

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Rozvojové projekty Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR
Rozvojové projekty mladých týmů – RPMT 2014



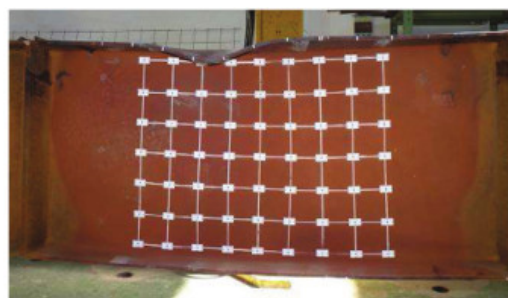
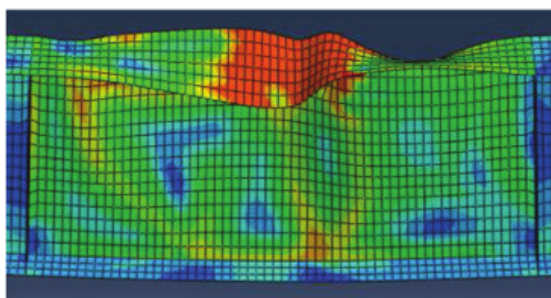
Projekt:

Využití pokročilého modelování konstrukcí v magisterském studiu

Hlavní řešitel: Ing. Michal Jandera, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Výstup: Numerický model v programu *Abaqus*, jeho verifikace a validace

Analýza nosníku štíhlého průřezu za požáru



Vypracovali: Ing. Martin Prachař, Ing. Michal Jandera, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Praha, 2014

Obsah

Obsah	2
1 Úvod	3
2 Popis problému	3
3 Numerický model	4
4 Tvorba skriptu	7
5 Porovnání jednotlivých druhů analýz s experimentem	12
5.1 Lineární pružnostní analýza (LA)	12
5.2 Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)	12
5.3 Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)	13
5.4 Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)	13
5.5 Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)	14
6 Ruční výpočet	17
6.1 Stanovení momentové únosnosti nosníku při 450°C	19
6.2 Stanovení momentové únosnosti nosníku při 650°C	20
7 Celkové porovnání	20
Reference	22

1 Úvod

Tento studijní materiál si dává za cíl seznámit čtenáře s modelováním v programu ABAQUS a využitím numerických simulací pro různé druhy analýz ocelových konstrukcí. Popis analýz je shrnut v tabulce 1.

Druh analýzy	Ohybová teorie	Materiál	Geometrie
Lineární pružností analýza (LA)			
Lineární bifurkační analýza (LBA)	lineární	lineární	ideální
Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)	nelineární	lineární	ideální
Materiálově nelineární pružnostní analýza (MNA)	lineární	nelineární	ideální
Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)	nelineární	nelineární	ideální
Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)	nelineární	lineární	imperfektní
Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)	nelineární	nelineární	imperfektní

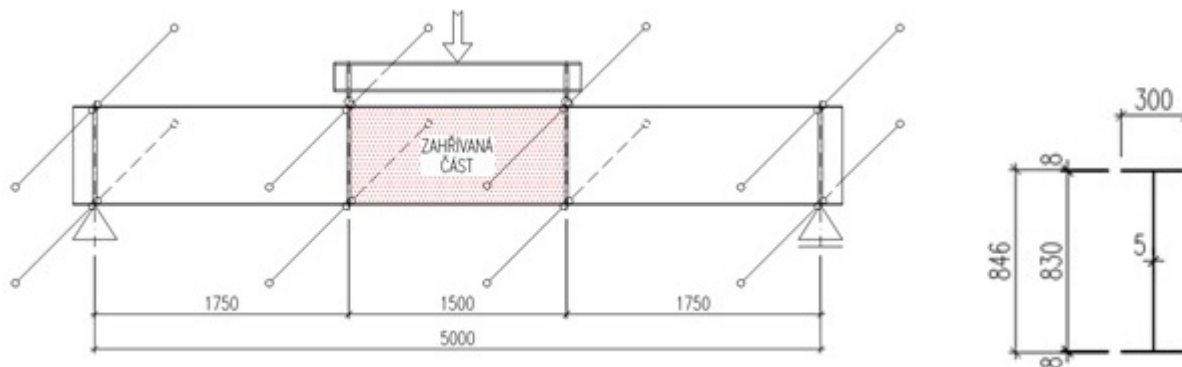
Tab. 1: Druhy analýz dle ČSN EN 1993-1-7 [2]

Typ zvolené analýzy je vždy závislý na řešeném problému a do značné míry ovlivňuje jeho výsledky. Z hlediska uvážení účinků přetvořené geometrie lze postupovat lineárně (rovnice rovnováhy jsou sestaveny na počáteční geometrii konstrukce), nebo geometricky nelineárně. Geometricky nelineární analýza používá rovnice rovnováhy na deformované konstrukci a nelineární geometrické vztahy (přibližně lze použít lineární geometrické vztahy jako u lineární analýzy a řešení se potom nazývá teorie 2. řádu; naopak lineární analýza se označuje jako řešení 1. řádu) [3].

2 Popis problému

Předmětem úlohy je posoudit únosnost příčně podepřeného nosníku s průřezem třídy 4 zatíženého ohybovým momentem při požáru (Test 1 – 450°C; Test 2 – 650°C). Úloha je shodná s experimenty provedenými v experimentálním centru ČVUT, statické schéma obr. 1. Samotný experiment spočíval ve zkoušce prostě podepřeného nosníku zatíženého symetricky dvojicí sil, tak aby střední zahřívaná část byla zatížena konstantním ohybovým momentem (bez působení smyku). Příčné držení bylo umístěno na koncích nosníků a v místě vnášení zatížení (na okrajích zahřívané části), aby nedocházelo ke ztrátě příčné a torzní stability. Nosník byl zkoušen v ustáleném stavu, což znamená, že zatížení bylo aplikováno až po zahřátí na požadovanou teplotu. Více informací o experimentech je možné najít v [4] a [5].

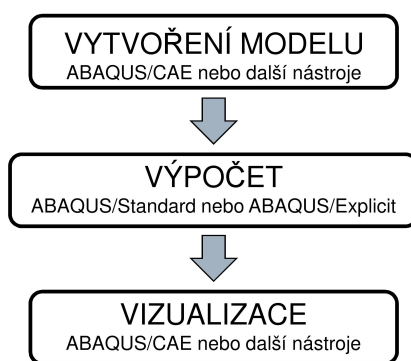
Výsledky numerických simulací budou porovnány s výsledky experimentů na základě působícího zatížení a vyvozené deformaci. Dosažené momentové únosnosti budou konfrontovány s ručním výpočtem podle ČSN EN 1993-1-2 [1].



