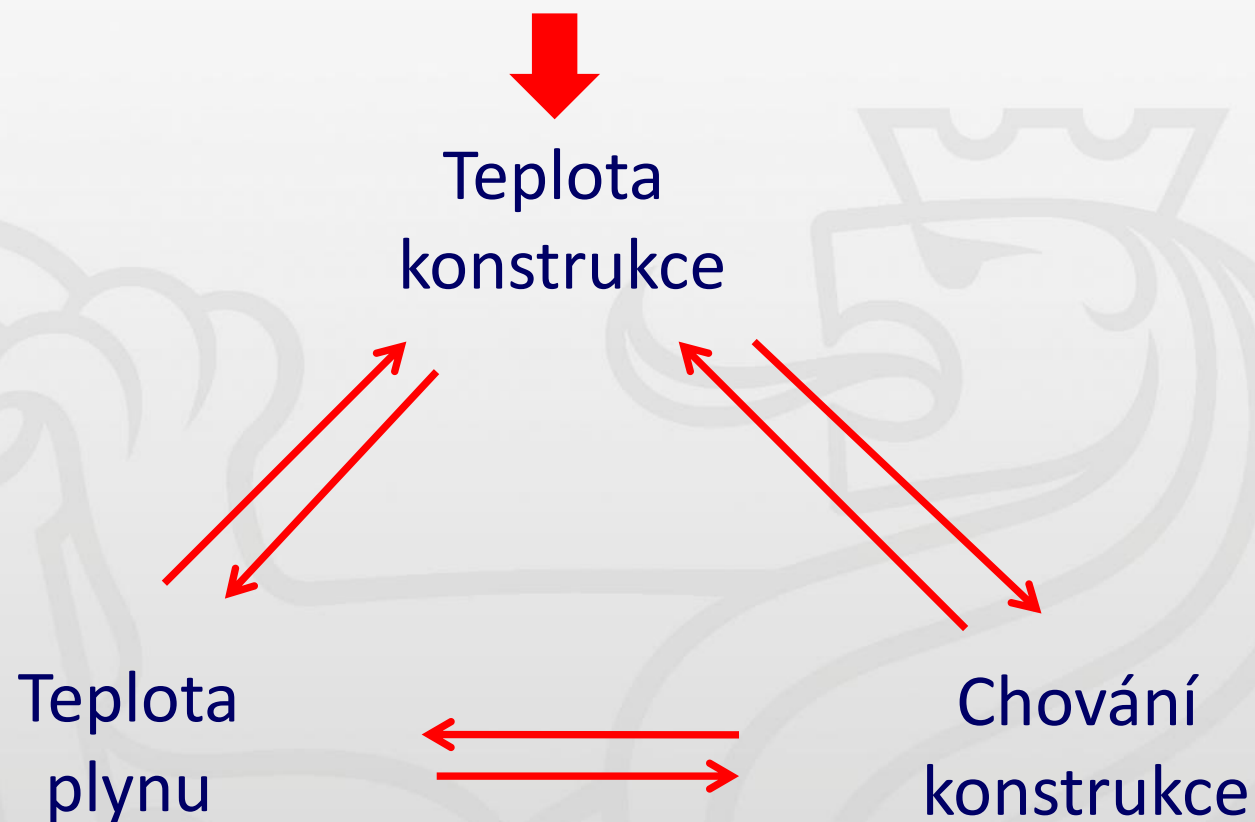
- Modely různých stupňů sofistikovanosti
- Musí zohledňovat očekávané chování konstrukce – typy analýz:
 - Lineární/nelineární
 - Možnost vlastního materiálového modelu
 - Imperfekce, atd.

Volba velikosti řešené konstrukce – vystihuje analýza očekávané chování?

- Analýza prvku
- Části konstrukce
- Celé konstrukce

Volba MKP modelu

Souvislost s výpočtem teploty plynu a přestupu tepla do konstrukce!



Volba MKP modelu

Souvislost s výpočtem teploty plynu a přestupu tepla do konstrukce

– vybrat odpovídající úroveň modelů

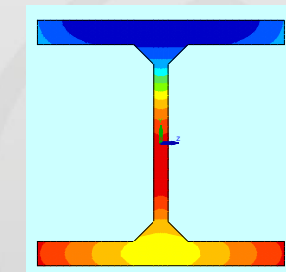
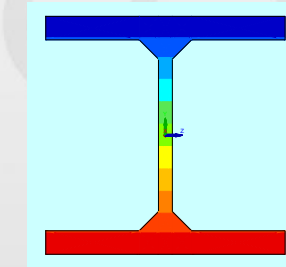
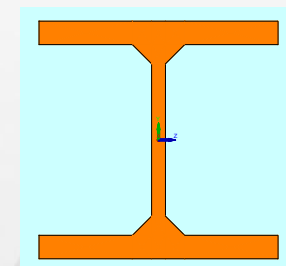
Teplota v požárním úseku

- Normová teplotní křivka
- Parametrické křivky
- Zónové modely
- CFD modely



Teplota konstrukce

- Rovnoměrně
- Lineární rozdělení
- Nerovnoměrně



Vstupní data

Vstupní data

- Další neméně důležitý bod modelování
- **Relevantnost a úplnost dat udává přesnost výsledků**
- Požadavek různých dat pro různé soft. nástroje
- Obecně platí – pro jednodušší model postačí jednodušší vstupní data
- **Zodpovídá zpracovatel**
- Závisí na zvolených požárních scénářích
- Musí být jasně definován cíl výpočtu!
- **V dokumentaci** podrobný popis vstupních dat

Výpis vstupních dat do MKP modelu

- jméno a verze vybraného programu MKP
- nastavení výpočtu (velikost zatěžovacího kroku)
- geometrický model a numerická síť (geometrie, typ prvku, výpočetní síť, excentricity atd.)
- materiálový model:
 - mechanické vlastnosti (lineární nebo nelineární, vlastnosti),
 - tepelně technické vlastnosti (konstantní, proměnné s teplotou),
- podepření (okrajové podmínky, předepsané posunutí)
- zatížení (mechanické zatížení s jejich kombinacemi, teplotní zatížení)
- imperfekce (geometrické, zbytková napětí)

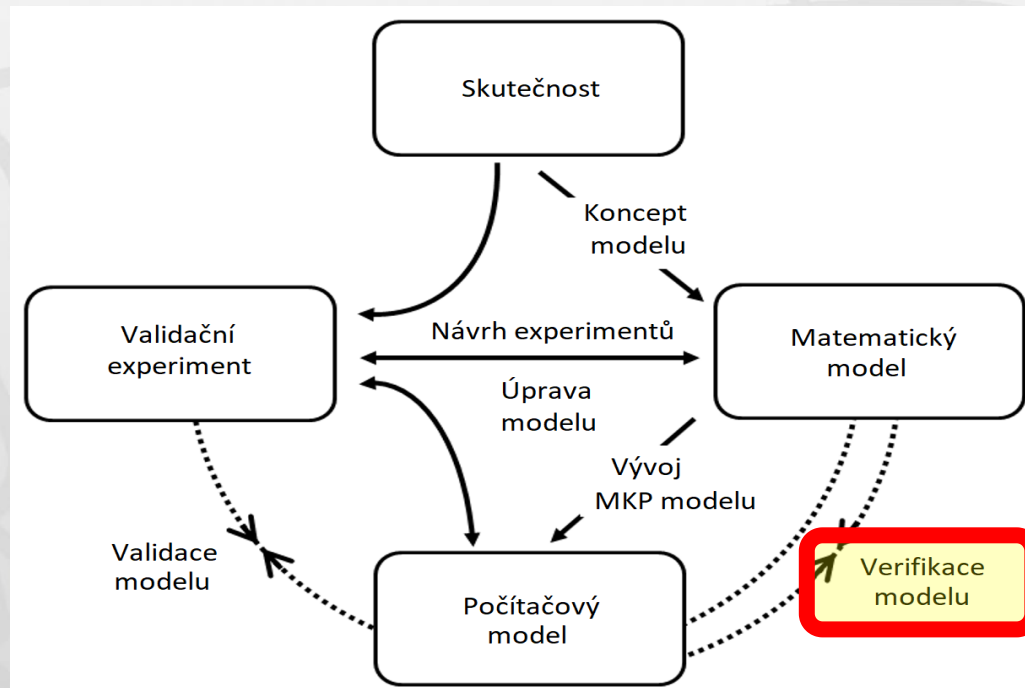
Výpis vstupních dat do MKP modelu

- typ analýzy
- kritéria selhání
- okrajové podmínky jako např. počáteční teplota, vlhkost
- charakteristika požadovaných výstupů (teplota konstrukce, vnitřní síly, rozložení napětí, posunutí, deformované tvary, mezní zatížení, vlastní čísla, vlastní tvary, atd.)
- kritéria mezního stavu, která mají být kontrolována (základy statické kontroly)
- a další nutné vstupy požadované konkrétním softwarovým nástrojem

Verifikace modelů

Verifikace

- Srovnání výpočetních řešení s přesnými referenčními řešeními (analytickými nebo numerickými)
- Využití **verifikačních/ověřovacích příkladů** (Benchmark case)
- Většinou obsahuje **studii citlivosti sítě** prokazující asymptotickou konvergenci výsledků



Kwasniewski, L. (2009). *On practical problems with verification and validation of computational models*, Archives of Civil Engineering, vol. IV, no. 3, pp. 323-346.

