



Pokročilé modely pro požární navrhování

Projekt VI20162019034

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

František Wald, ČVUT v Praze

MOTIVACE

- Informace o projektu
- K základům
kvality předpovědi reality modely

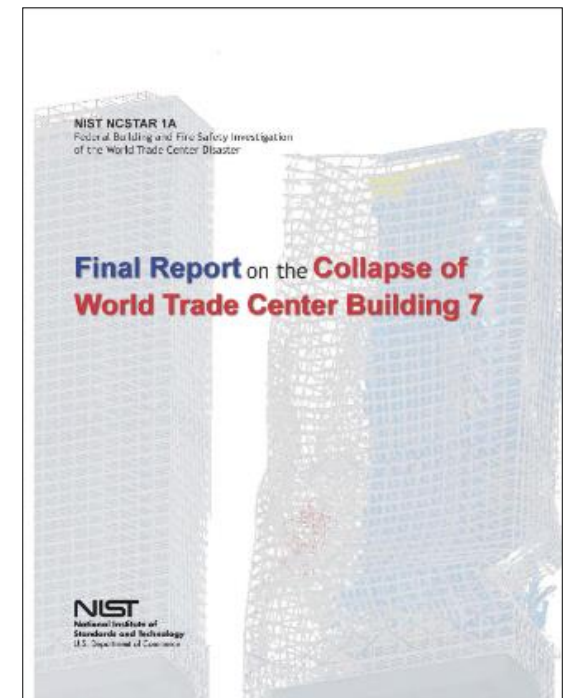
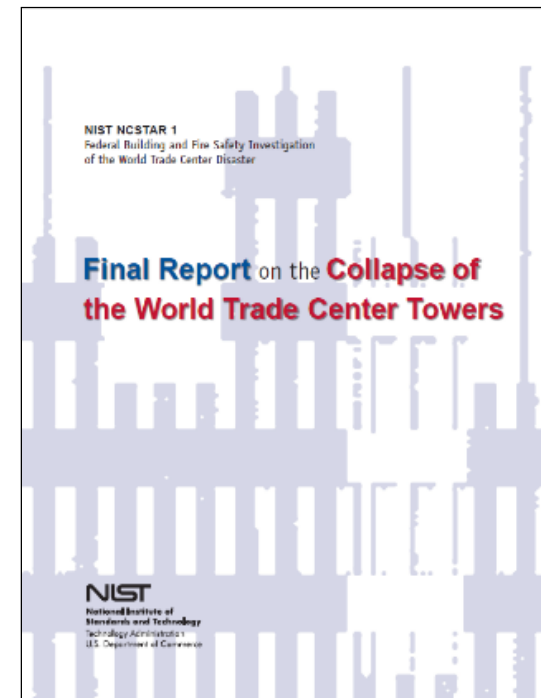
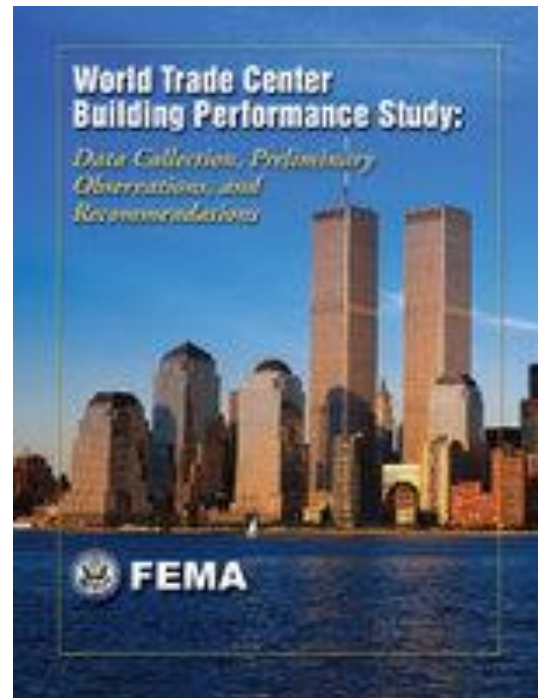
OBSAH PREZENTACE

- Poučení z katastrofy
- Kde jsme v modelování?
- Materiály, které jsme v projektu připravili
- Shrnutí

Úvod

Proč pokročilé modely v požárním navrhování?

- Poučení ze zřícení WTC I I. září
- Zprávy z vyšetřování



Federal Emergency Management Agency

Obsah první zprávy NIST

Kap 1-7

Popis budov WTC 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

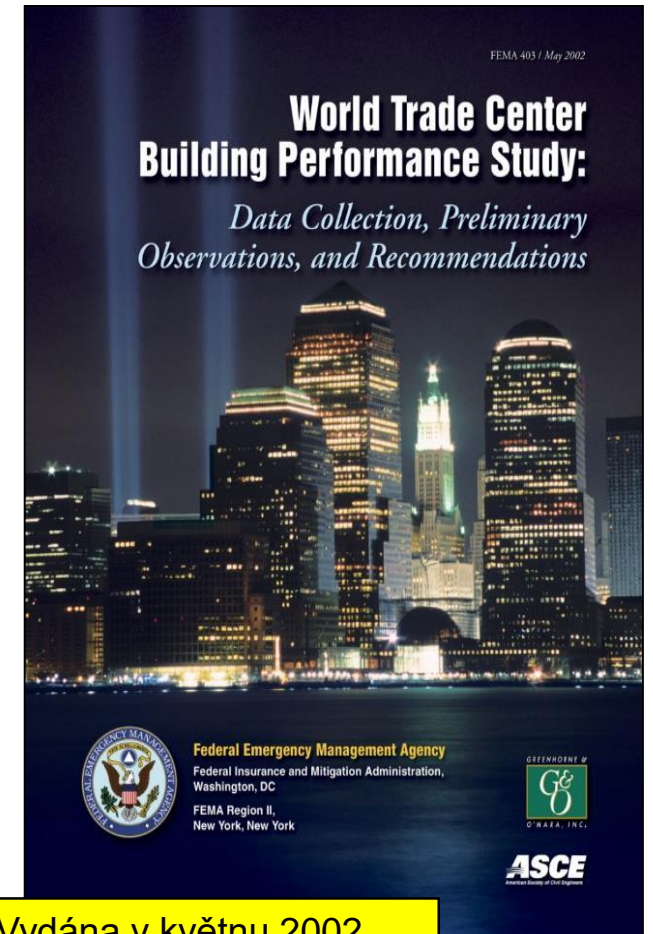
Chování při katastrofě

Kap 8

Doporučení pro budoucnost

Přílohy

Podklady, zkoušky



Vydána v květnu 2002

FEMA 403, World Trade Center Building Performance Study (2002),
<https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/3544>

Ověření konstrukční celistvosti

- 1) Příprava normy na prostorové zřícení
- 2) Příprava normy na větrné tunely
a dynamickou analýzu plynů při zatížení větrem
- 3) Příprava omezení deformací

Ověření požární bezpečnosti

4) Zlepšení klasifikace konstrukcí

5) Zlepšení zkušebních metod

6) Zlepšení zkoušení požární ochrany

7) Zavedení požárního návrhu

celé konstrukce, ne jen prvků

Nové metody v požárním navrhování

- 8) Nezvladatelné požáry bez zřícení
- 9) Požární návrhové normy **založené na chování**
- 10) Vývoj nových požárních ochran
- 11) Lepší ověření chování materiálů za požáru

Výuka a výcvik

29) Výuka požárního navrhování

**30) Výuka dynamiky plynů
a návrhu konstrukce
za zvýšené teploty**

Závěry z doporučení NIST postupně aplikovaném na celém světě

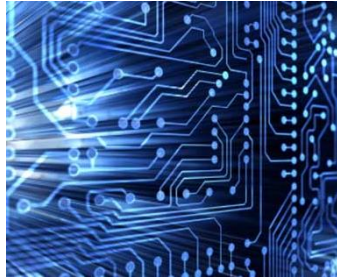
Navrhování

Předpisem nebo Pokročilým modelem

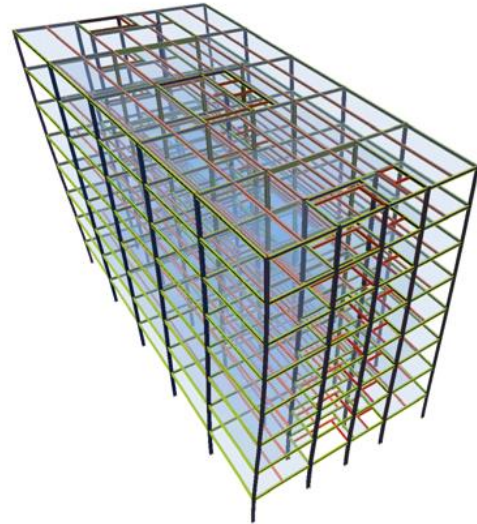
Nic mezi tím

Kde jsme v modelování?

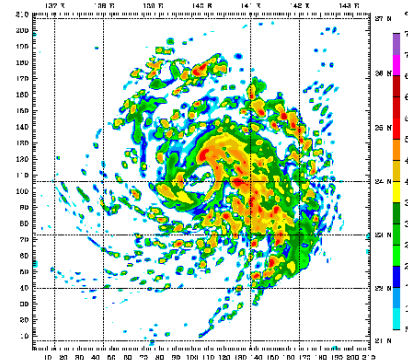
Jaké jsou schopnosti modelů?