Obr. 1: Statické schéma experimentu

3 Numerický model

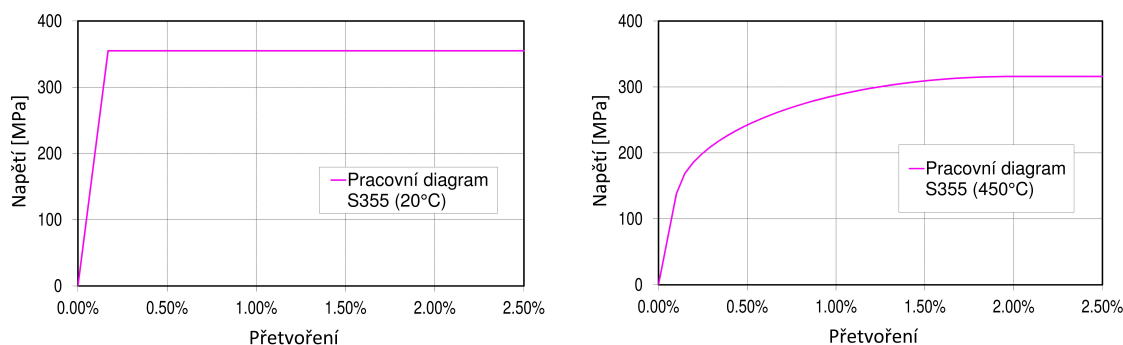
Model bude vytvořen pomocí předdefinovaných příkazů. Ty umožňují definovat geometrii a zadat veškeré parametry pro výpočet, jejich knihovnu nalezneme zde. K nalezení řešení problému je použit ABAQUS/Standard, který hledá řešení daného problému iteračním procesem (implicitní integrační schéma). Obecně lze numerické modelování v programu ABAQUSU rozdělit do tří částí, jak ukazuje obr. 2.



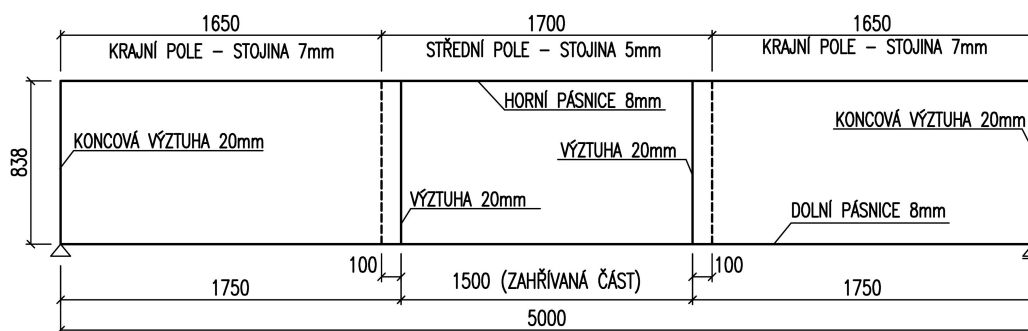
Obr. 2: Schéma numerické simulace v programu ABAQUS

Vzhledem ke štíhlosti průřezu bude numerický model vytvořen za použití deskostěnového modelu, umožňující zohlednit vliv lokálního boulení. Geometrii nosníku rozdělíme na čtyřhranné elementy typu S4 (plošné prvky). V první řadě je však nutné definovat uzly potřebné k zadání těchto elementů. Dále pak nadefinovat jednotlivé tloušťky prvků, teploty dílčích částí, okrajové podmínky, způsob zatížení a materiál. Použitý pracovní diagram se bude odvíjet od typu zvolené analýzy. Zatímco u pružnostní analýzy postačí definovat modul pružnosti a Poissonovo číslo, v případě materiálově nelineární analýzy je to navíc mez kluzu popřípadě funkce popisující nelinearitu materiálu. Pro uhlíkaté oceli při pokojové teplotě je možné použít zjednodušený bi-lineární pružno-plastický pracovní diagram, který s dostatečnou přesností vystihuje skutečné chování materiálu, obr. 3. Pokud je ocel vystavena vysokým teplotám dochází k degradaci materiálových vlastností. Obr. 3 ukazuje i pracovní diagram oceli S355 při 450°C, podle ČSN EN 1993-1-2 [1].

Data naměřená při experimentech budou použita k validaci numerického modelu a porovnání jednotlivých analýz. Modelovaná geometrie nosníku včetně tlouštěk plechů je znázorněna na obr. 4. Mez kluzu a modul pružnosti pro jednotlivé plechy vzaty z hodnot naměřených při tahových zkouškách při pokojové teplotě. Redukce materiálových vlast-



Obr. 3: Pracovní diagram oceli S355 při 20°C (vlevo) a při 450°C (vpravo)



Obr. 4: Geometrie nosníku

ností jako i nelinearita pracovního diagramu uvažována podle ČSN EN 1993-1-2 [1]. Tabulka 2 dává přehled o materiálových vlastnostech jednotlivých částí nosníku. V tabulce 5 jsou uvedeny průměrné teploty zahřívání částí.

	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Pásnice	341	194375
Stojina (střední pole)	385	209988
Stojina (krajní pole)	435	208900