Verifikační příklady

Verifikační příklad

Benchmark study

- zpravidla jednoduchý, neodpovídá řešení celého objektu
- jedná se o ověření určitého jevu
- obsahuje
 - podrobný textový popis příkladu
 - vstupní data
 - výsledky
- přichystán tak, aby jej bylo možné reprodukovat



Verifikační příklady

V metodice:

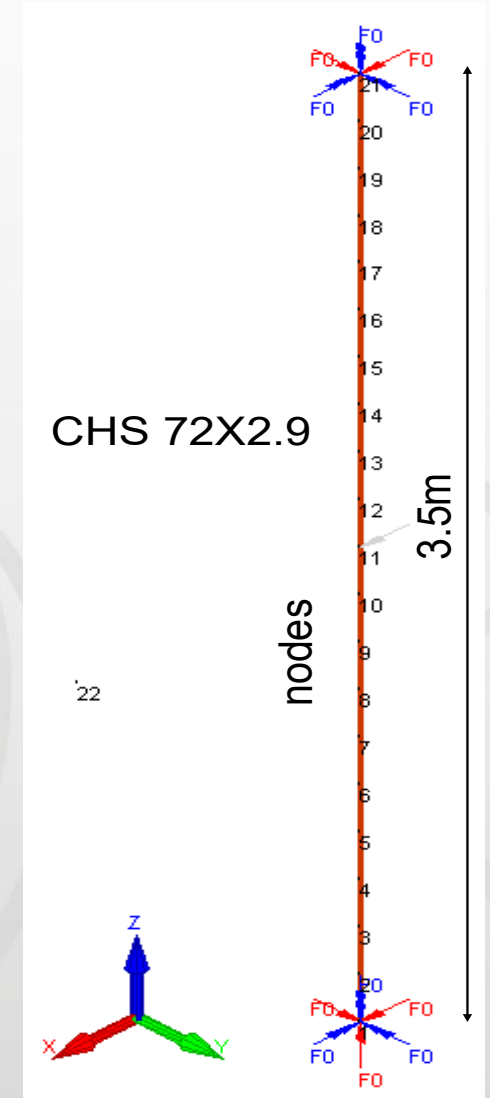
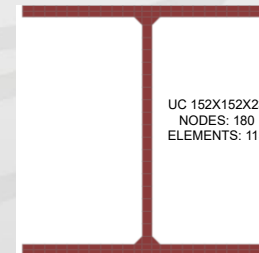
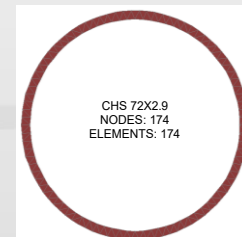
- Rozvoj teploty v dřevěném prvku
- Ocelobetonová stropní deska při požáru

V monografii:

- Ocelový nosník při požáru
- Ocelový sloup při požáru
- Rozvoj teploty v dřevěném prvku
- Ocelobetonová stropní deska při požáru
- Dřevobetonová stropní deska při požáru
- Ocelový nosník s průřezem 4. třídy při požáru
- Ocelový rám při požáru

Sloup vystavený účinkům požáru

- Ocelový uzavřený kruhový a otevřený I průřez
- $L = 3,5$ m, vetknutý v patě, volný posun ve vrcholu
- Ocel S275 (ČSN EN 1993-1-2)
- MKP software VULCAN a SAFIR
- V SAFIRu statický i dynamický model
- Zatěž. krok 60 s (stat.) / 10 s (dyn.)



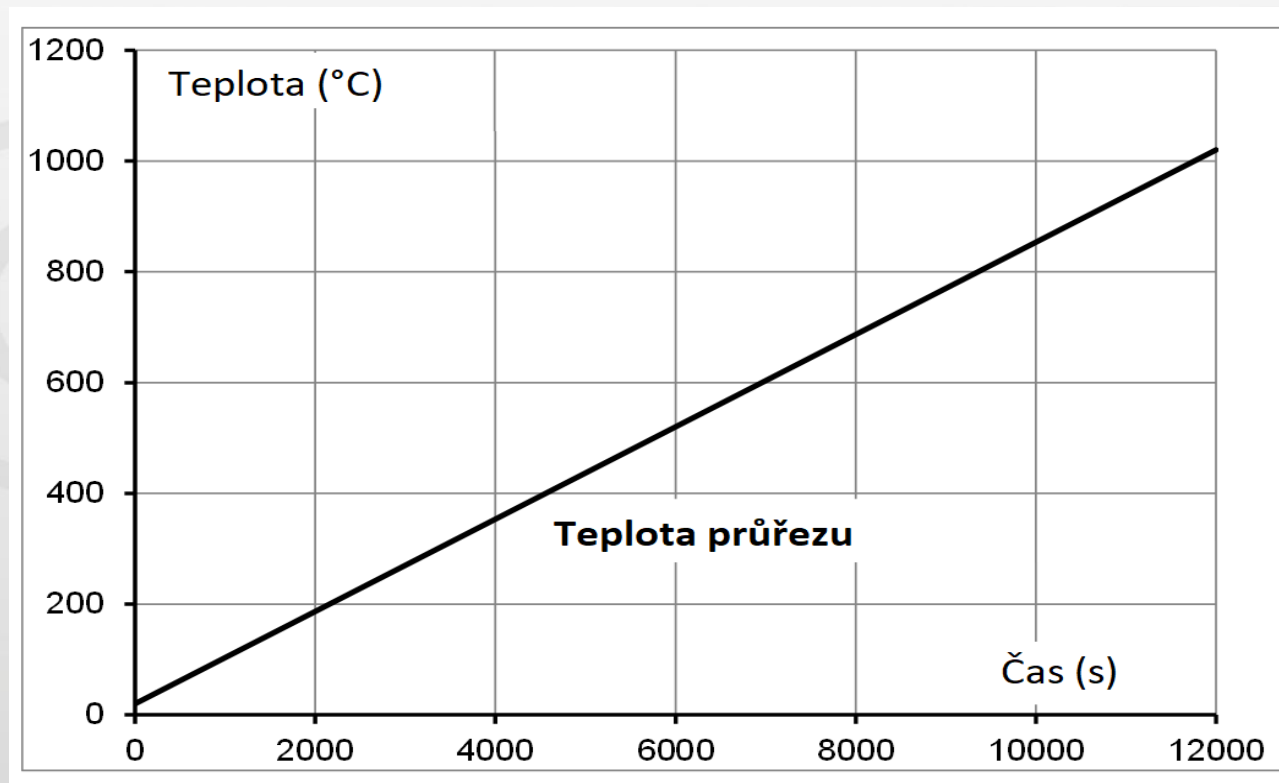
Sloup vystavený účinkům požáru

- **Zatížení**
 - Mechanické – ve vrcholu a středu rozpětí

ZATÍŽENÍ			
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 1	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 1	11	1436	x
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 2	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 2	11	40163	x
Bodové zatížení sloupu 2	11	12852	y