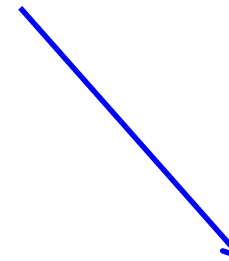
Modely
elektroniky



Počítačové vědy a
inženýrství (CS&E)
Počítačové vědy a fyzika
(CE&P)



Numerické
předpovědi
počasí



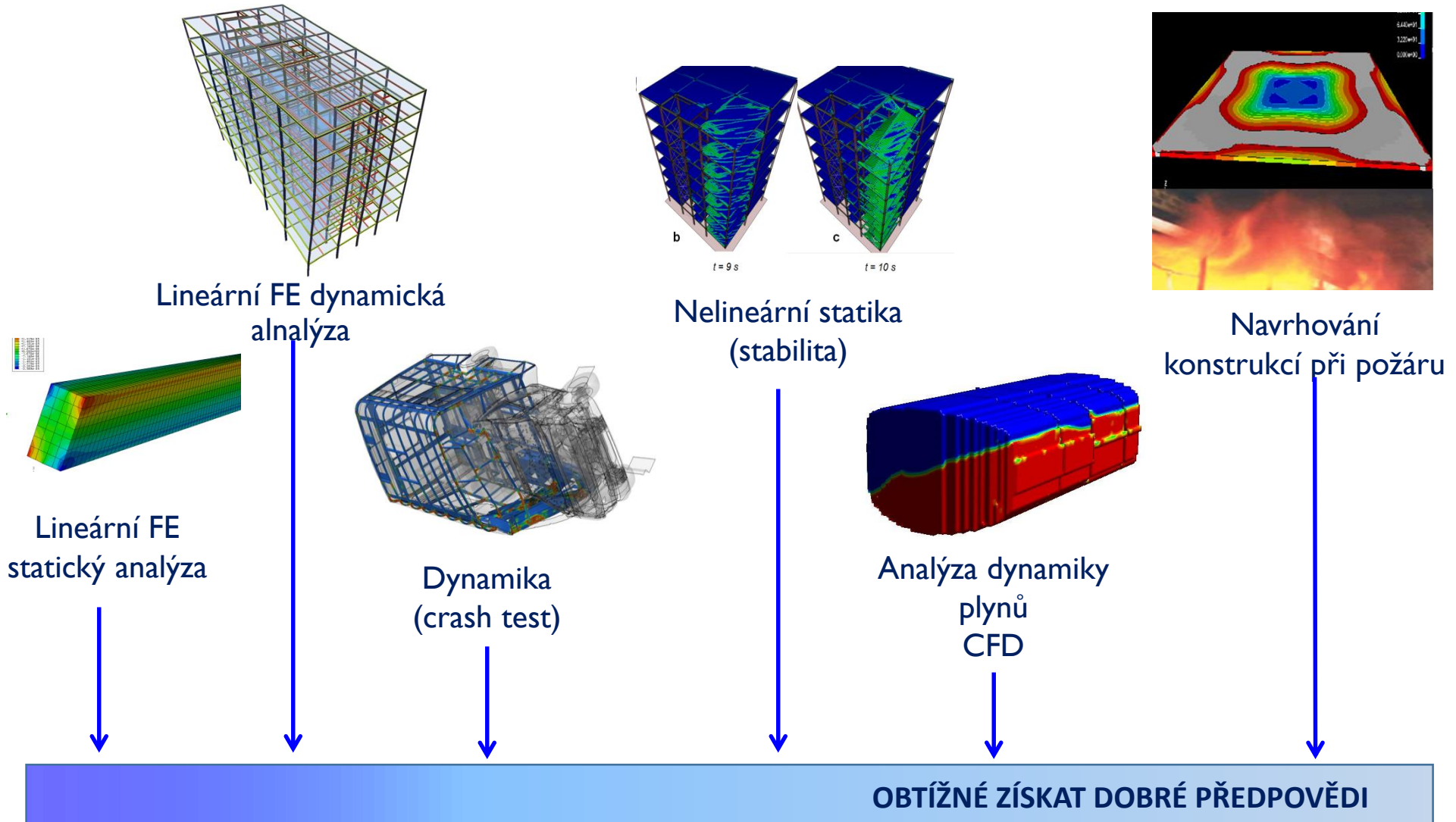
Numerické
modely v
ekonomice



VELMI DOBRÉ

SLABÉ

Ve stavařině?



Příklad chyby v pokročilém modelu

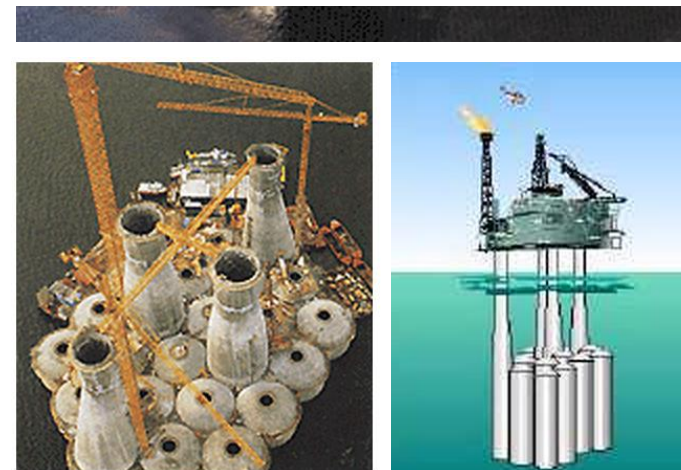
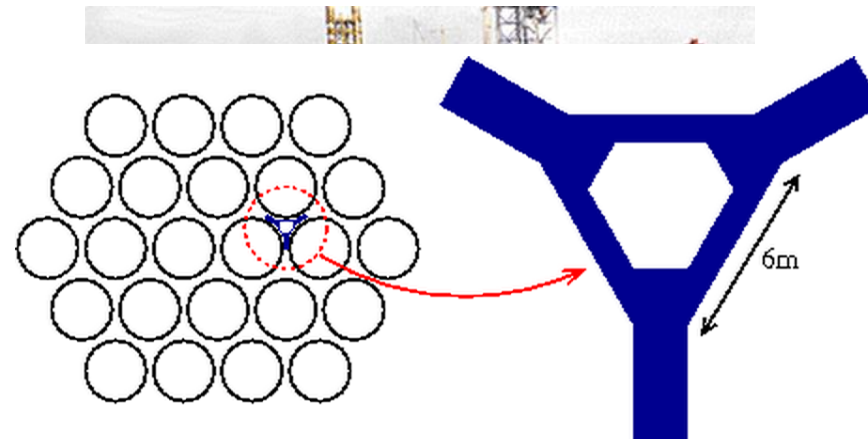
Potopení Sleipnerovy plošiny

<http://www.ima.umn.edu/~arnold/disasters/sleipner.html>

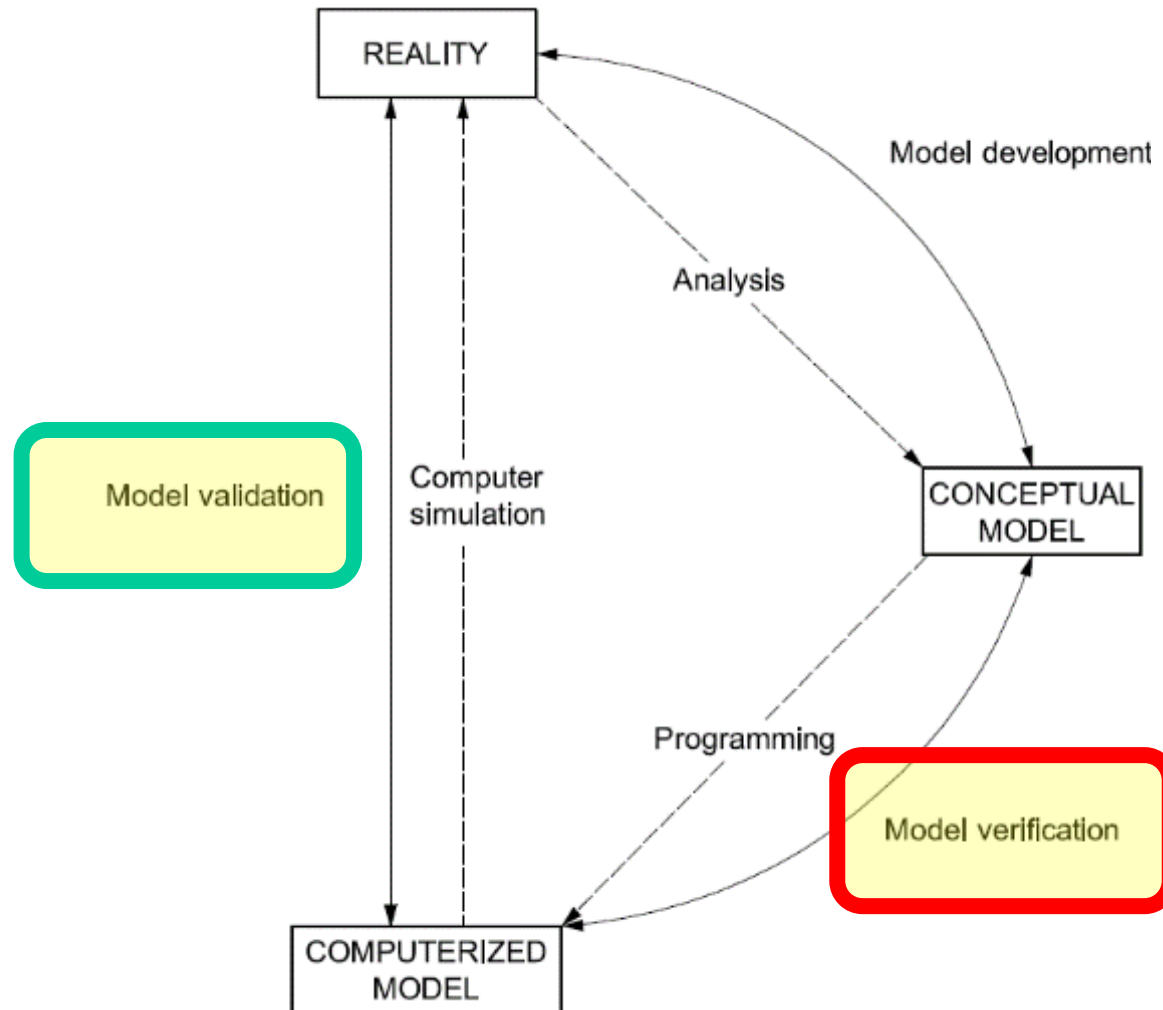
Celková ztráta kolem \$700 million.