Tab. 2: Materiálové vlastnosti při pokojové teplotě

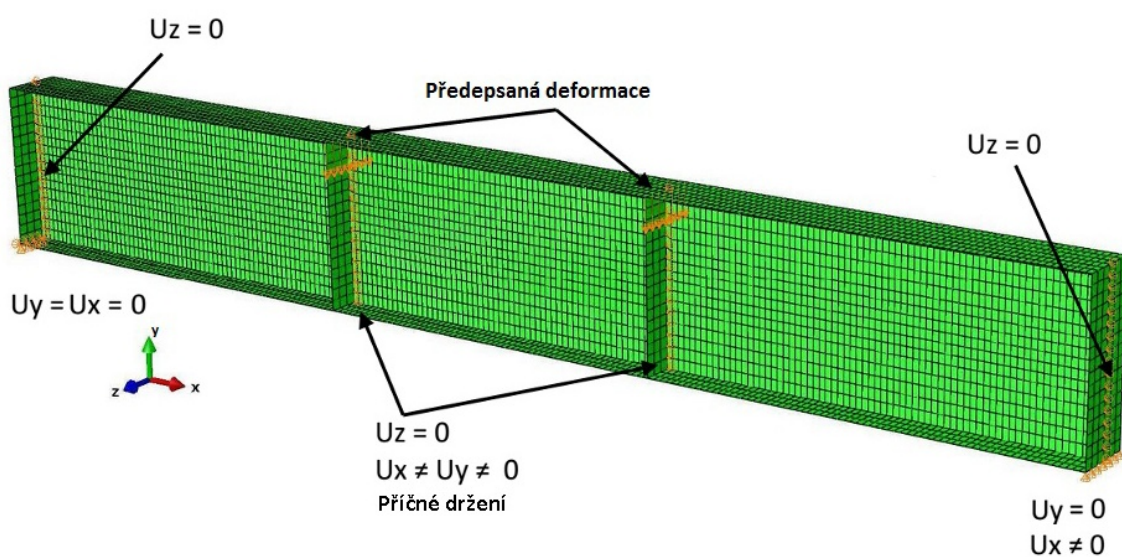
Obr. 5 definuje podepření nosníku, tedy okrajové podmínky, a zároveň polohu zatížení. V místě uložení je nosník podepřen proti posunu ve směru osy y po celé šířce pásnice. Jedna z podpor zabraňuje posunu ve směru osy x . Zatížení formou předepsané deformace je aplikováno na okrajích zahřívání části, pro všechny uzly na šířku pásnice.

Vzhledem k řešenému problému byl jako tvar počátečních imperfekcí použit nejnižší lokální způsob vybočení ze stabilitní analýzy, obr. 6 Amplituda imperfekce vychází z naměřených hodnot, viz tabulka 4. ¹

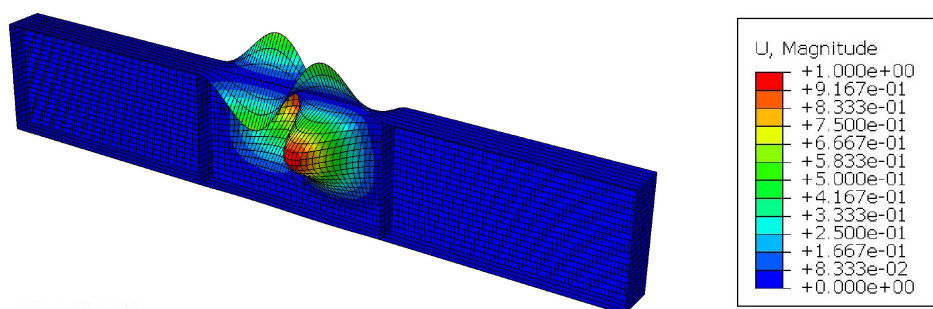
¹ Poznámka: Vlastní tvar nám definuje poměr deformace na stojině a pásnici (1: 0,59). Skutečné amplitudy jsou však v jiném poměru. Jako rozhodující volena amplituda dávající vyšší hodnoty pro obě z amplitud.

	Test 1 (450°C)	Test 2 (650°C)
Horní pásnice	481	661
Stojina	431	631
Spodní pásnice	425	641
Ostatní části	20	20

Tab. 3: Průměrné teploty °C při zkoušce



Obr. 5: Okrajové podmínky



Obr. 6: Vlastní tvar odpovídající nejnižšímu způsobu vybočení

	Test 1 (450°C)	Test 2 (650°C)
Tlačená pásnice	1,92	0,67
Stojina	2,36	1,6

Tab. 4: Amplitudy imperfekcí

4 Tvorba skriptu

Místo skriptu popisující celý numerický model řešeného problému zde budou uvedeny jednotlivé příkazy užitý pro vytvoření numerického modelu. Skladba příkazu bývá následující. V prvním řádku je uveden samotný příkaz, který bývá doplněn dalšími parametry dle typu příkazu. Ve druhém řádku jsou uvedeny konkrétní údaje týkající se zadávaného příkazu. Jednotlivé parametry vždy musí být odděleny čárkou. Desetinným oddělovačem je tečka.

Užitečnou pomůckou pro lepší orientaci ve skriptu může být vytvoření poznámky. Autorovu poznámku je možné do textu zapsat pomocí symbolu **. Např.:

****Dolní pásnice**

Zadání uzlu:

***NODE**

1 ,0 ,10 ,20

První řádek: *NODE vlastní příkaz (symbol * vždy značí začínající příkaz). Druhý řádek 1. Unikátní číslo uzlu. 2. – 4. Souřadnice uzlu ve smyslu $(x,y,z)=(0,10,20)$.

Někdy je třeba uzlům přiřadit stejné vlastnosti (např. teplotu, deformaci, atd.). V tomto případě se s výhodou použije následující příkaz umožňující seskupit uzly do jedné množiny (setu).

Seskupení uzlu do setu, či pojmenování unikátního uzlu:

***NSET ,NSET= A**

1 , 2 , 3

První řádek:

*NSET vlastní příkaz. Dodatkem NSET =A, přiřazujete jméno nově vzniklému setu uzlů (A).

Druhý řádek:

Uzly, které budou do setu přidány.

Pro usnadnění práce, tak aby nemusely být zadávány všechny uzly příkazem *NODE, je možné uzly vygenerovat pomocí příkazu *NFILL.

Generování uzlů:

***NFILL ,NSET=POLE1**

A ,B ,2 ,5

První řádek:

*NFILL vlastní příkaz. Dodatek NSET=POLE1 nám pojmenuje vygenerované pole uzlů (POLE1).

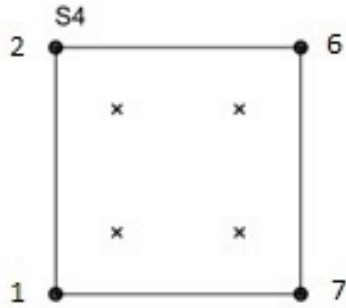
Druhý řádek:

1. Set uzlů tvořící první hranici generované oblasti
2. Set uzlů tvořící druhou hranici generované oblasti
3. Počet intervalů mezi hranicemi.
4. Nárůst v číslování (označení) uzlu

Zadání plošného prvku (elementu):

***ELEMENT ,TYPE= S4**

1 ,1 ,2 ,6 ,7



Obr. 7: Plošný prvek S4

První řádek: *ELEMENT vlastní příkaz. Parametr TYPE= označuje typ použitého plošného prvku. Druhý řádek: 1. Unikátní označení prvku. 2.– 5. Uzly vymezující daný element. Číslováno z levého dolního rohu ve směru chodu hodinových ručiček, obr. 7.