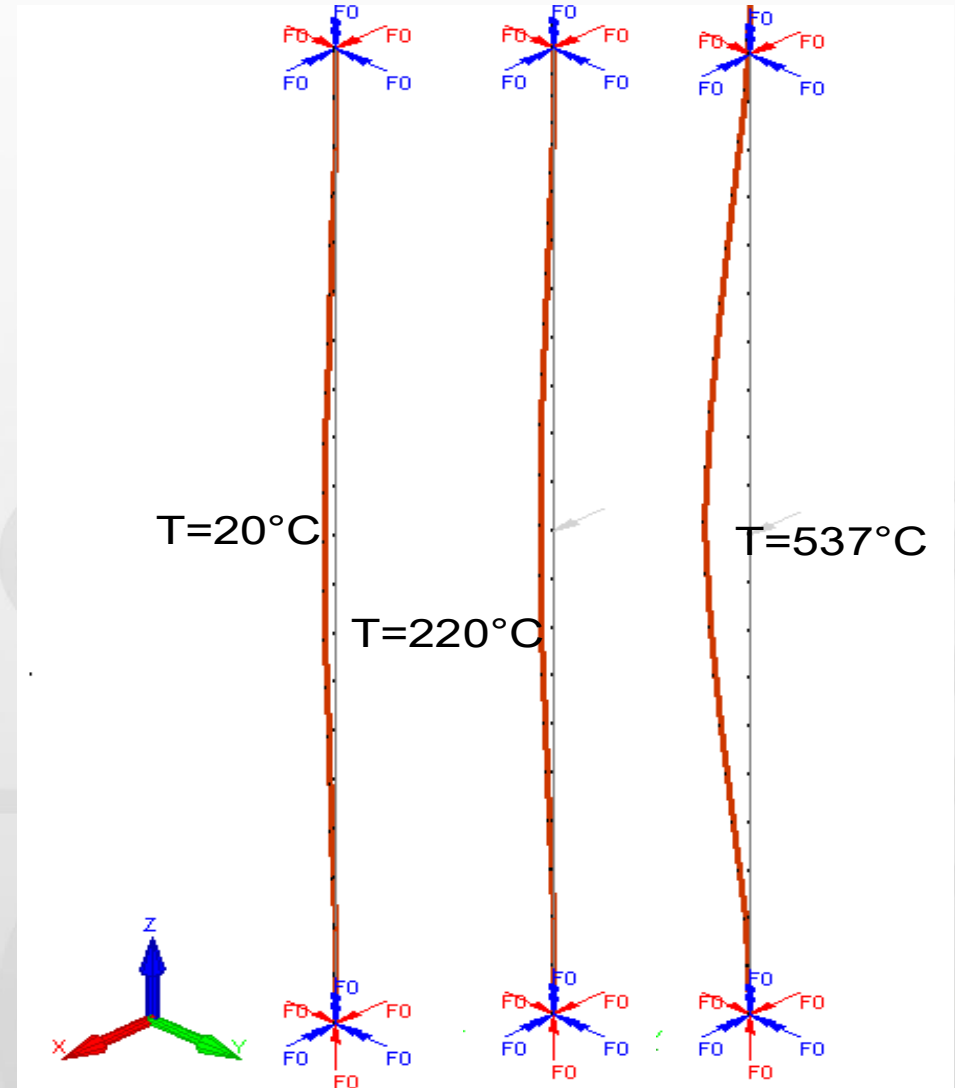
Sloup vystavený účinkům požáru

- **Zatížení**
 - Mechanické – ve vrcholu a středu rozpětí
 - Teplotní - rovnoměrný ohřev po průřezu, lineární vzestup teploty