Selhání stěny buňky vedlo k závažným trhlinám. Selhání v důsledku kombinace závažné chyby v analýze konečných prvků a nedostatečného ukotvení výztuže v kritické zóně.

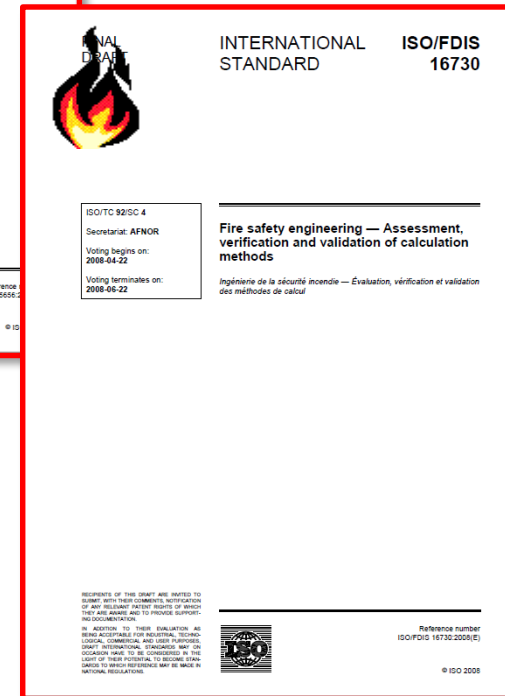
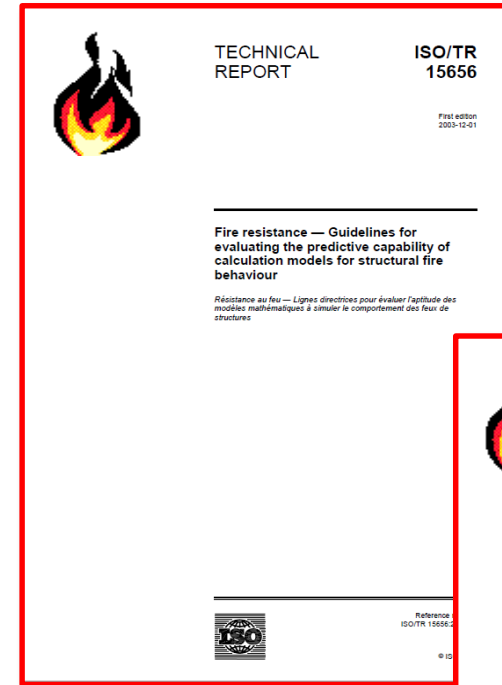
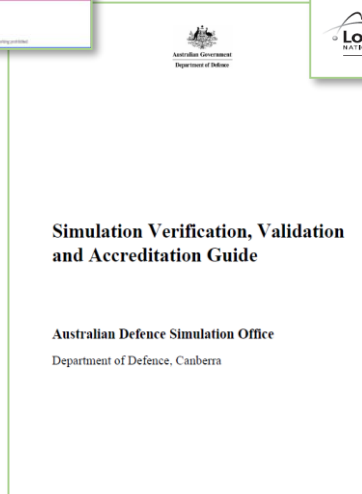
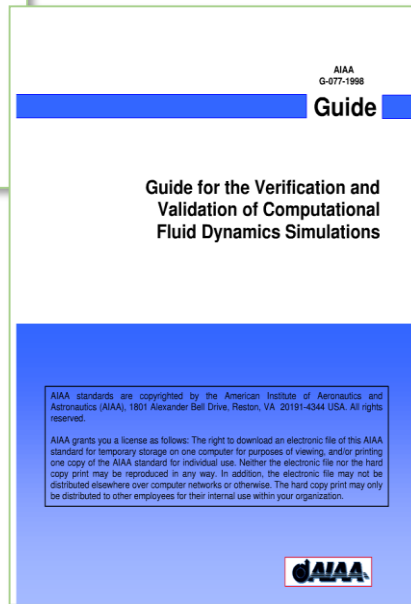
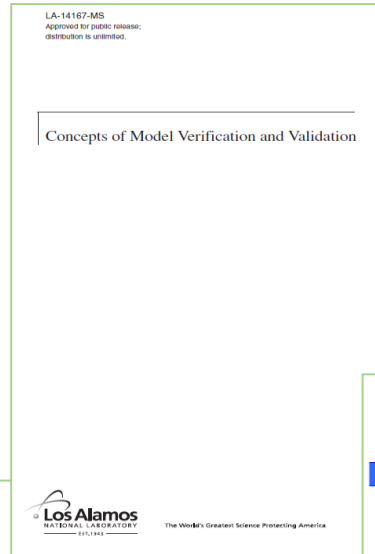
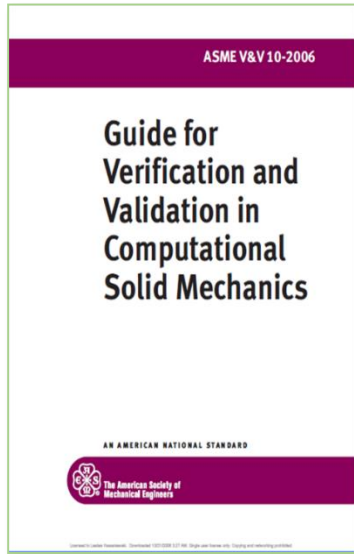
Pátrání po nehodě odhalilo chybu v nepřesné aproximaci konečných prvků lineárního elastického modelu (pomocí populárního programu NASTRAN). Smykové napětí bylo podhodnoceno o 47%, což vedlo k nedostatečnému návrhu. Zejména některé betonové stěny nebyly dost silné.



Kvalita modelů = Validace a verifikace



Normy na validaci a verifikaci



ISO 16730-1, Fire Safety Engineering - Assessment, Verification and Validation of Calculation Methods - Part 1: General, Geneva, 2008
ISO DTR 16730-2, Fire Safety Engineering - Assessment, Verification and Validation of Calculation Methods - Part 2: Example of a Fire Zone Model, Geneva, 2011.

Definice validace a verifikace

Validace

Porovnání numerického řešení s experimentálními výsledky

Verifikace

Srovnání výpočetních řešení s analytickými

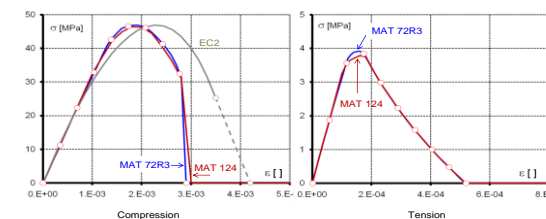
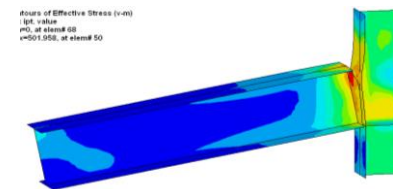
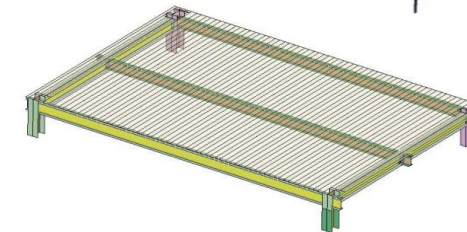
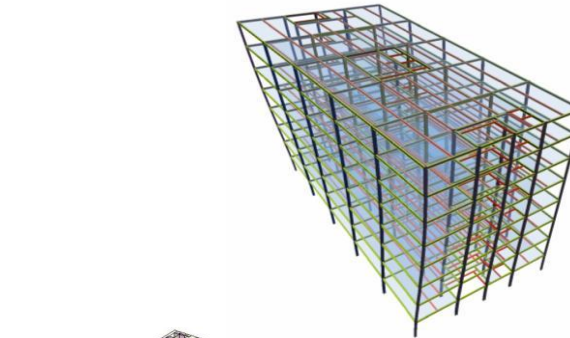
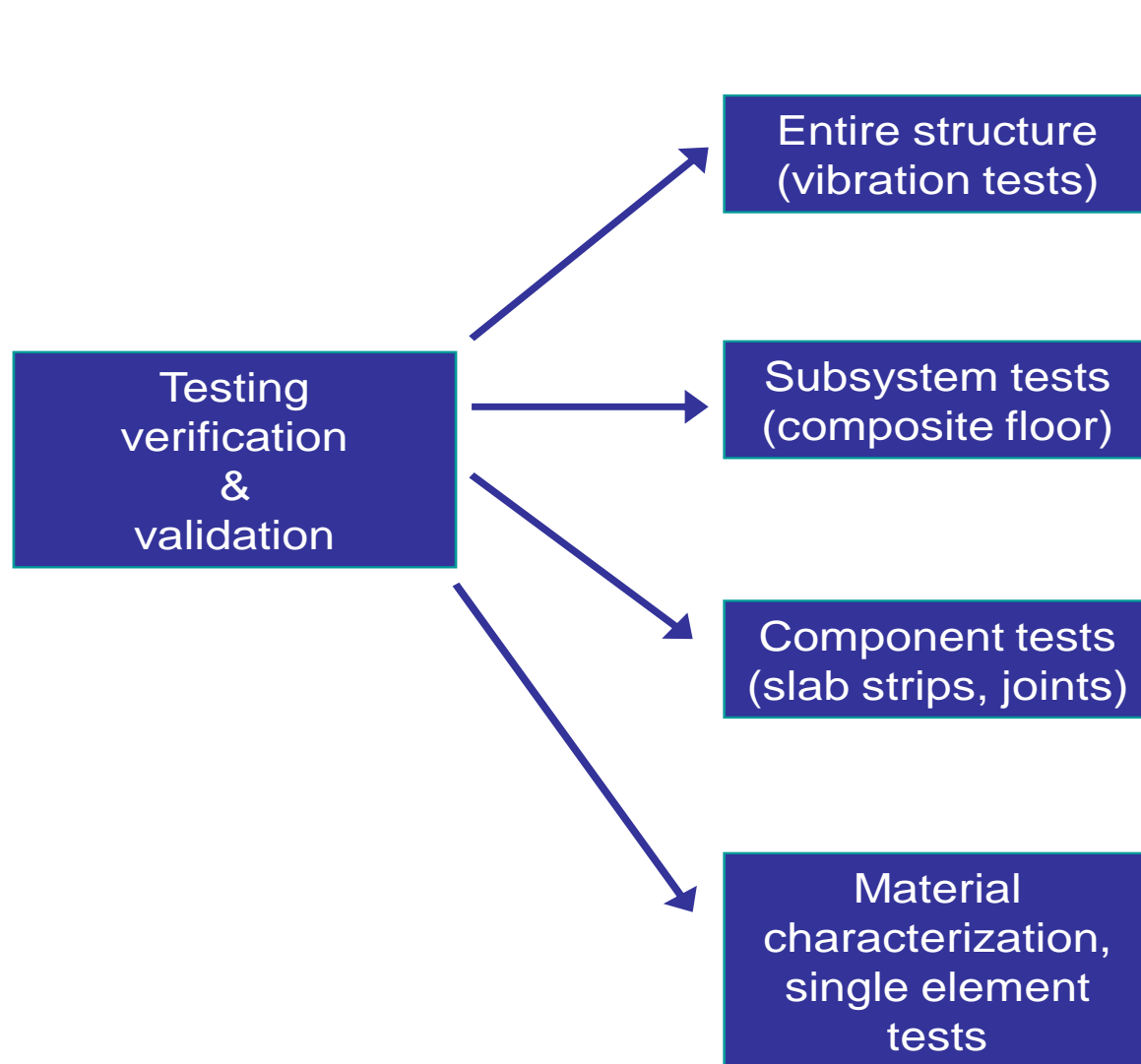
Kalibrace