Pokud máme definovaný jeden element, je možné další vygenerovat (podobně jako u uzlů). Generování elementů:

```
*ELGEN ,ELSET=EPOLE1
1 ,4 ,1 ,1
```

První řádek:

*ELGEN vlastní příkaz. Dodatek ELSET=EPOLE1 nám pojmenuje skupinu vygenerovaných elementů (EPOLE1).

Druhý řádek:

1. Číslo základního elementu.
 2. Počet elementů, které budou generovány v řadě, zahrnující základní element.
 3. Přírůstek v číslech uzlů z elementu na element.
 4. Přírůstek v číslování elementů v řadě, z elementu na element.
- (Pomocí příkazu *ELGEN je možné generovat elementy i ve dvou směrech)

Definování tloušťky elementu a přiřazení materiálu:

```
*SHELL SECTION ,ELSET= EPOLE1,MATERIAL=steel_1
8
```

První řádek:

*SHELL SECTION vlastní příkaz. Dodatek ELSET=EPOLE1 říká kterým elementům (EPOLE1) budou vlastnosti přiřazeny. Poslední položka přiřazuje materiál.

Druhý řádek:

Tloušťka elementu v (mm).

Zadání imperfekcí je důležitým krokem numerických simulací. Níže je naznačena varianta, kdy imperfektní tvar je zaveden obdobou vlastních tvarů, spočtených ve stabilitní analýze.

Zadání imperfekcí obdobou vlastního tvaru:

```
*IMPERFECTION ,FILE=elasticbuckling ,STEP=1
1 ,1.6
```

První řádek:

*IMPERFECTION vlastní příkaz. Parametr FILE= odkazuje na jméno souboru, ze kterého bude vlastní tvar načten (soubor získaný při stabilitní analýze). Pro jaký krok mají být dané vlastnosti načteny, stanovíme parametrem STEP=.

Druhý řádek:

1. Číslo vlastního tvaru.
2. Amplituda imperfekce (mm).

Podle zvoleného typu analýzy definujeme pracovní diagram.

Definování materiálu (idealizovaný pracovní diagram pro 20°C, ocel S355):

```
*MATERIAL ,NAME=steel1
```

```
*ELASTIC
```

```
210000 ,0.3
```

```
*PLASTIC
```

```
355 ,0 ,20
```

První řádek:

*MATERIAL vlastní příkaz. Dále pak jméno materiálu (steel1), kterému budou vlastnosti přiřazeny.

Druhý řádek:

*ELASTIC příkaz, sloužící k nadefinování pružných vlastností materiálu.

Třetí řádek:

Zde je uveden modul pružnosti a Poissonovo číslo, popřípadě další vlastnosti.

Čtvrtý řádek:

*PLASTIC příkaz, sloužící k nadefinování plastických vlastností materiálu.

Pátý řádek:

1. Mez kluzu
2. Plastické poměrné přetvoření
3. Teplota materiálu

(Dále možno opakovat ve stejném duchu, např. pro různé teploty atd.)

V souladu s naším příkladem ukážeme zavedení teploty do modelu prostřednictvím počátečních podmínek. Podobným způsobem je možné definovat např. residuální napětí.

```
*INITIAL CONDITIONS ,TYPE=TEMPERATURE
```

```
POLE1 ,20 \\  
\\
```

První řádek:

*INITIAL CONDITIONS vlastní příkaz. Parametr TYPE= definuje, o jaké počáteční podmínky se jedná.

Druhý řádek:

1. Skupina uzlů
2. Teplota

Definování okrajových podmínek:

```
*BOUNDARY
```

```
A ,1 ,6
```

První řádek:

*BOUNDARY vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly, kterým je omezení přiděleno
2. První omezený stupeň volnosti
3. Poslední omezený stupeň volnosti ²

² Čísla 1 až 6 odpovídají stupňům volnosti ve smyslu: 1 - posun ve směru osy x; 2 - posun ve směru osy y; 3 - posun ve směru osy z; 4 - natočení kolem osy x; 5 - natočení kolem osy y; 6 - natočení kolem osy z

Výpočet je možno rozdělit do několika kroků (STEP). V každém je pak např. možné aplikovat část zatížení.

Definování kroku:

```
*STEP ,NLGEOM ,INC=150
```

První řádek:

*STEP vlastní příkaz. Použití parametru NLGEOM nastaví geometricky nelineární analýzu (vliv druhého řádu) v daném kroku. Vynecháním tohoto parametru je nastavena geometricky lineární analýza. Posledním parametrem nastavujeme maximální počet inkrementů v daném kroku, viz dále.

Pokud se nám jedná o výpočet kritického zatížení, použijeme stabilitní analýzu:

```
*BUCKLE ,EIGENSOLVER=lanczos
```

První řádek:

*BUCKLE vlastní příkaz. Parametrem EIGENSOLVER= nastavujeme způsob výpočtu vlastních tvarů, zde je to Lanczosova metoda. Další možností je iterace podprostoru.

V případě statické analýzy:

```
*STATIC
```

```
0.001 ,1 ,0.0005 ,0.01
```

První řádek:

*STATIC vlastní příkaz. Je možné doplnit o parametr RIKS, čímž získáme sestupnou větev na zatěžovacím diagramu, viz zde.

Druhý řádek:

1. Délka počátečního inkrementu
2. Délka kroku
3. Minimální délka inkrementu
4. Maximální délka inkrementu

Zatížení je možno definovat předepsaným posunem či pootočením, nebo působící silou.

Zatížení posunem:

```
*BOUNDARY
```

```
B ,2 ,2 ,50
```

První řádek:

*BOUNDARY vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly kde je deformace předepsána
2. První stupeň volnosti kde je deformace umožněna
3. Poslední stupeň volnosti kde je deformace umožněna
4. Velikost deformace v [mm]

Zatížení silou:

```
*CLOAD
```

```
B ,2 , -1000
```

První řádek:

*CLOAD vlastní příkaz.

Druhý řádek:

1. Uzly kde je zatížení předepsáno

2. Směr působení zatížení

3. Velikost zatížení v [N]

Pro lepší dostupnost výsledků je možné je nechat vypsát do „history output“.

```
*OUTPUT ,HISTORY
```

Žádané deformace a napětí je však třeba nadefinovat.

```
*NODE OUTPUT ,NSET=B
```

```
U2, UR3
```

První řádek:

*NODE OUTPUT vlastní příkaz. Parametrem NSET= definujeme uzly, pro která má být požadovaná deformace zanesena do databáze.

Druhý řádek:

Posuny a pootočení, které budou vykresleny.

```
*ELEMENT OUTPUT ,NSET=E_POLE1
```

```
MISES
```

První řádek:

*ELEMENT OUTPUT vlastní příkaz. Parametrem NSET= definujeme element(y), pro která má být (v tomto případě) napětí podle misise zanesena do databáze.