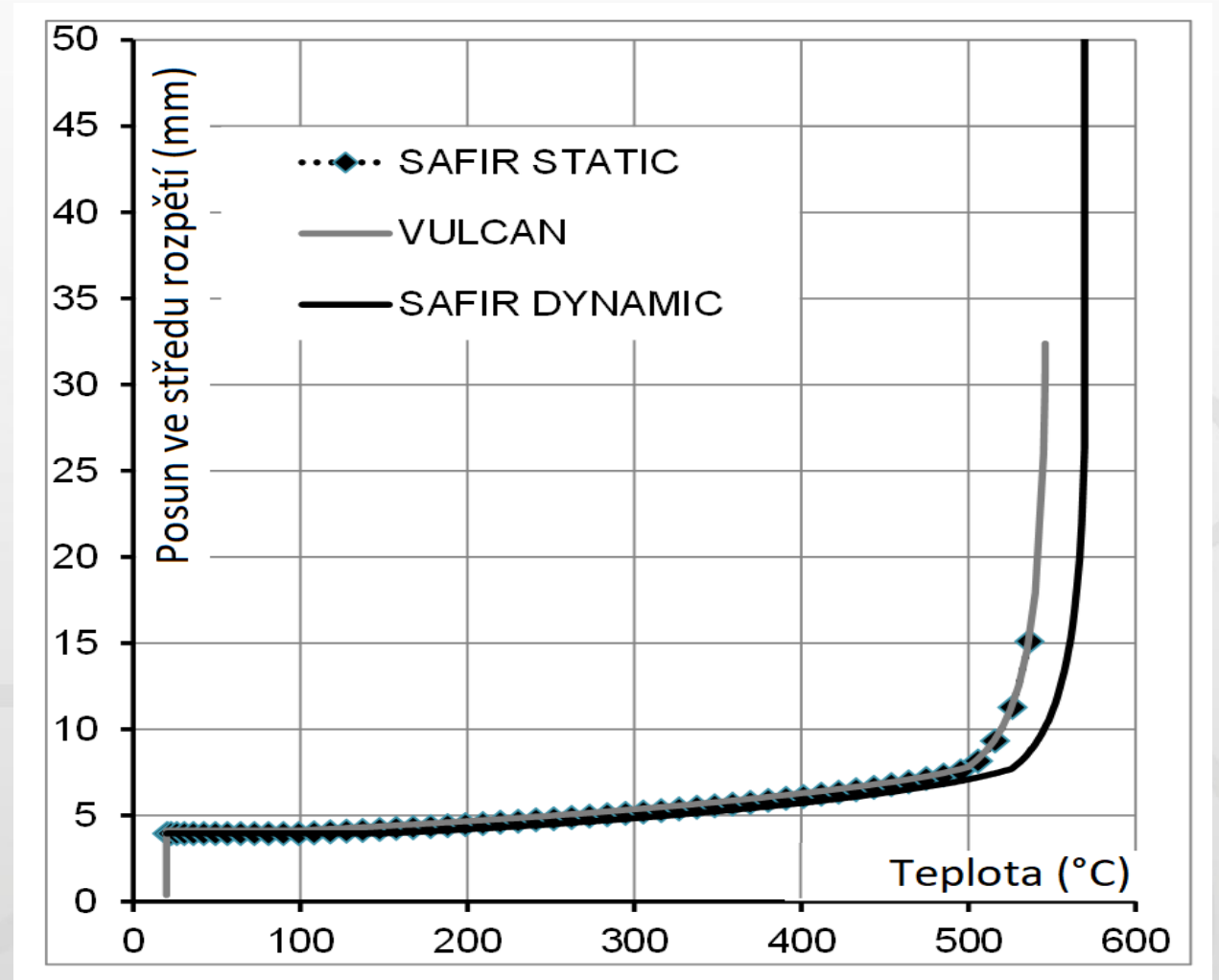
Sloup vystavený účinkům požáru

- **Výsledky**
 - Deformovaný tvar sloupu 1



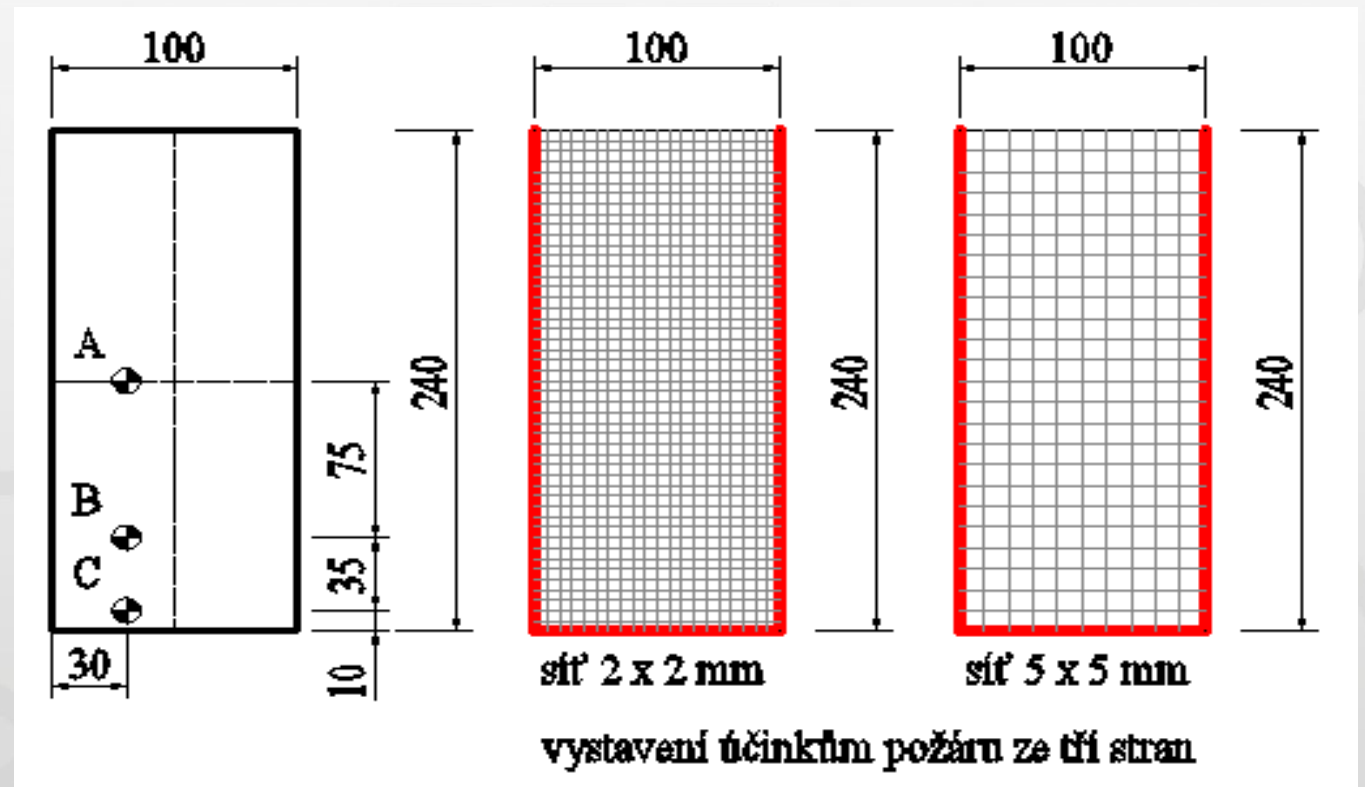
Sloup vystavený účinkům požáru

- **Výsledky**
 - Posun ve středu rozpětí



Rozvoj teploty v dřevěném prvku

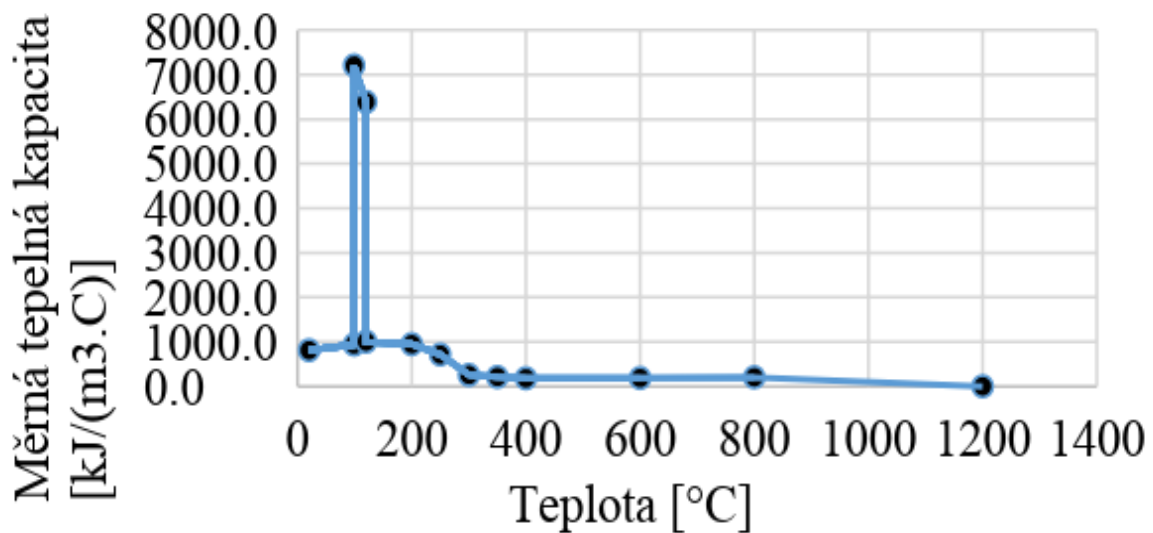
- Účinek normové teplotní křivky
- MKP software Atena Science verze V.513
- PTCH teplotně závislé
- Vliv velikosti sítě