Vložení materiálových vlastností do modelu

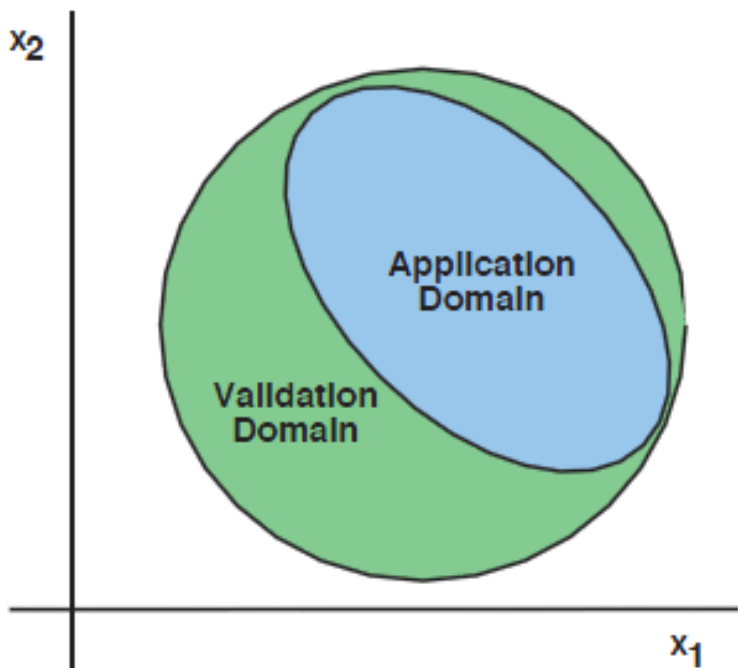
Ověřovací příklad (Benchmark case)

Příklad popsáný vstupy a výstupy ke kontrole software a jeho uživatele

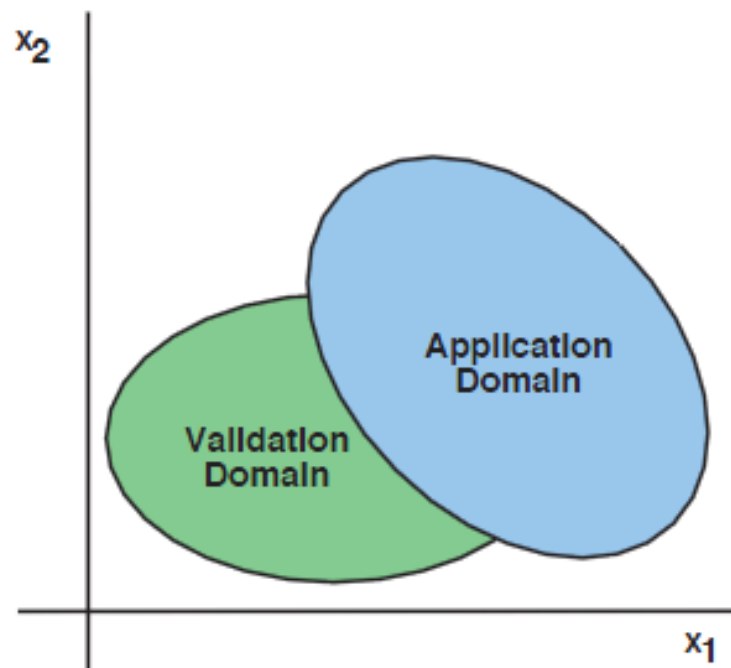
Hierarchie při validaci a verifikaci



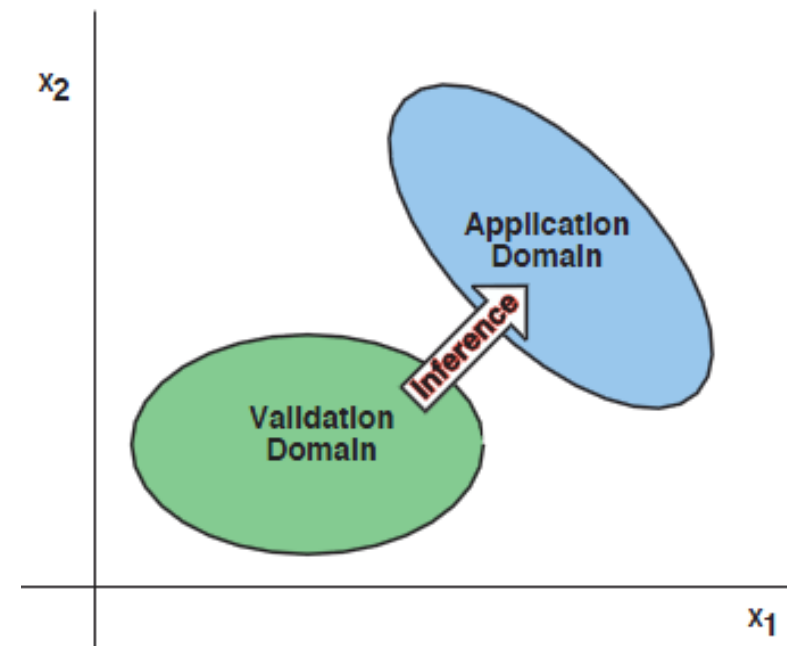
Aplikace řešení



a) Complete Overlap



b) Partial Overlap



c) No Overlap

Evropská databáze ověřovacích příkladů

fire.fsv.cvut.cz/ifer/benchmark/index.htm



Integrated Fire Engineering and Response

COST action network number [TU0904](#) in domain Transport and Urban Development

Benchmarks studies

Verification of numerical models in fire engineering

[Publication in pdf to download](#)

[Data in MS Excel sheets](#)

Experimental validation of numerical models in fire engineering

[Publication in pdf to download](#)

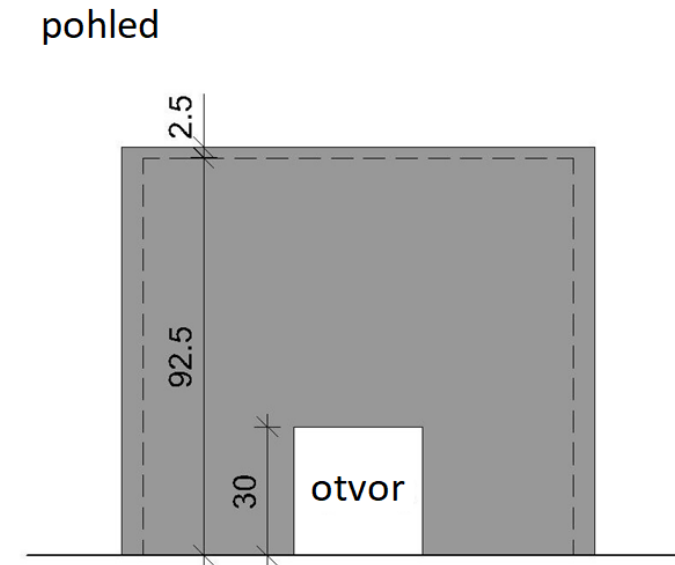
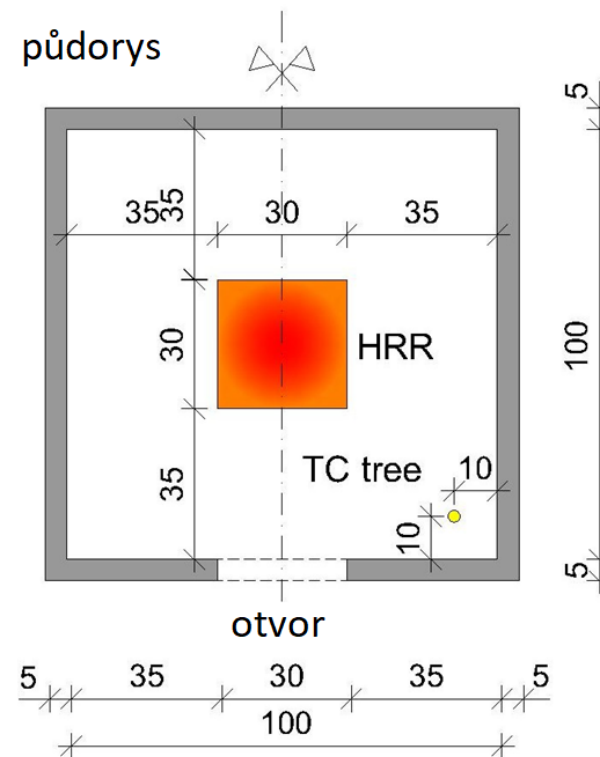
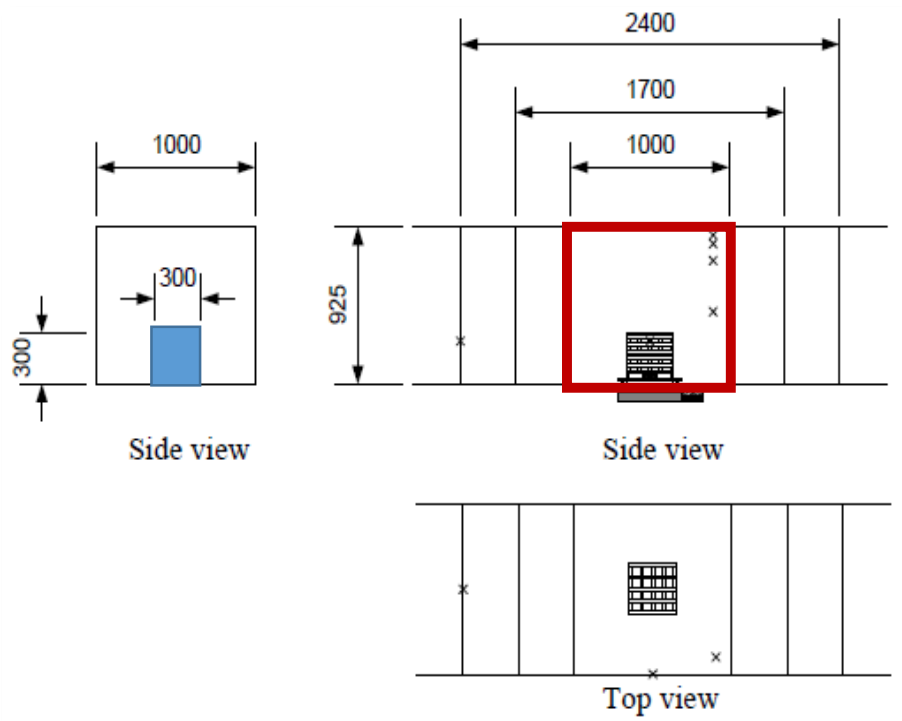
[Data in MS Excel sheets](#)