Deformace a přetvoření, která nebyla definována, je možné najít ve „field output“ což je trochu pracnější.

Nadefinováním všech parametrů modelu byl získán vstupní soubor pro numerickou simulaci tzv. „input file“ (koncovka souboru musí být ve tvaru .inp). Spuštění výpočtu je pomocí následujícího příkazu z příkazové řádky (případně přímo z Abaqus/CAE:

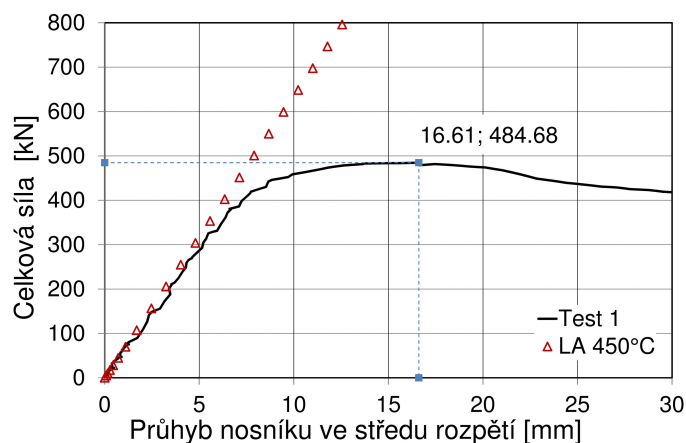
```
abaqus job=JMENO VSTUPNÍHO SOUBORU interactive
```

5 Porovnání jednotlivých druhů analýz s experimentem

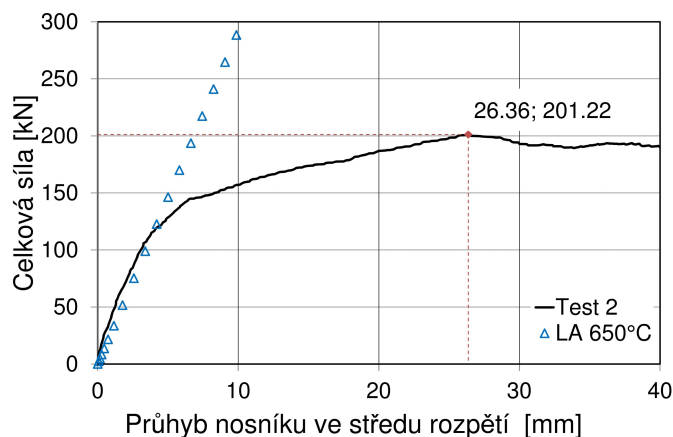
Výsledky numerických simulací vybraných analýz jsou porovnány na následujících grafech.

5.1 Lineární pružnostní analýza (LA)

Výpočet podle teorie 1. řádu. Chování materiálu lineární (postačí definovat modul pružnosti a Poissonovo číslo). Geometrie konstrukce ideální. Vnitřní síly a přetvoření spočtené touto analýzou budou shodné s výsledky např. deformační metody. Porovnání s experimentem ukazuje obr. 8 a 9. Celková síla je součtem reakcí z podpor (resp. hodnota z lisu), tedy odpovídá celkovému zatížení nosníku.



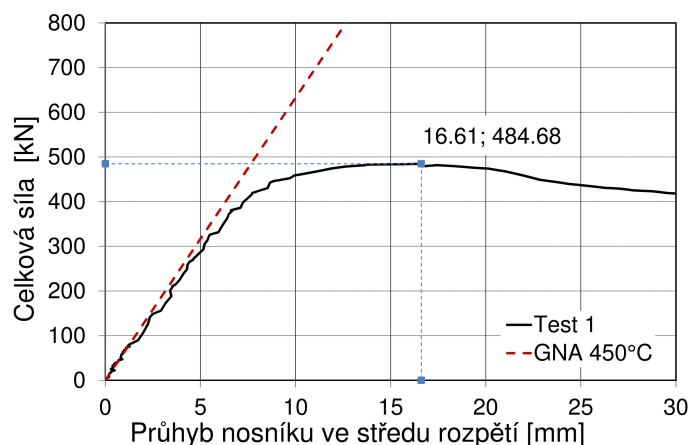
Obr. 8: Lineární pružnostní analýza v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



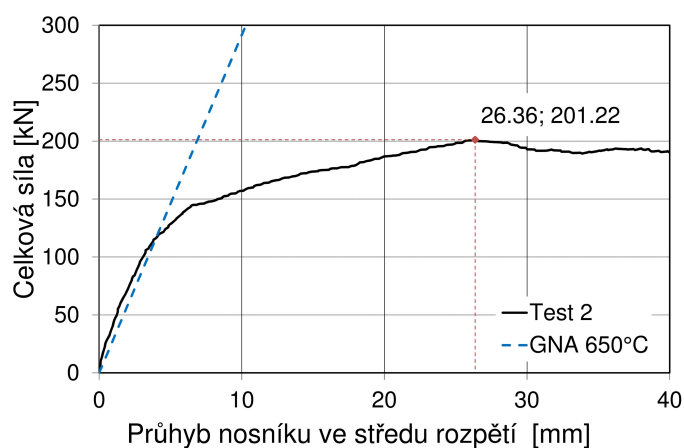
Obr. 9: Lineární pružnostní analýza v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)

5.2 Geometricky nelineární pružnostní analýza (GNA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Chování materiálu lineární. Geometrie konstrukce ideální. Porovnání s experimentem ukazuje obr. 10 a 11. Vzhledem k povaze zatížení je průběh grafu do značné míry shodný s pružnostní analýzou. Větší rozdíly mezi analýzami by bylo možné pozorovat při současném působení ohybového momentu a tlakové síly.