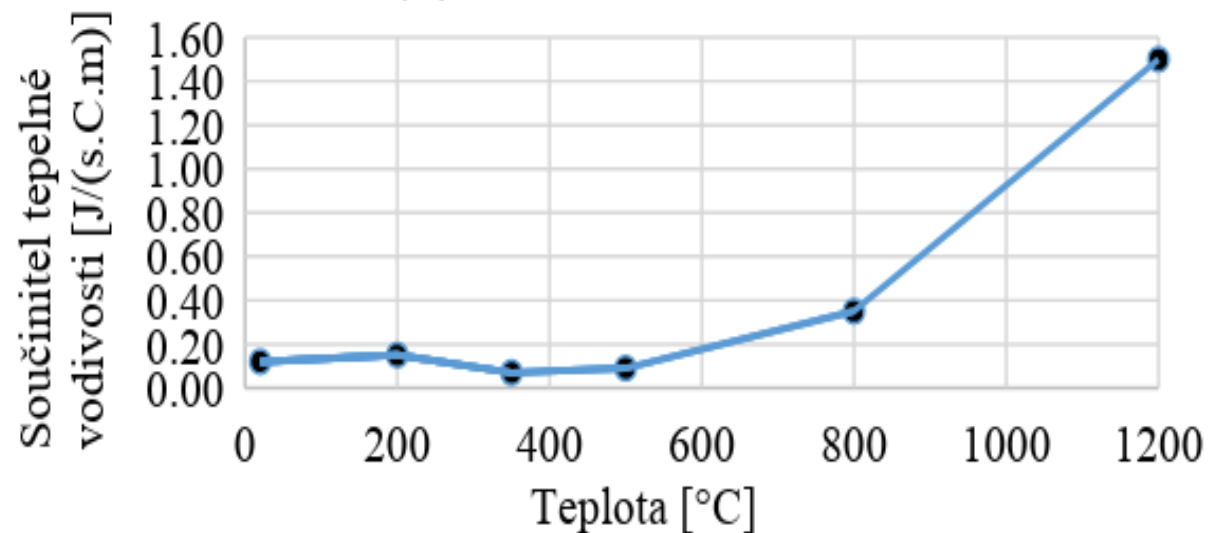
Rozvoj teploty v dřevěném prvku

- PTCH teplotně závislé

$c(T, \rho, w)$ - numerická simulace

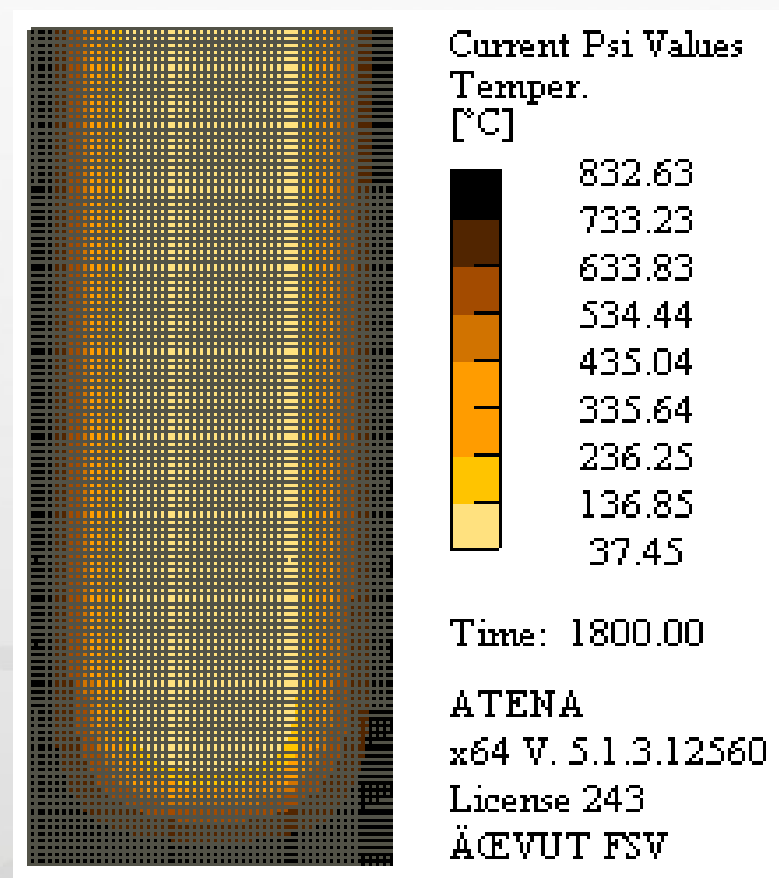
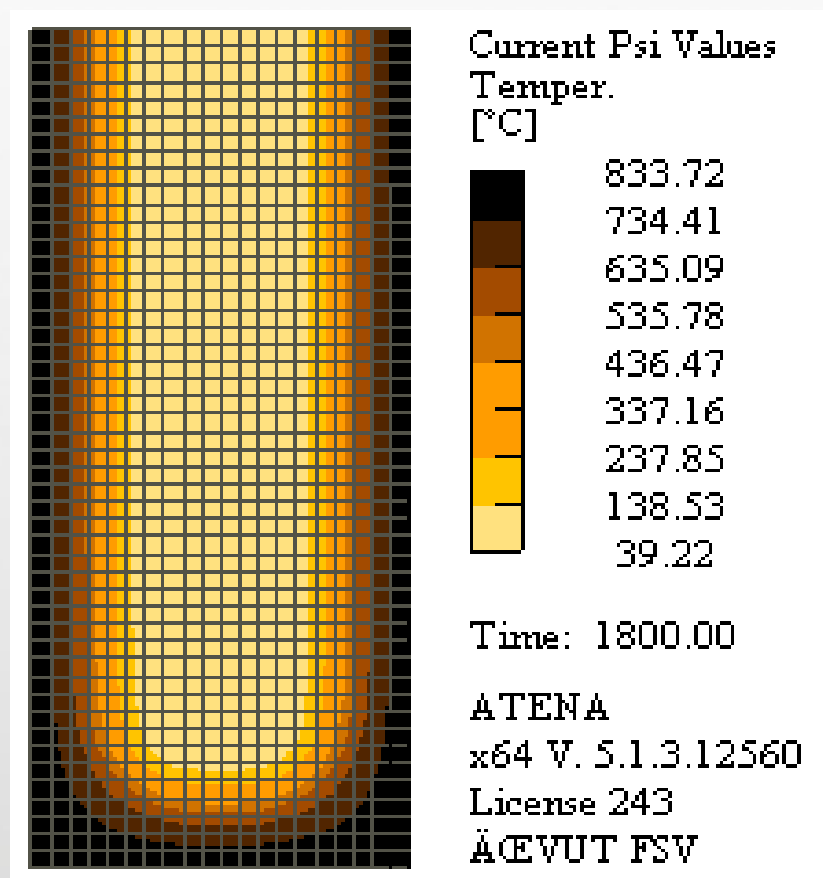


$\lambda(T)$ - numerická simulace



Rozvoj teploty v dřevěném prvku

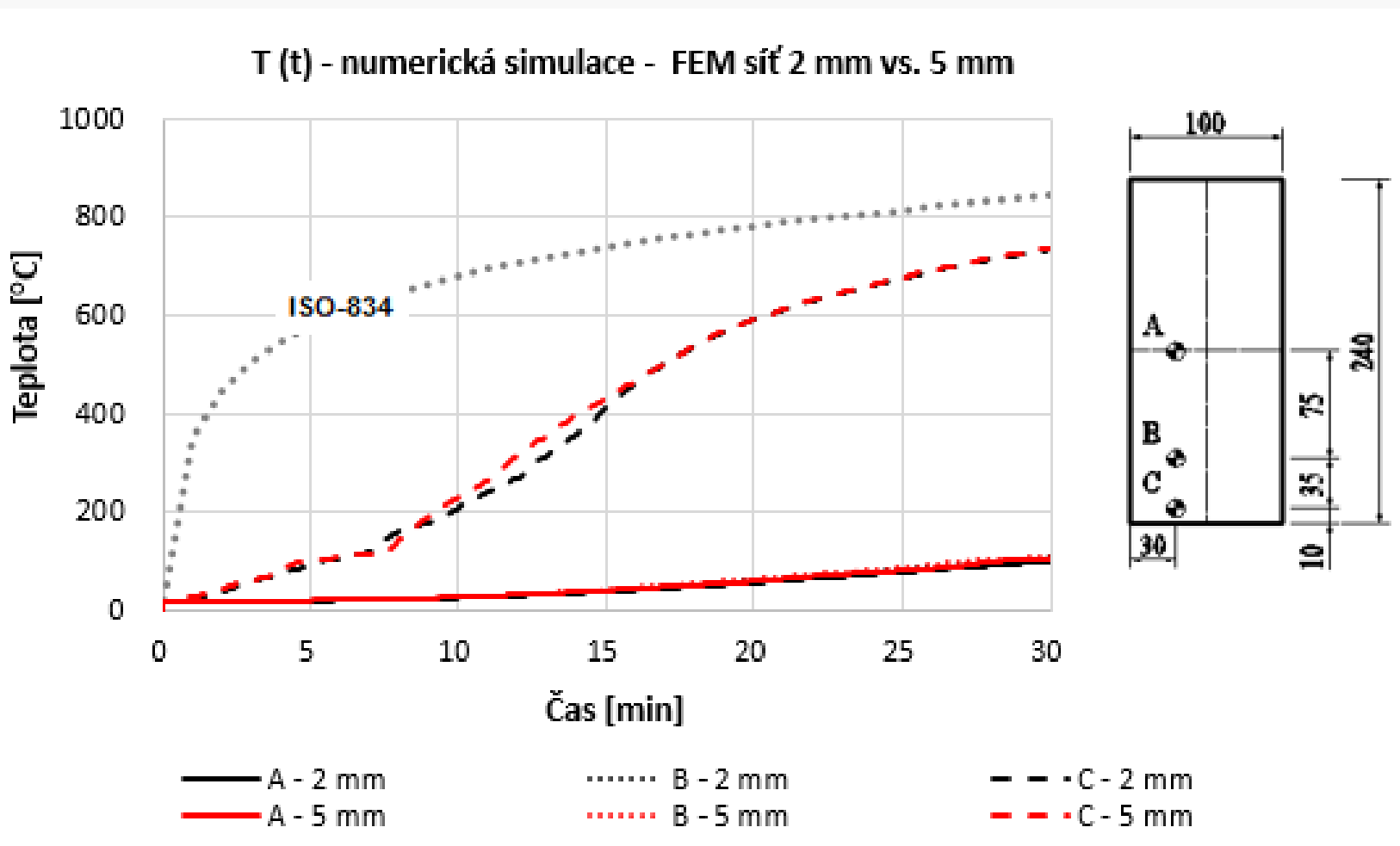
- Výsledky



Teplotní pole – 5 mm síť (vlevo), 2 mm síť (vpravo)