Related pages: [Finnish Constructional Steelwork Association](#)

[To the main page](#)

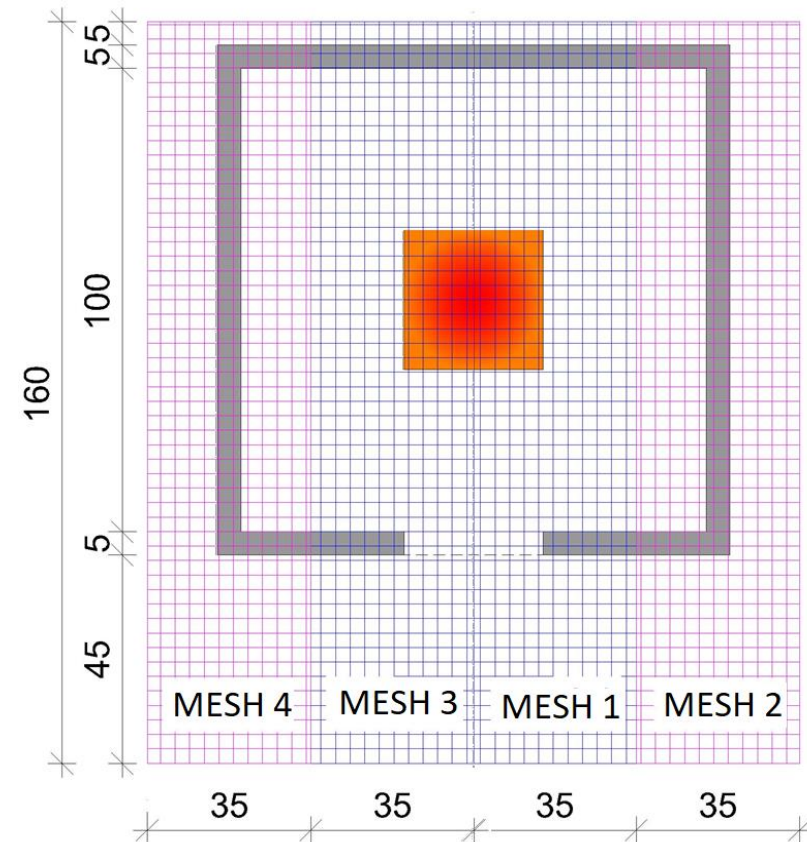
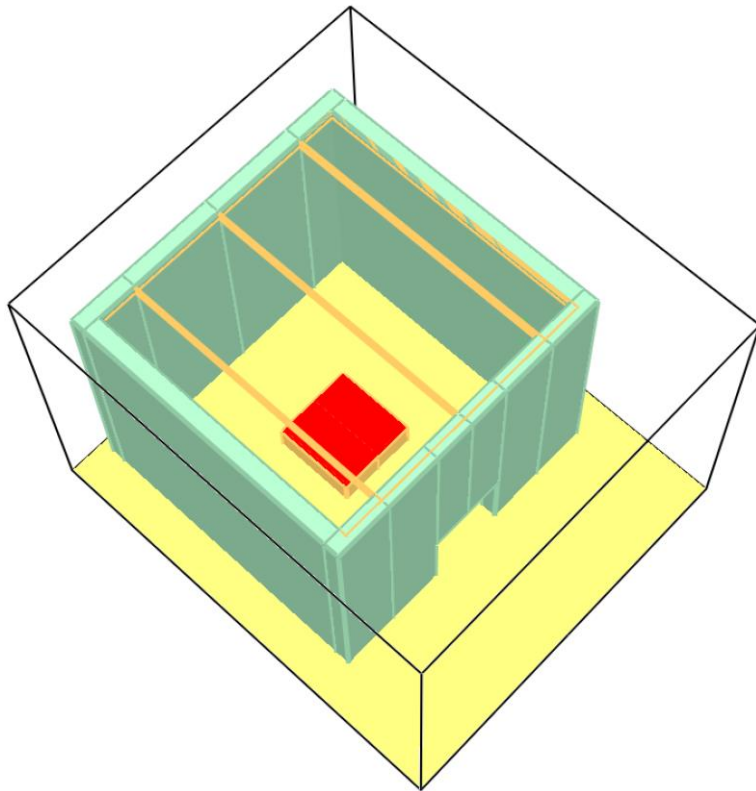
Verifikační příklad

- Experiment - Lonnermark a Ingason (Brandforsk projekt, SNTRI, Švédsko, 2005)
- Požární úsek 1,00 x 1,00 x 0,925 m, otvor 0.30 x 0.30 m, simulace 30 min
- Model v FDS verze 6.5.2, postprocesor Smokeview, verze 6.3.12



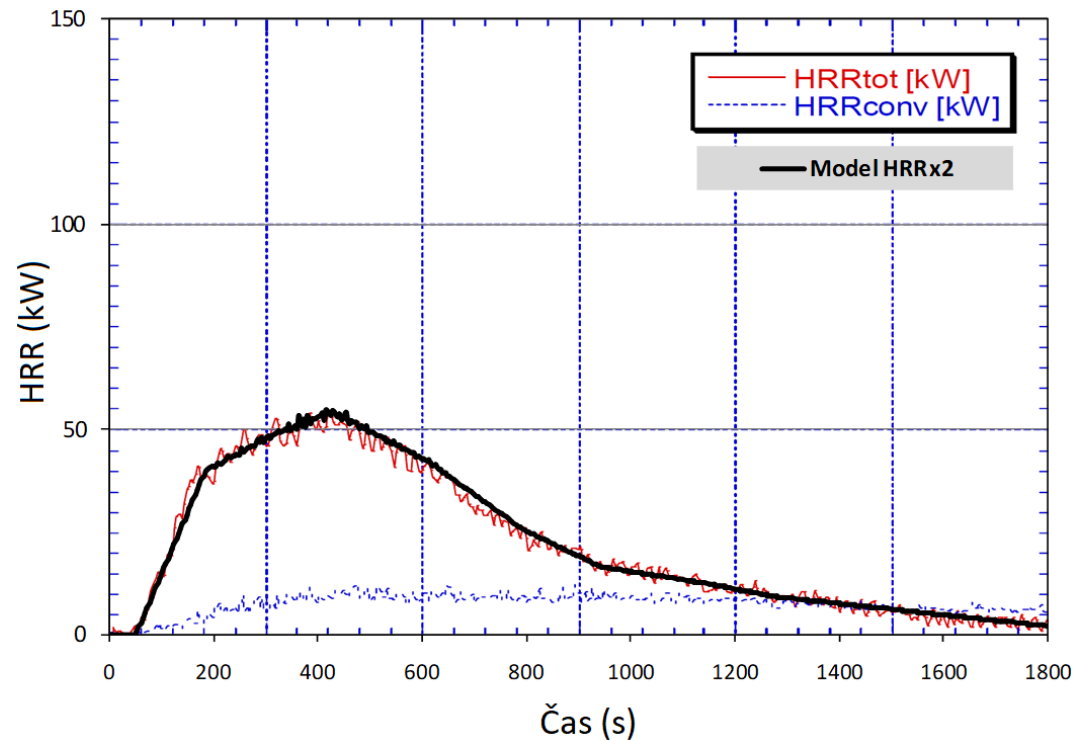
Volba sítě

- Čtyři sítě o rozměrech 0,35 m x 1,60 m x 1,20 m
- Buňky o rozměrech 0,03 m x 0,03 m x 0,03 m