Obr. 10: Geometricky nelineární pružnostní analýza v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



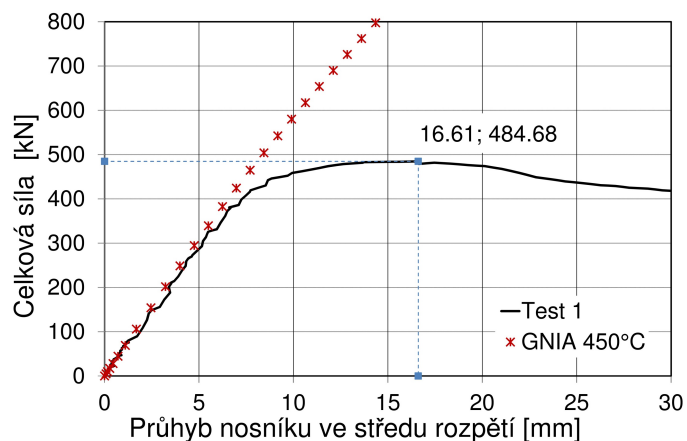
Obr. 11: Geometricky nelineární pružnostní analýza v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)

5.3 Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi (GNIA)

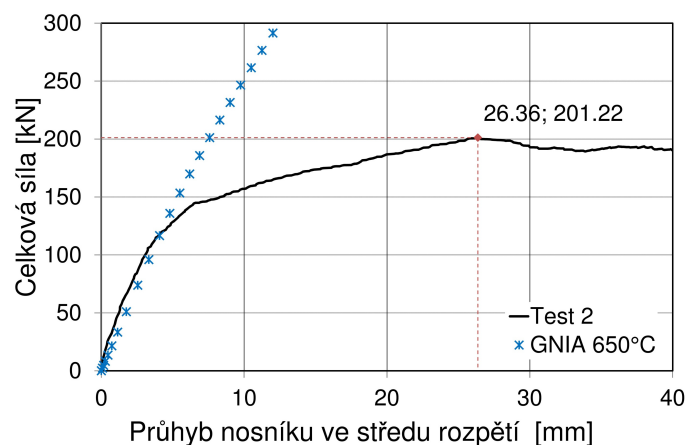
Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce imperfektní. Chování materiálu lineární. Geometrie konstrukce imperfektní. Porovnání s experimentem ukazuje obr. 12 a 13. Zavedením imperfekcí do modelu dochází k rychlejšímu nárůstu deformace pro stejné zatížení, viz obr. 20 a 21.

5.4 Geometricky a materiálově nelineární analýza (GMNA)

Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce ideální. Chování materiálu nelineární. Materiál byl definován stejnou cestou jako na obr. 3. Mez kluzu a modul pružnosti vzaty z hodnot naměřených při tahových zkouškách při 20°C. Redukce materiálových vlastností i nelinearita pracovního diagramu uvažována podle ČSN EN 1993-1-2 [1]. Porovnání s experimentem ukazuje obr. 14 a 15.



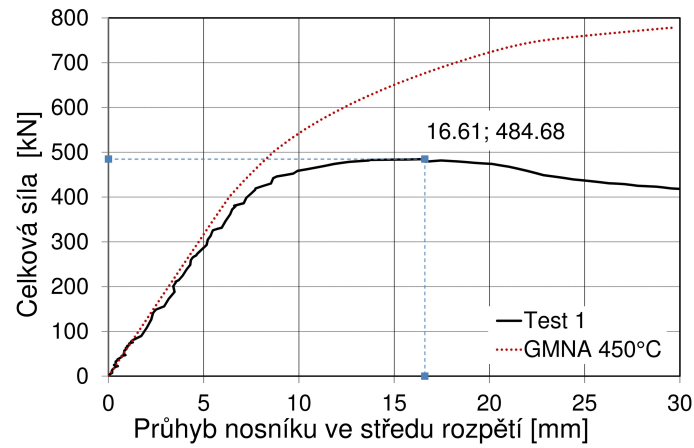
Obr. 12: Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



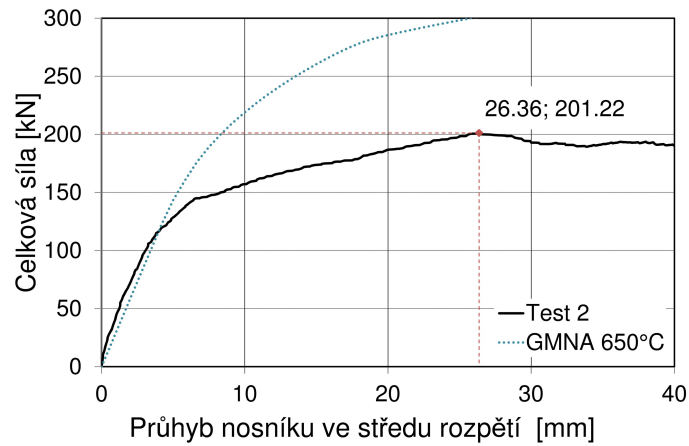
Obr. 13: Geometricky nelineární pružnostní analýza s imperfekcemi v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)

5.5 Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi (GMNIA)

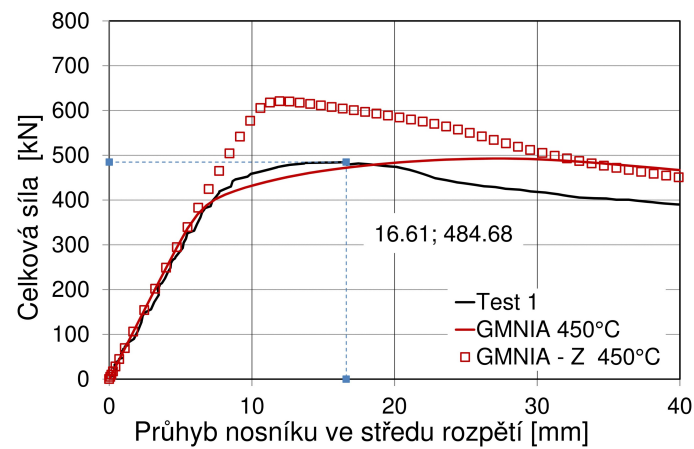
Výpočet podle teorie 2. řádu. Geometrie konstrukce imperfektní. Chování materiálu nelineární. Experiment je porovnán s výsledky dvou numerických simulací lišících se v nelinearitě materiálu, obr. 16 a 17. Křivka s označením GMNIA byla spočtena pro nelineární pružno-plastický pracovní diagram, viz obr. 3. Zatímco křivka s označením GMNIA-Z byla spočtena pro bi-lineární pružno-plastický pracovní diagram, viz obr. 3.