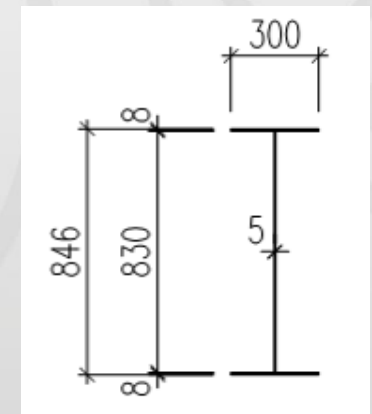
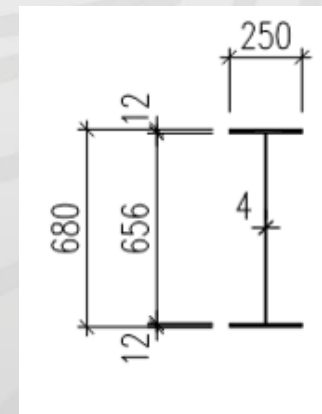
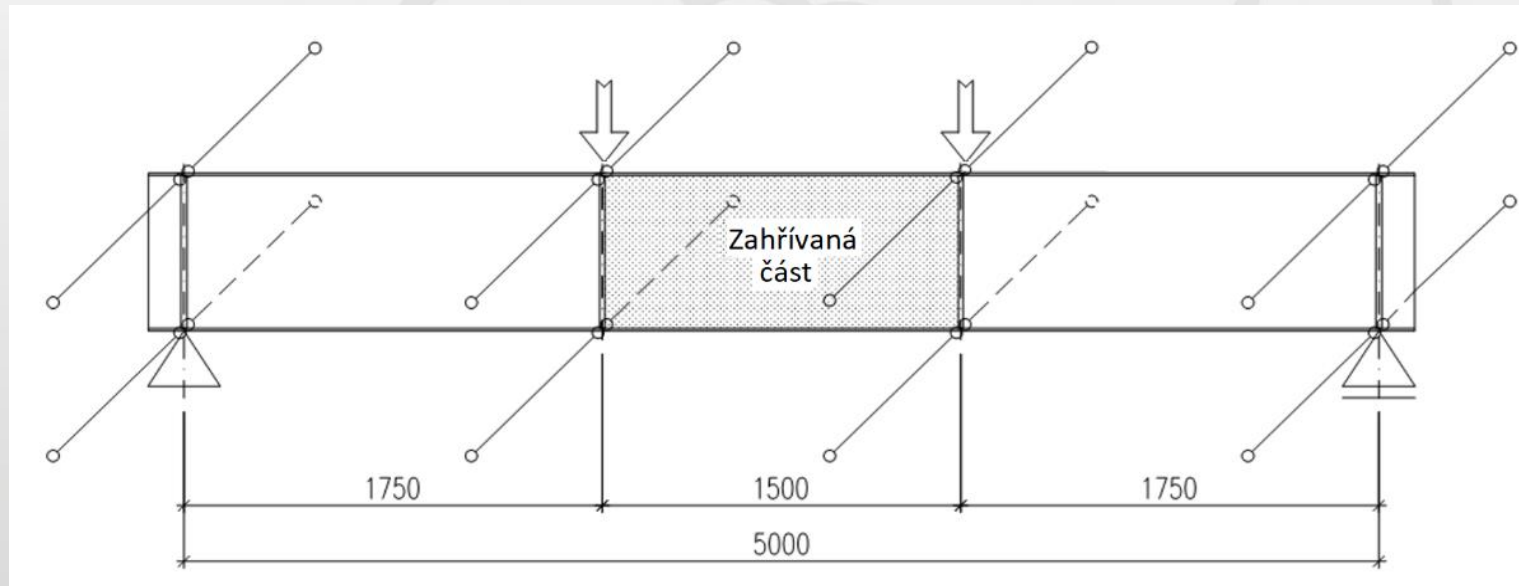
Rozvoj teploty v dřevěném prvku

- Výsledky



Ocelový nosník průřezu 4. třídy

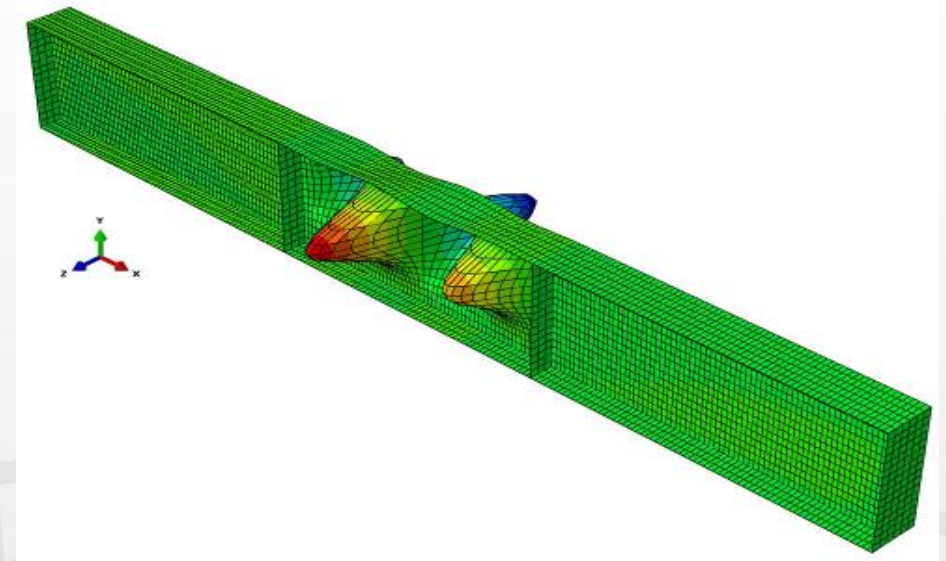
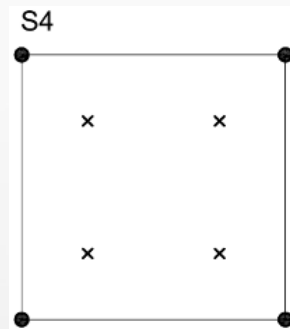
- Prostě uložený nosník $L = 5 \text{ m}$, zatížen 2 silami
- Zabráněno ztrátě příčné stability
- Zahříváno konstantní teplotou 450°C a 600°C
- Soft. Abaqus



Ocelový nosník průřezu 4. třídy

- Výpočetní síť

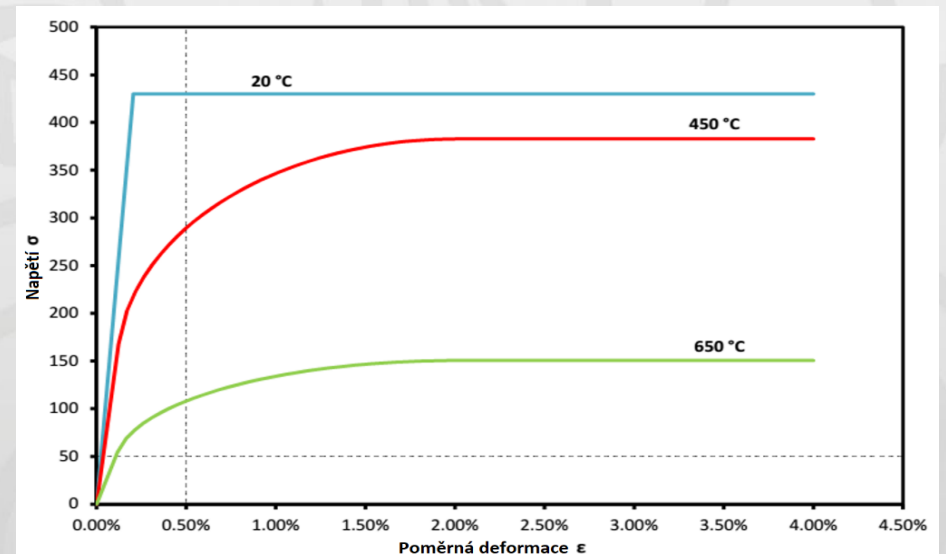
- deskostěnový prvek S4
- 16 prvků ve stojně
- 6 prvků v pásnici