Zdroj a reakce hoření

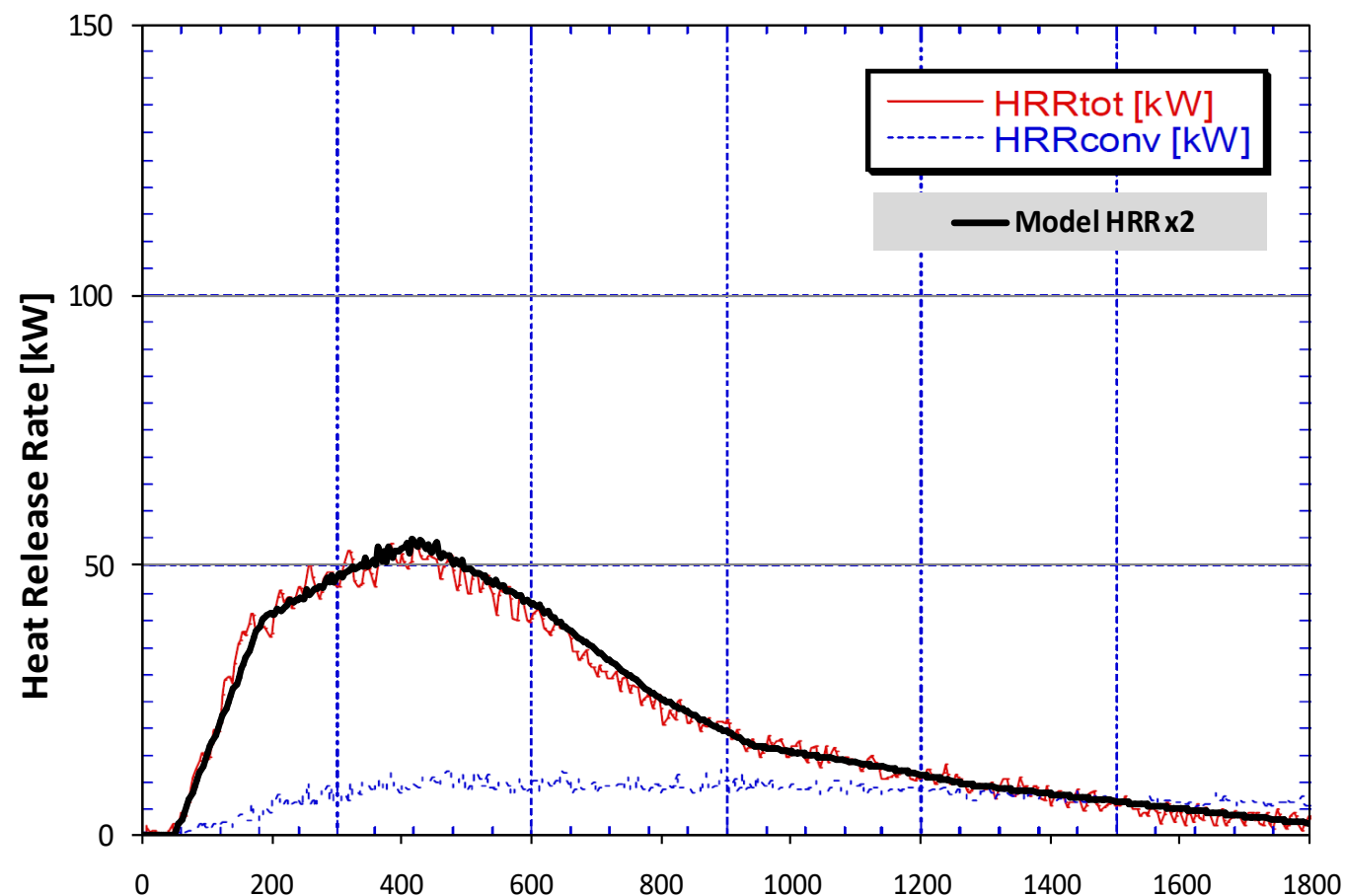
- Náhrada rychlosti uvolňování tepla požáru dřevěné hranice zjednodušenou křivkou
- Reakce hoření využito zjednodušení propanem



Vlastnosti materiálu obvodových konstrukcí

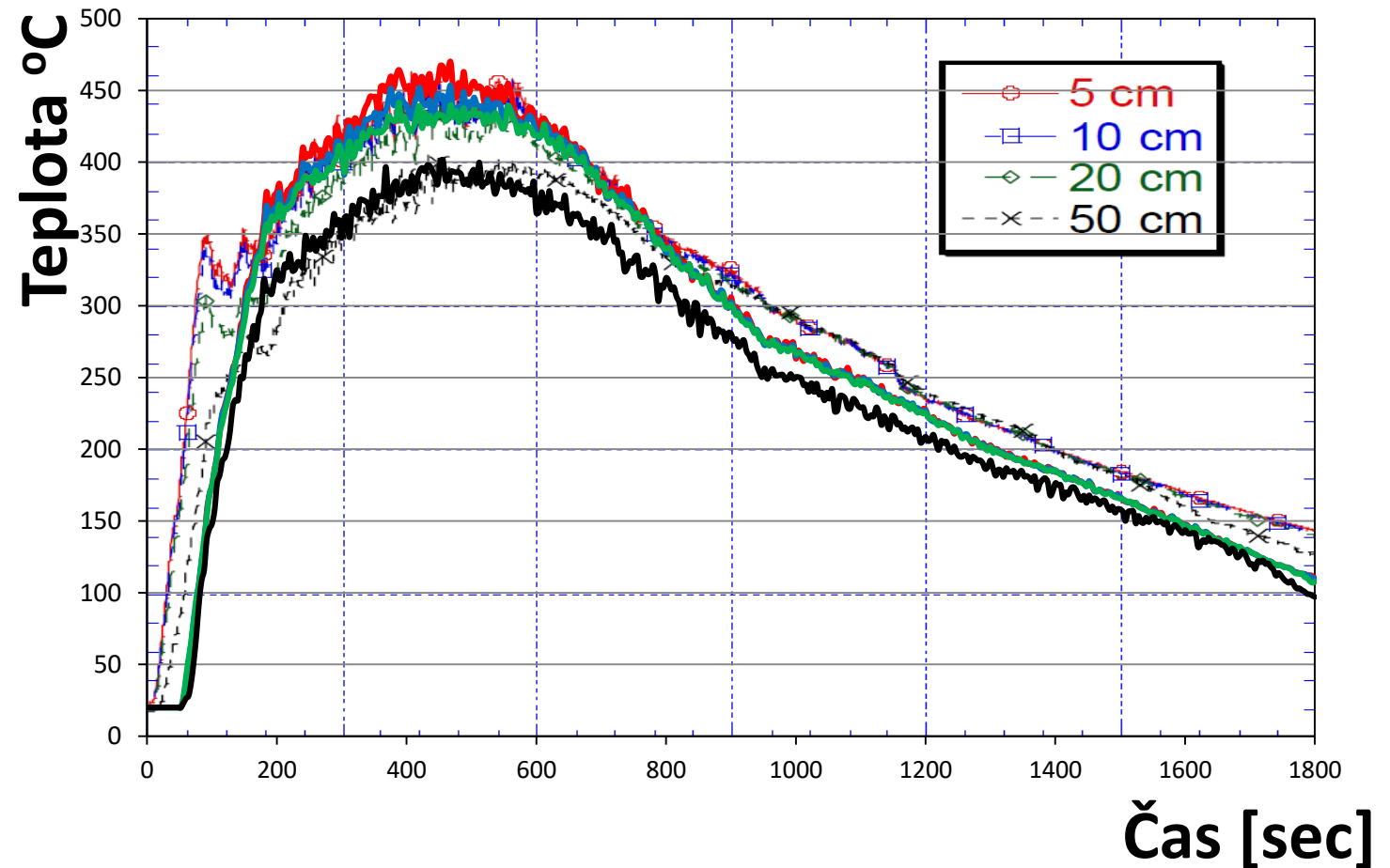
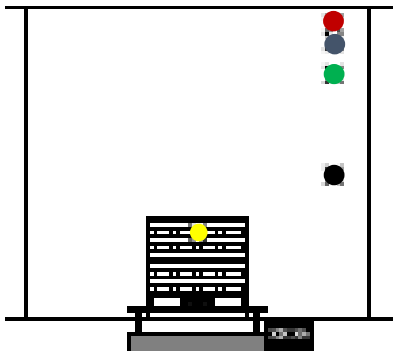
Sádrokartón	
Měrné teplo [kJ/(kg. K)]	0.84
Jímovost [W/(m.K)]	0.48
Emisivita	0.90
Součinitel absorpce [1/m]	0.0005

HRR v modelu



Validace teplot

- Průběhy teploty plynu na termočláncích 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem



Materiály připravené v projektu
hasiči, stavaři, chemiky, dopraváky

Ověřené požárně technické charakteristiky

hořlavých látek a materiálů jako vstupní parametry pro pokročilé modelování

○ Databáze materiálů

<https://ptch.fce.vutbr.cz/>

○ Z literatury

○ Ověřené experimenty

○ Metodika volby vstupů

Příklad otázek

pro řešitele/posuzovatele

Zdroj hoření je definován jako?

- A. Křivka tepelného výkonu jako funkce času (případně křivka rychlostního úbytku látky jako funkce času) → empirický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
- B. Křivka tepelného výkonu jako funkce času (případně křivka rychlostního úbytku látky jako funkce času) a tepelně technické charakteristiky látek → semi-empirický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
- C. V zadání zdroje hoření vystupuje schéma tepelného rozkladu látek, reakční parametry rozkladu a materiálové vlastnosti látek → komplexní model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.
 - ii. Prokažte validaci vstupních dat do modelu.
- D. V zadání zdroje hoření vystupují tepelně technické charakteristiky látek a teplo pro zplynění → analytický model.
 - i. Definujte předpoklady modelu a požadovaná vstupní data.

Křivka tepelného výkonu jako funkce času je?