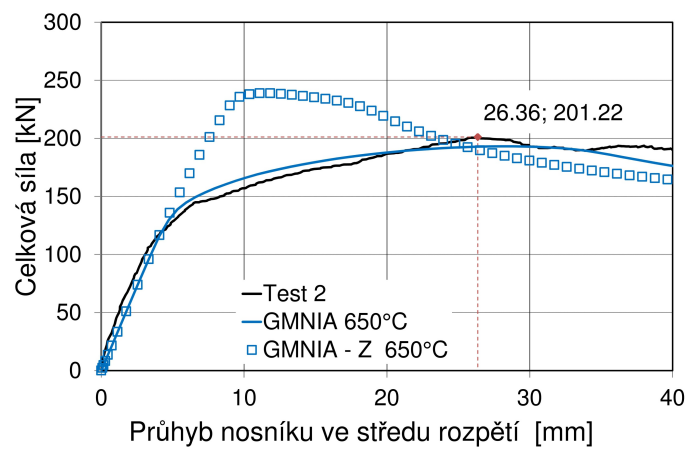
Obr. 14: Geometricky a materiálově nelineární analýza v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



Obr. 15: Geometricky a materiálově nelineární analýza v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)



Obr. 16: Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



Obr. 17: Geometricky a materiálově nelineární analýza s imperfekcemi v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)

6 Ruční výpočet

Pro snazší proveditelnost výpočtu je nutné přijmout některá zjednodušení. Nosník je konstantního průřezu, viz obr. 4 – střední pole. Materiálové charakteristiky celého nosníku odpovídají pásnici jako rozhodujícímu prvku při ohybu.

Výška stojiny	$h_w = 830 \text{ mm}$
Tloušťka stojiny	$t_w = 5 \text{ mm}$
Šířka pásnice	$b_f = 300 \text{ mm}$
Tloušťka stojiny	$t_f = 8 \text{ mm}$
Délka příčně nepodepřené části	$L = 1500 \text{ mm}$
Mez kluzu	$f_y = 341 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	$E = 194375 \text{ MPa}$

Klasifikace průřezu. Pro jednoduché výpočetní modely lze průřezy klasifikovat jako při návrhu za běžné teploty s použitím upravené hodnoty ε podle výrazu:

$$\varepsilon = 0,85[235/f_y]^{0,5} = 0,85[235/341]^{0,5} = 0,751$$

Klasifikace stojiny:

$$\frac{c}{t_w} = \frac{832}{5} = 166,4 > 124\varepsilon = 124 \cdot 0,7506 = 93,1 \Rightarrow \text{stojina třídy 4.}$$

Klasifikace pásnice:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{148}{8} = 18,5 > 14\varepsilon = 14 \cdot 0,751 = 10,51 \Rightarrow \text{pásnice třídy 4.}$$

Posuzovaný průřez je třídy 4.

Průřezové charakteristiky:

Podle přílohy E normy ČSN EN 1993-1-2 se průřezové charakteristiky pro průřez třídy 4 mají stanovit podle ČSN EN 1993-1-5, tj. vycházet z vlastností materiálu při 20°C.

Poměrná štíhlost pásnice	$\bar{\lambda}_p = 1,19$
Součinitel boulení stěny	$\rho = 0,71$
Poměrná štíhlost stojiny	$\bar{\lambda}_p = 1,71$
Součinitel boulení stěny	$\rho = 0,54$
Efektivní průřezový modul	$W_{y,\text{eff}} = 1769521 \text{ mm}^3$

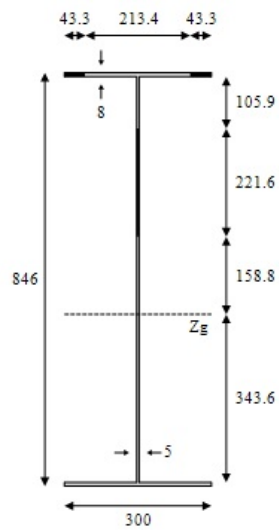
Průřezové charakteristiky spočteny v programu SC-Steel Class.

Efektivní průřez viz obr. 18.

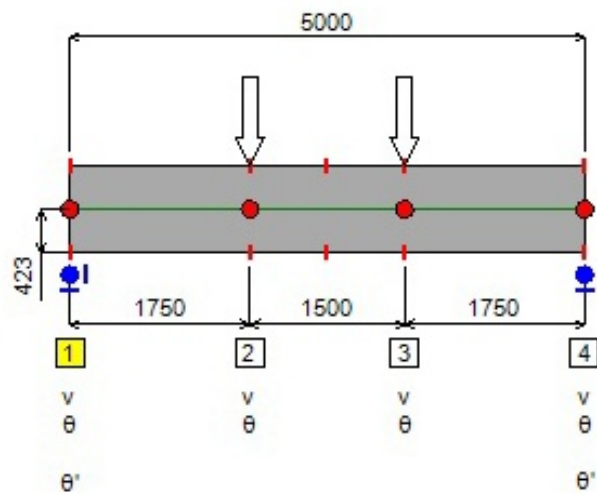
$$\text{Kritický moment při 20°C} \quad M_{cr} = 17166 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Kritický moment spočten programem LTBeamN. Okrajové podmínky a způsob zatížení definuje obr. 19.³

³ Okrajové podmínky definovány bezpečně. Výztuhy v místě vnášení zatížení částečně omezují deplaci, míru omezení je však těžké posoudit. Do výpočtu proto nebylo zahrnuto. S omezením deplanace v místě vnášení zatížení je kritický moment dvojnásobný ($35520 \times 10^6 \text{ Nmm}$).



Obr. 18: Efektivní průřez



Obr. 19: Okrajové podmínky

6.1 Stanovení momentové únosnosti nosníku při 450°C

Momentová únosnost při požáru:

$$M_{\theta,Rd} = k_{p0,2,\theta} \cdot f_y \cdot W_{y,eff} \cdot [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,\theta}] = 0,59 \cdot 341 \cdot 1769521 = 356,010 \cdot 10^6 Nmm$$

Kde

$k_{p0,2,\theta}$ je redukční součinitel (vztažený k f_y) pro návrhovou mez kluzu průřezů třídy 4 při teplotě oceli θ

Posouzení ztráty příčné a torzní stability

I přes velmi malou štíhlost na klopení, viz dále, je třeba posoudit momentovou únosnost při ztrátě příčné a torzní stability za požáru (délka posuzovaného úseku 1500mm), což je důsledkem nulového plata.