- Imperfekce

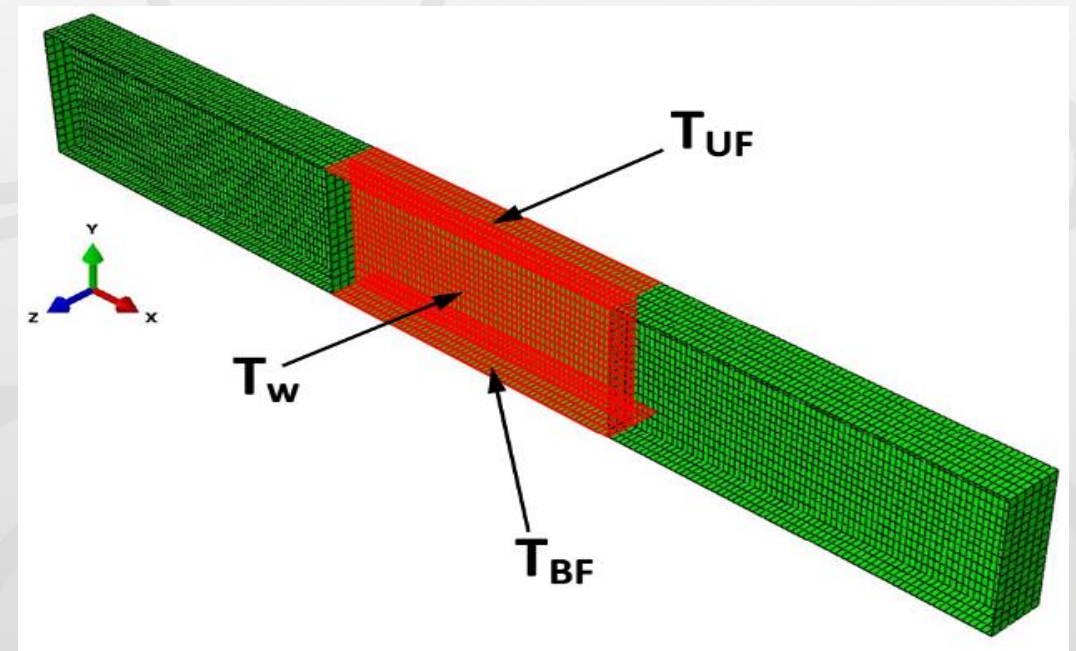
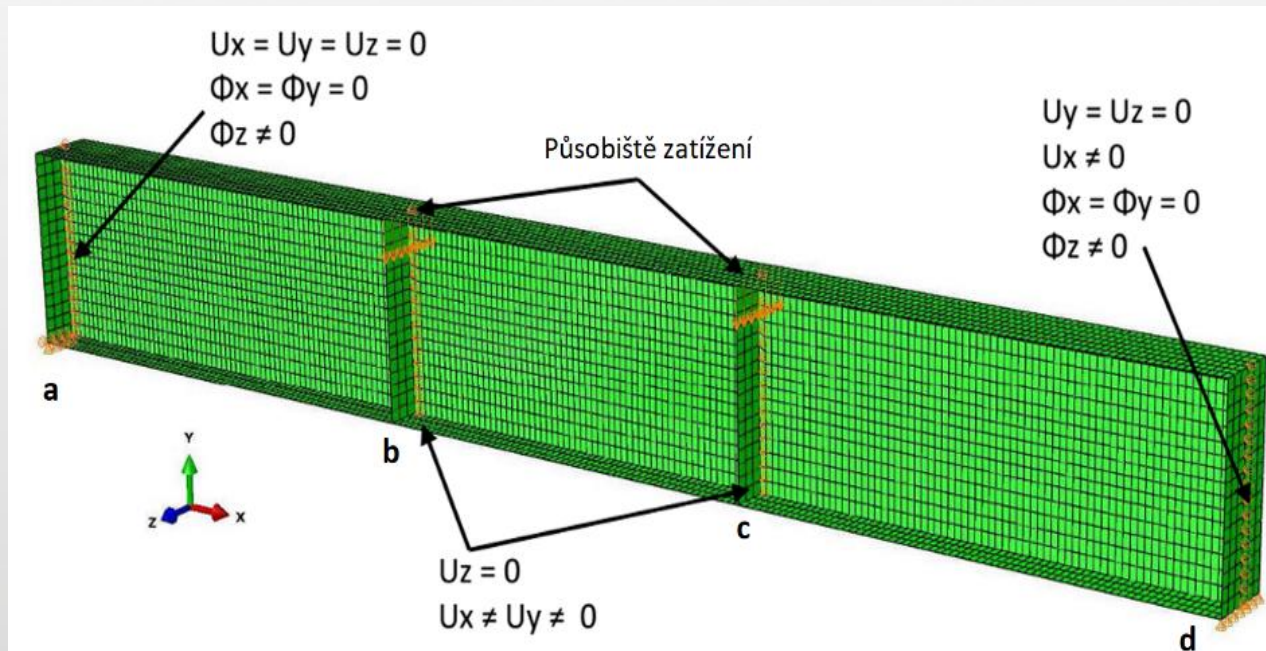
- první vlastní tvar (geometricky)
- velikost dle ČSN EN 1993-1-5 (1/100 a 1/200)

- Materiálový model – S355 dle ČSN EN 1993-1-2



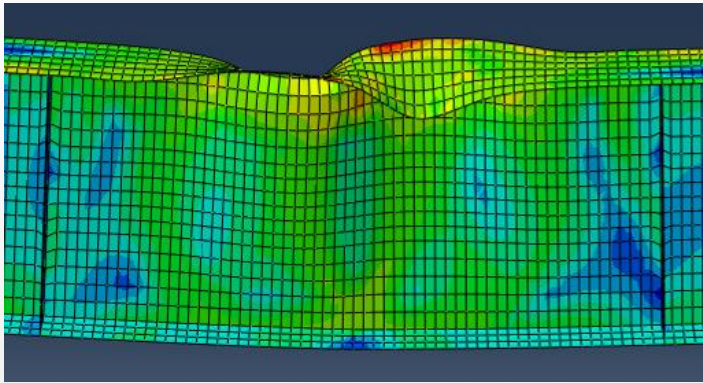
Ocelový nosník průřezu 4. třídy

- Okrajové podmínky
 - uložení, mechanické zatížení
 - zatížení teplotou

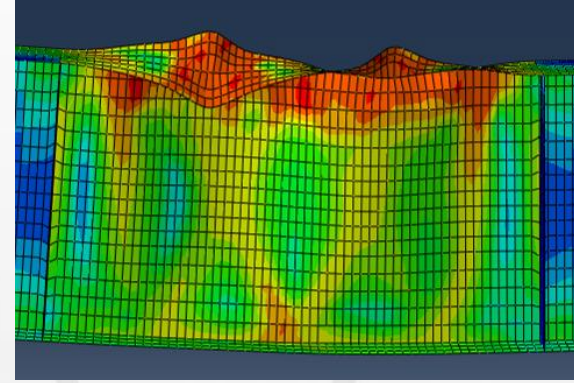


Ocelový nosník průřezu 4. třídy

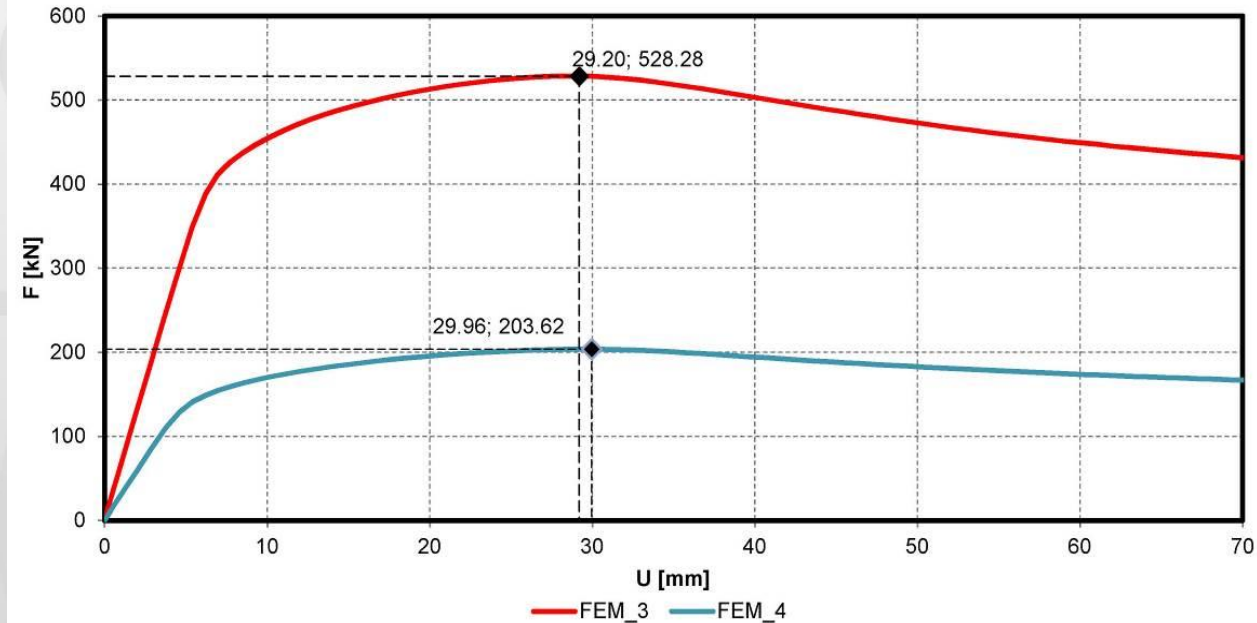
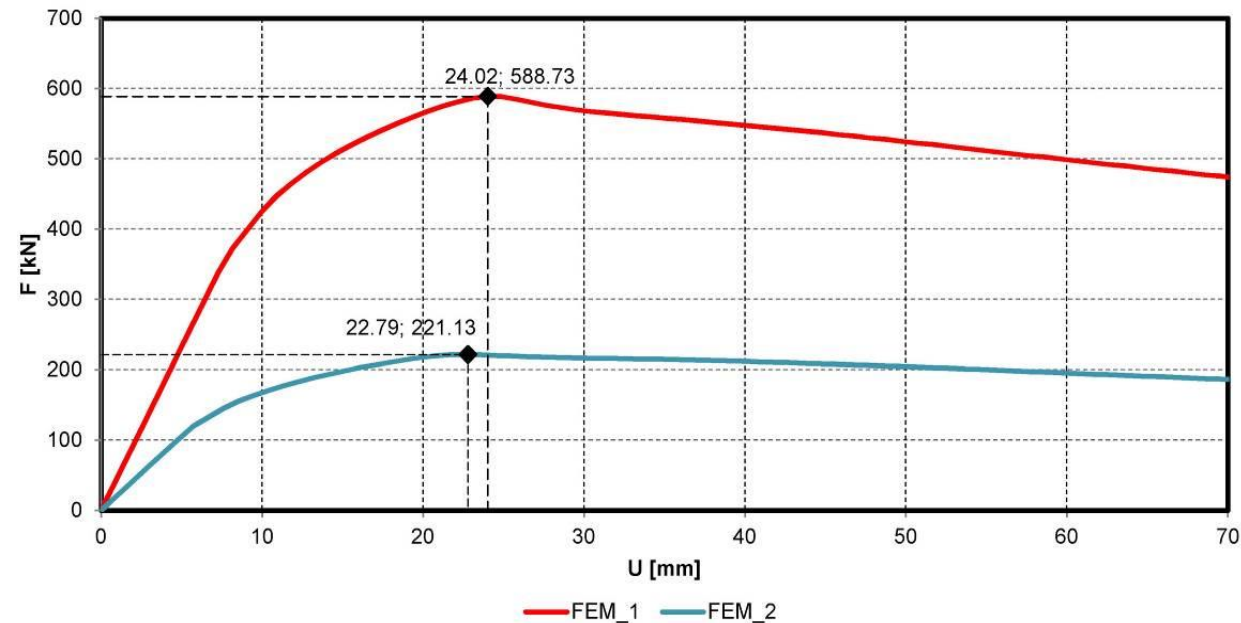
○ Výsledky