- A. Pouze jedna
 - V modelu uvažujeme, že hoří pouze jeden objekt/předmět (lokální požár).
 - i. Zdůvodněte hodnoty a průběh tepelného výkonu.
 - Jednou křivkou reprezentujeme hoření všech předmětů a materiálů na základě znalosti požárního zatížení.
 - i. Zdůvodněte hodnoty a průběh tepelného výkonu.
- B. Křivka tepelného výkonu je jedna, ale je složena z křivek pro více materiálů nebo objektů.
 - Křivka zahrnuje šíření hoření mezi materiály/objekty. Z hlediska modelu je ale

Ověřování modelování

požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob

○ Výběr modelů

○ Požár

○ Evakuace

○ Konstrukce

○ Záznam a prezentace výsledků

Příklad rozboru modelů

MODELÝ POSOUZENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI KONSTRUKCÍ

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?

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?
- 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:

Využití pokročilých modelů

požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb

- Výběr modelů podle budov
- Postupy řešení

7.3.1 Principy stanovení návrhových požárních scénářů

Pro celou řadu situací jsou možné požární scénáře zřejmé. Jako příklad lze uvést chemický provoz s hořlavými látkami v tlakových nádržích, kde je logickým scénářem vznícení dané chemikálie. V jiných situacích ale takto přímočaře postupovat nemůžeme a je třeba zvolit analytický přístup pro identifikaci požárního scénáře. Obvyklé technologie jsou následující:

Analýza možného výskytu a vlivu vad (FMEA)

Analytická, vnitřně strukturovaná metoda, jejímž cílem je identifikovat místa možného vzniku vad ve výrobě obecně, a kterou je možné aplikovat také v požárním inženýrství.

Metoda nejprve identifikuje jednotlivé prvky, které jsou sledovány a mohou být předmětem selhání. Následně je pro každý prvek stanoven scénář jeho selhání (např. přehřátí, únik paliva, výpadek napájení apod.), včetně odpovídající příčiny tohoto selhání. V dalším kroku jsou popsány efekty tohoto selhání. Konečným výsledkem je ohodnocení a seřazení jednotlivých položek podle míry jejich závažnosti (Stamatis, 2003).

WHAT-IF analýza

Jednodušší metoda, která není vnitřně strukturovaná a pracuje se skupinou expertů jako informačním zdrojem. Jsou uvažovány různé příčiny vznícení požáru a jejich následky. Metoda připomíná spontánní diskusi, kdy skupina s problematikou obeznámených odborníků formuluje

Příklad návrhu scénářů

Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany

Příklad rozboru

○ Vstupní parametry

- Průtok vody
- Parametr offset
- Úhel rozstříku (tvar rozstříku)
- Velikost kapek
- Počet kapek
- Počáteční rychlost pohybu kapek
- Koeficient zhášení
- Propojení s modelem požáru
- Shrnutí zadávání vstupních parametrů

Příklad otázek pro řešitele/posuzovatele

A. Kontrolní seznam (check list) pro posuzovatele

Je křivka tepelného výkonu upravena na základě předpokladu aktivace sprinklerů?

- A. Po aktivaci sprinklerů zůstává tepelný výkon konstantní → model předpokládá, že po spuštění sprinklerů dojde k lokalizaci požáru.
 - I. Jak byl stanoven čas, kdy dojde k aktivaci sprinklerů?
- B. Po aktivaci sprinklerů tepelný výkon klesá → model předpokládá, že dochází k hašení požáru.
 - Snížení tepelného výkonu je zadáno přímo uživatelem v rámci křivky tepelného výkonu.
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář obhajitelný?
 - ii. Jak byla stanovena rychlost poklesu tepelného výkonu, zdůvodnění použitého postupu?
 - Rychlost poklesu tepelného výkonu je simulována softwarem na základě tzv. extinkčního koeficientu (lze chápat jako koeficient „zhášení“).
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář ospravedlnitelný?
 - ii. Doložte a vysvětlete, jak byla stanovena hodnota koeficientu zhášení. Jedná se o empirickou konstantu, nejedná se o fyzikální veličinu.

Jsou dostatečně definovány vstupní parametry sprinklerových hlav u zjednodušených

SHRNUTÍ

SHRNUTÍ

Pro využití pokročilých modelů požární bezpečnosti v ČR jsme připravili

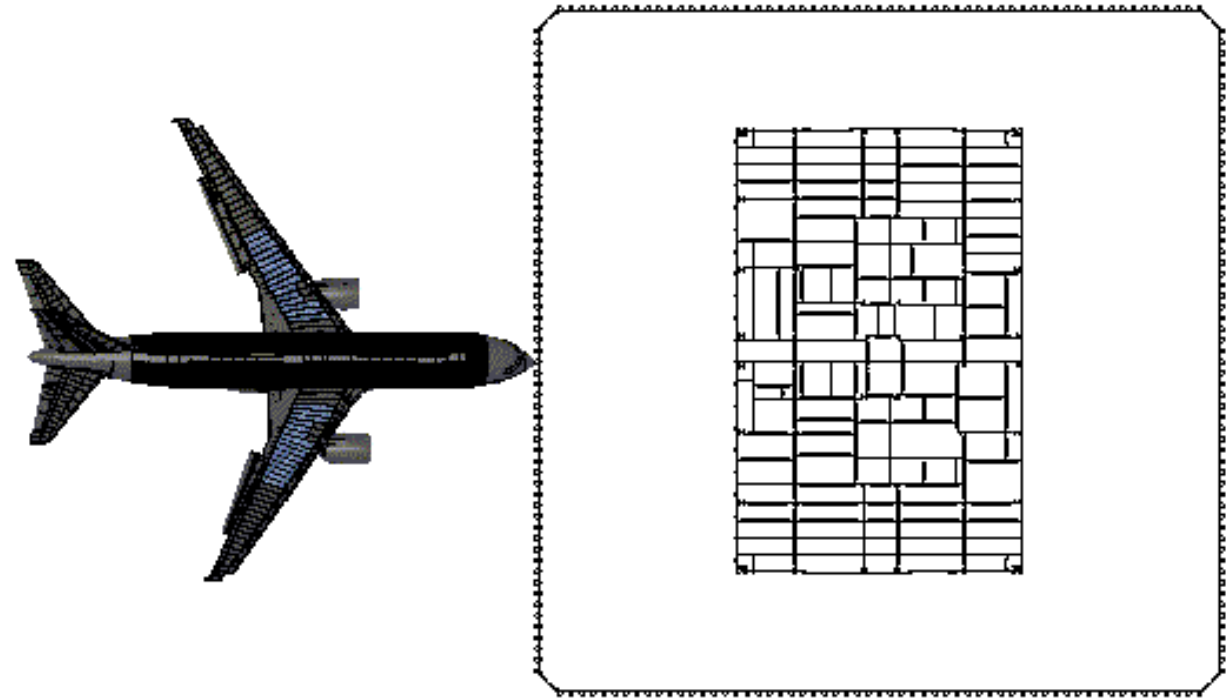
- **Databázi**
ověřených požárně technických charakteristik hořlavých látek a materiálů
- **Metodiky ověřování**
 - Modelování požáru
 - Spolehlivosti konstrukcí
 - Evakuace osob
 - Validace požárních modelů procesu hašení
- **Monografii s ověřovacími příklady**