Momentová únosnost nosníku, který není zajištěn proti ztrátě stability při ohybu (za požáru):

$$M_{b,\theta,Rd} = \chi_{LT,\theta} W_{y,eff} \frac{f_y \cdot k_{p0,2,\theta}}{\gamma_{M,\theta}} = 0,91 \cdot 1769521 \cdot \frac{341 \cdot 0,59}{1} = 323,861 \cdot 10^6 Nmm$$

Součinitel klopení při návrhové požární situaci:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \lambda_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,564 + \sqrt{0,564^2 - 0,179^2}} = 0,910$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2] = 0,5 [1 + 0,54 \cdot 0,179 + (0,179)^2] = 0,564$$

Součinitel imperfekce:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} = 0,65 \sqrt{235/341} = 0,540$$

Poměrná štíhlost při klopení za požáru:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{p0,2,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5} = 0,188 \cdot [0,59/0,65]^{0,5} = 0,179$$

Kde

$k_{E,\theta}$ je redukční součinitel meze kluzu při teplotě oceli θ

Poměrná štíhlost při klopení:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1773769 \cdot 341}{17166 \cdot 10^6}} = 0,188$$

6.2 Stanovení momentové únosnosti nosníku při 650°C

Momentová únosnost při požáru:

$$M_{\theta,Rd} = k_{p0,2,\theta} \cdot f_y \cdot W_{y,eff} \cdot [\gamma_{M,0}/\gamma_{M,\theta}] = 0,22 \cdot 341 \cdot 1769521 = 132,749 \cdot 10^6 Nmm$$

Momentová únosnost nosníku, který není zajištěn proti ztrátě stability při ohybu (za požáru):

$$M_{b,\theta,Rd} = \chi_{LT,\theta} W_{y,eff} \frac{f_y \cdot k_{p0,2,\theta}}{\gamma_{M,\theta}} = 0,9 \cdot 1769521 \cdot \frac{341 \cdot 0,22}{1} = 120,051 \cdot 10^6 Nmm$$

(kritický moment vzat bezpečně, skutečná únosnost je větší)

Součinitel klopení při návrhové požární situaci:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \lambda_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{0,569 + \sqrt{0,569^2 - 0,190^2}} = 0,900$$

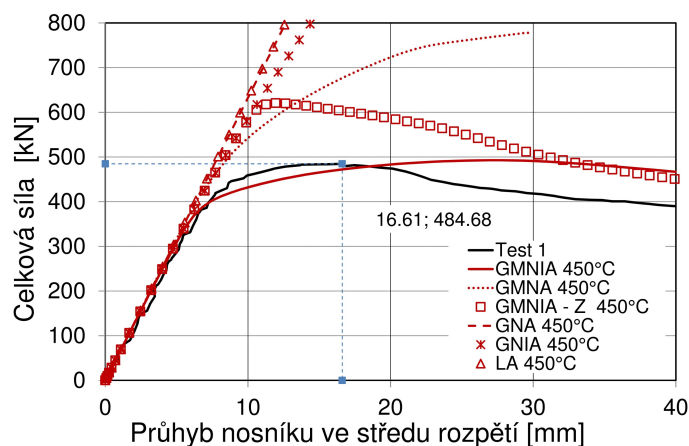
$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2] = 0,5 [1 + 0,54 \cdot 0,190 + (0,190)^2] = 0,569$$

Poměrná štíhlost při klopení za požáru:

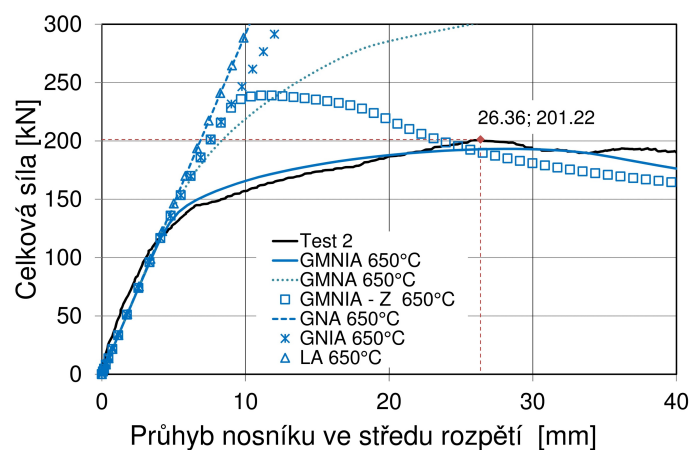
$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{p0,2,\theta}/k_{E,\theta}]^{0,5} = 0,188 \cdot [0,22/0,215]^{0,5} = 0,190$$

7 Celkové porovnání

Na obr. 20 a 21 jsou ukázány všechny výše popsané druhy analýz v porovnání s experimenty. Skutečné působení nosníku nejlépe vystihuje analýza GMNIA, která umožňuje zohlednit nelinearitu materiálu i imperfektní tvar konstrukce. Jak bylo ukázáno, je však nezbytné mít dostatek informací o imperfektním tvaru konstrukce a dostatečně výstižný materiálový model. Nevýhodou této analýzy je doba výpočtu. Tabulka 5 ukazuje porovnání experimentů s analýzou GMNIA a současným návrhovým přístupem podle eurokodu. Z výsledků je patrné, že numerické modely dávají dobrou shodu s experimenty. Posouzení podle současného eurokodů se v tomto případě jeví konzervativně (zejména momentová únosnost při prostém ohybu). V současné době probíhá výzkum zaměřený na momentovou únosnost nosníku s průřezem třídy 4 za požáru, který má za cíl zlepšit návrhový model.



Obr. 20: Numerické simulace v porovnání s experimentem (test 1, 450°C)



Obr. 21: Numerické simulace v porovnání s experimentem (test 2, 650°C)

Momentová únosnost nosníku	TEST	GMNIA	GMNIA-Z	EC3
450°C	424,1 kNm	431,08 kNm	543,0 kNm	323,9 kNm (356,1)
650°C	176,1 kNm	169,03kNm	209,0 kNm	120,1 kNm (132,7)

V závorce je uvedena momentová únosnost při prostém ohybu.

Tab. 5: Průměrné teploty °C při zkoušce

Reference

- [1] *ČSN EN 1993-1-2 Eurokod 3 – Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-2: Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru.* ČNI, 2006.
- [2] *ČSN EN 1993-1-7. Eurokod 3 – Navrhování ocelových konstrukcí, Část 1-7: Příčně zatížené deskostěnové konstrukce.* ČNI, 2007.
- [3] *Navrhování ocelových konstrukcí, příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8, Navrhování hliníkových konstrukcí příručka k ČSN EN 1999-1.* ČKAIT, Praha, 2009, ISBN 978-80-87093-86-3.
- [4] Hricák J., W. F., Jandera M.: Local Buckling of Class 4 Sections at Elevated Temperature. *In Proceedings of International Conference Applications of Structural Fire Engineering*, 2013: s. 226–231.
- [5] Prachař, J. M. W. F., M.: Fire Tests on Beam with Class 4 Cross-section Subjected to Lateral Torsional Buckling. *In Proceedings of International Conference Applications of Structural Fire Engineering*, 2013: s. 173–178.