Simulace 1,2



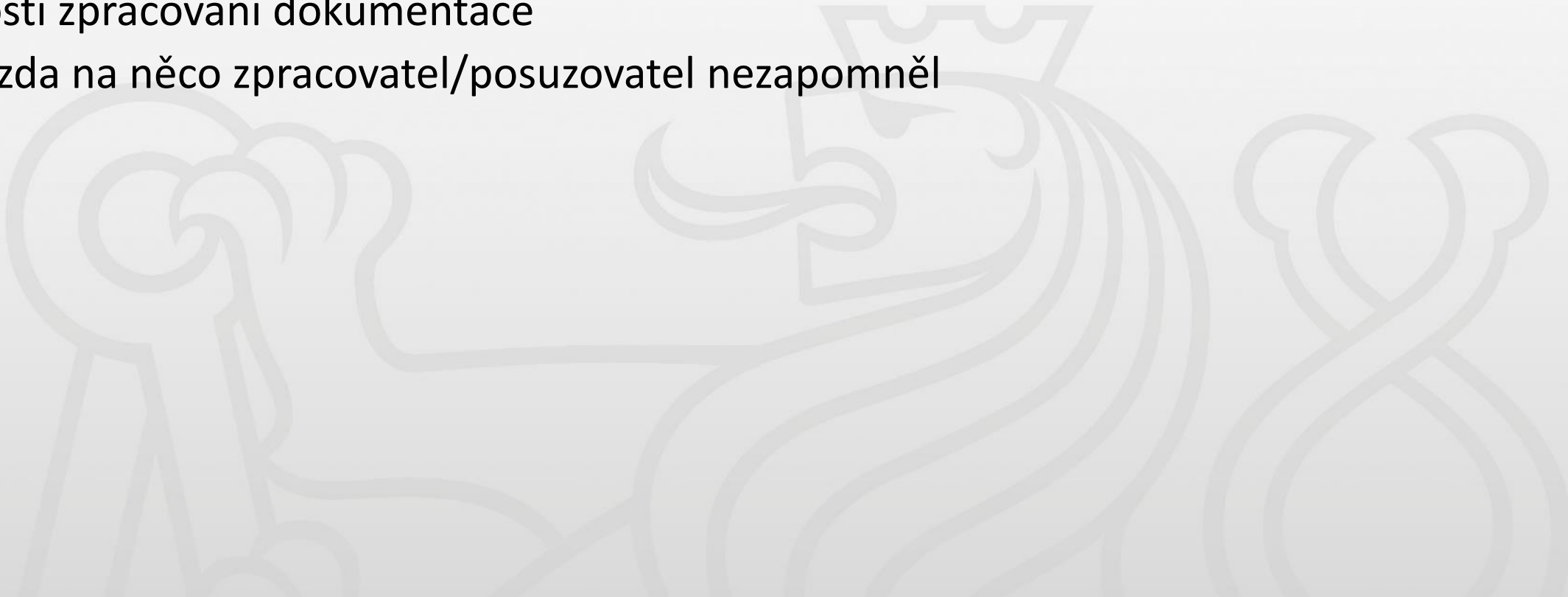
Simulace 3,4



Check-list

Check-list

- Kontrola
 - správnosti postupu
 - relevantnosti vstupů a výstupů
 - správnosti zpracování dokumentace
- Ověření, zda na něco zpracovatel/posuzovatel nezapomněl



Ukázka check-listu

Zvolená metoda a výběr nástroje:

- Jaká je zvolená metoda výpočtu (výpočet teploty okolí, přestupu tepla a mechanického chování konstrukce) a proč je vybrán konkrétní softwarový nástroj?
- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Odpovídá vybraný model konstrukce úrovni ostatních částí posouzení (modelu teplotního účinku)?
- Je vybraný výpočetní program vhodný pro řešený problém? Je softwarový nástroj na danou oblast validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého softwaru?

Ukázka check-listu

Numerický model:

Předpoklady modelu:

- Jsou uvedeny veškeré předpoklady modelu?
- Je vybraný statický model vhodný?
- Vystihuje zvolená velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) očekávané chování konstrukce?
- Zohledňuje vybraný typ analýzy očekávané chování konstrukce (lineární, nelineární)?

Geometrie:

- Je správně zadána geometrie konstrukce?
- Jsou zadány veškeré průřezy konstrukcí?
- Jsou zadány veškeré materiály?
- Je materiálový model dostatečný pro zvolený typ analýzy (popis mechanických i tepelně technických vlastností)?
- Jsou zavedeny imperfekce konstrukce?
- Je konstrukce správně podepřena?

Ukázka check-listu

Numerický model:

Zatížení:

- Je konstrukce správně zatížena (mechanické i teplotní zatížení)?
- Jsou zavedeny vhodné kombinace zatížení?
- Je uvažováno se správnými kombinačními součiniteli?

Numerická síť a vlastnosti výpočtu:

- Obsahuje model numerickou síť?
- Jaký typ prvku je zvolen?
- Je vhodně zvolen zatěžovací krok výpočtu?

Ostatní:

- Jsou definovány veškeré okrajové podmínky (počáteční teplota, vlhkost)?
- Je v modelu uvažováno s aktivními prvky požární bezpečnosti ovlivňující konstrukci (chlazení konstrukce)?

Ukázka check-listu

Výsledky a vyhodnocení:

- Byla provedena citlivostní studie na vstupy s velkým vlivem na výsledky?
- Jsou definována kritéria selhání konstrukce?
- Jsou posouzeny veškeré relevantní mezní stavy?
- Jsou zadány všechny potřebné výstupy?
- Jsou výsledky výpočtu zpracovány přehledně v grafech, obrázcích i numericky?
- Jsou výsledky dostatečně popsány?
- Jsou výsledky výpočtu relevantní? Je zhodnocena jejich přesnost?
- Je uvedena veškerá použitá literatura?

SHRNUTÍ

SHRNUTÍ

- Při pokročilém modelování je třeba počítat s chybami, které je třeba odstraňovat.
- Odstranění všech chyb není bez cílené snahy možné.
- Správné užití programu se ověřuje verifikací výsledků jiným modelem pomocí **verifikačních/ověřovacích příkladů**, benchmark cases.

- **Ověřování modelů konstrukcí**

- Verifikační příklady

- Check-list

součástí

- Metodiky ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů
- Monografie



DĚKUJI ZA POZORNOST

Kamila Cábová

Projekt VI20162019034

Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob
a jejich praktická aplikace
při posuzování požární bezpečnosti staveb