Analýza kolapsu WTC

Náraz letadla Program LS-DYNA

Time = 0

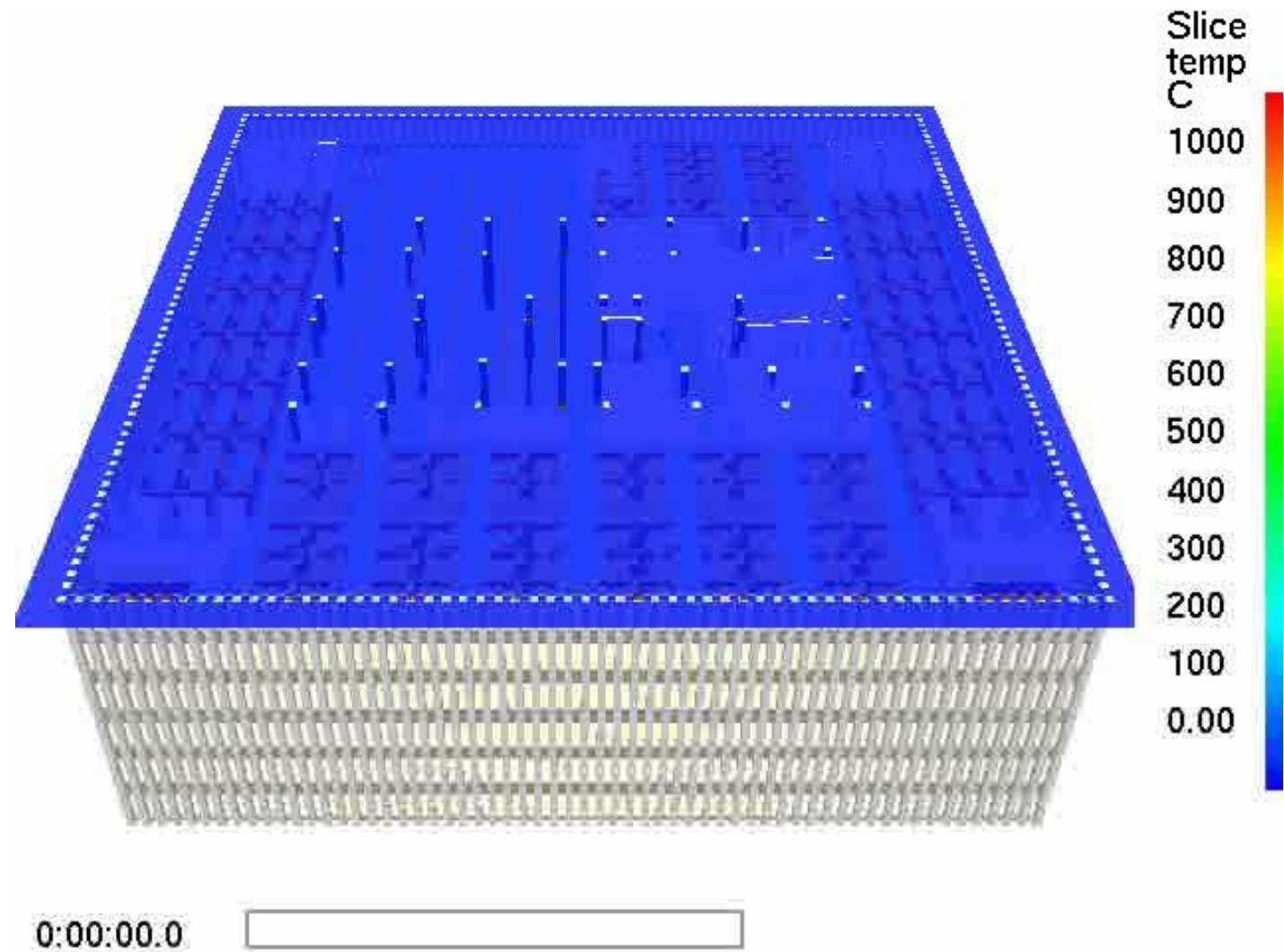


Asi nejznámější pokročilý model

Požár

Program FDS

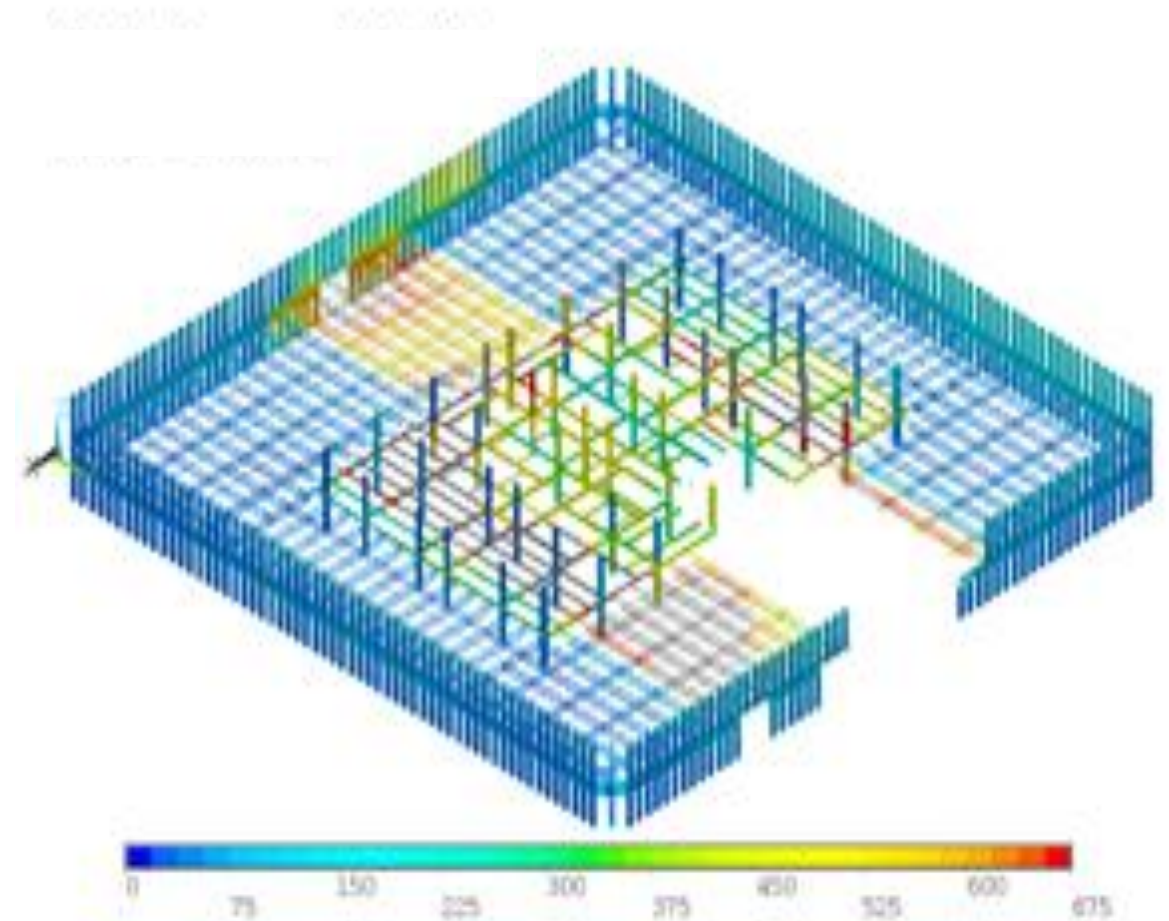
Analýza kolapsu WTC



Analýza kolapsu WTC

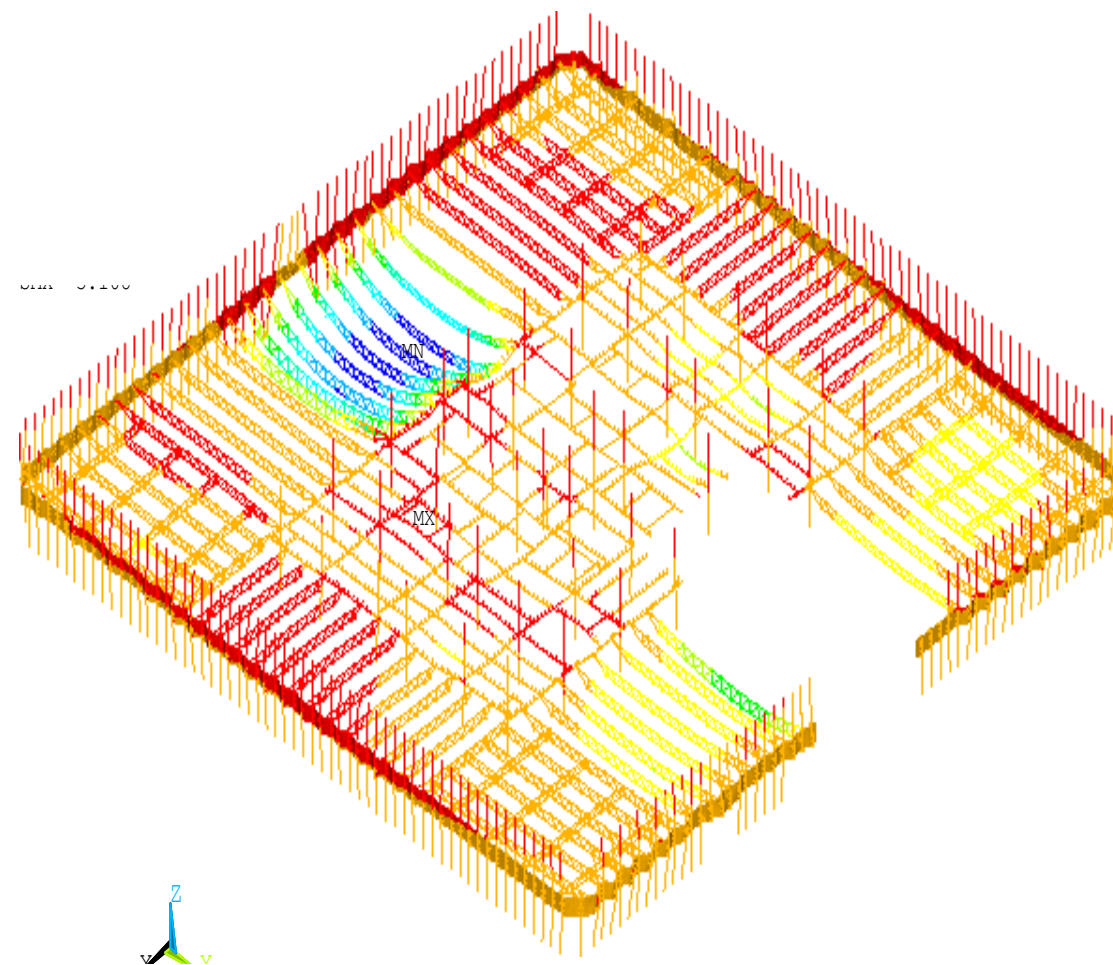
Přestup tepla do konstrukce

Program ANSYS



Analýza kolapsu WTC

Chování konstrukce
Program ANSYS



Deformace stropu

PODĚKOVÁNÍ TÝMU

Hasičů
Stavařů
Chemiků
Dopraváků

MV, GŘ HZS – Technický ústav požární ochrany
Ing. Petra Bursíková, Ph.D.
Ing. Lucie Hasalová, Ph.D.
Dana Smolíková
Ing. Ondřej Suchý, Ph.D.
Ing. Libor Ševčík
Ing. Václav Vystrčil

VŠB TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství
doc. RNDr. Karla Barčová, Ph.D.
Ing. Dana Chudová
Ing. Bohdan Filipi, Ph.D.
Michaela Ogurková
doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.
Ing. Jiří Pokorný, Ph.D., MPA
Ing. Adam Thomitzek

VUT v Brně, Fakulta stavební
doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Ing. Jiří Apeltauer
Ing. Petr Beneš, CSc.
Ing. Kateřina Gryndlerová
Ing. Radka Matuszková
Bc. Petra Okřinová
Ing. Luděk Vrána

ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Ing. Lukáš Blesák, Ph.D.
Ing. Kamila Cábová, Ph.D.
Ing. Otto Dvořák, Ph.D.
Ing. arch. Petr Hejtmánek, Ph.D.
Ing. Anna Kuklíková, Ph.D.
Ing. Matyáš Kožich
Ing. Zuzana Kubíková
Kateřina Mrázková
Ing. Hana Najmanová
Ing. Marek Pokorný, Ph.D.
prof. Ing. František Wald, CSc.

K modelům v požárním navrhování

What are the predictive capabilities of our computer simulations (in Structural Fire Engineering)?

Jaké jsou schopnosti předpovědi našich počítačových modelů (v navrhování konstrukcí při požáru)?

George E. P. Box



**„Essentially,
all models are wrong,
but some are useful”**

Box G.E.P., Draper N.R. (1987) Empirical model-building and response surfaces, *John Wiley & Sons.*, pp. 669.



DĚKUJI ZA POZORNOST

za kolektiv
František Wald

Projekt VI20162019034
Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob
a jejich praktická aplikace
při posuzování požární bezpečnosti staveb