



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky**

Přechod od rozptýleného k lokalizovanému poškození za ohybu

Transition from Diffuse to Localized Damage under Bending

bakalářská práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Prof. Ing. Milan Jirásek DrSc.

Vladimír Vančík

Praha 2013

Obsah

Obsah	2
1 Popis materiálových modelů	4
1.1 Lokální izotropní model poškození	4
1.1.1 Ekvivalentní deformace	5
1.2 Nelokální izotropní model poškození	5
1.3 Použité modely v programu OOFEM	5
2 Výpočty s lokálním izotropním modelem	6
2.1 Chování v jednoosém tahu.....	6
2.2 Předpokládané chování v ohybu.....	6
2.3 Předpis okrajových podmínek.....	6
2.4 Vyvolání lokalizace	7
2.5 Vyhodnocení výpočtů.....	7
3 Výpočty s nelokálním modelem	11
3.1 Předpis okrajových podmínek.....	11
3.2 Vyvolání lokalizace	12
3.3 Vyhodnocení výpočtů.....	12
Literatura	16

Abstrakt

V důsledku lokalizace poškození dochází při výpočtech MKP za použití lokálního modelu poškození k patologické závislosti řešení na zvolené síti. V [1] je popsán způsob potlačení této závislosti pomocí úpravy materiálových parametrů podle velikosti prvku, což dobře funguje v jednoosém tahu. Tato práce se zabývá lokalizací poškození na nosníku zatíženém konstantním momentem. Nejprve použijeme způsob potlačení závislosti na síti známý z [1] a prozkoumáme jeho použitelnost. Poté pro stejný nosník použijeme nelokální model poškození, od kterého očekáváme konvergenci bez jakýchkoli úprav materiálových parametrů. Výpočty MKP budou prováděny pomocí programu OOFEM. K vytvoření vstupního souboru se sítí konečných prvků budou použity vlastní C++ programy.

Abstract

When using a local damage model, solution obtained with FEM shows a pathological dependency on the mesh, which is caused by damage localization. [1] describe a way to suppress such dependency by adjusting material parameters according to the size of an element, which works well under uniaxial tension. This paper focuses on damage localization on a beam subjected to a constant bending moment. First, we will use the technique described in [1] and explore its usability. Then we will use a nonlocal damage model for the same beam. With the nonlocal model we expect convergence without having to make any adjustments to the material parameters. The FEM calculations will be done using OOFEM. Self-made C++ programs will be used to generate input files for the FEM calculations.

1 Popis materiálových modelů

Tato část je věnována popisu použitých materiálových modelů. Jsou zde uvedeny základní matematické vztahy a materiálové konstanty.

1.1 Lokální izotropní model poškození

Nejjednodušší izotropní model poškození zavádí jediný skalární parametr poškození ω . Poškození snižuje tuhost materiálu ve všech směrech stejně. Všechny prvky matice tuhosti se tedy v důsledku poškození redukují stejným způsobem a obecný Hookeův zákon má potom tvar

$$\sigma = D_s \varepsilon = (1 - \omega) D_e \varepsilon \quad (1)$$

kde σ je vektor napětí, ε vektor deformací, D_s matice sečné tuhosti, D_e matice pružné tuhosti a ω parametr poškození.

Pro stanovení parametru poškození se zavádí veličina ekvivalentní deformace $\tilde{\varepsilon}$, což je opět skalární veličina, stanovená ze složek deformace na základě konkrétního předpisu. Poškození je pak definováno v závislosti na proměnné κ , která odpovídá nejvyšší hodnotě ekvivalentní deformace dosažené v dosavadním průběhu zatěžování.

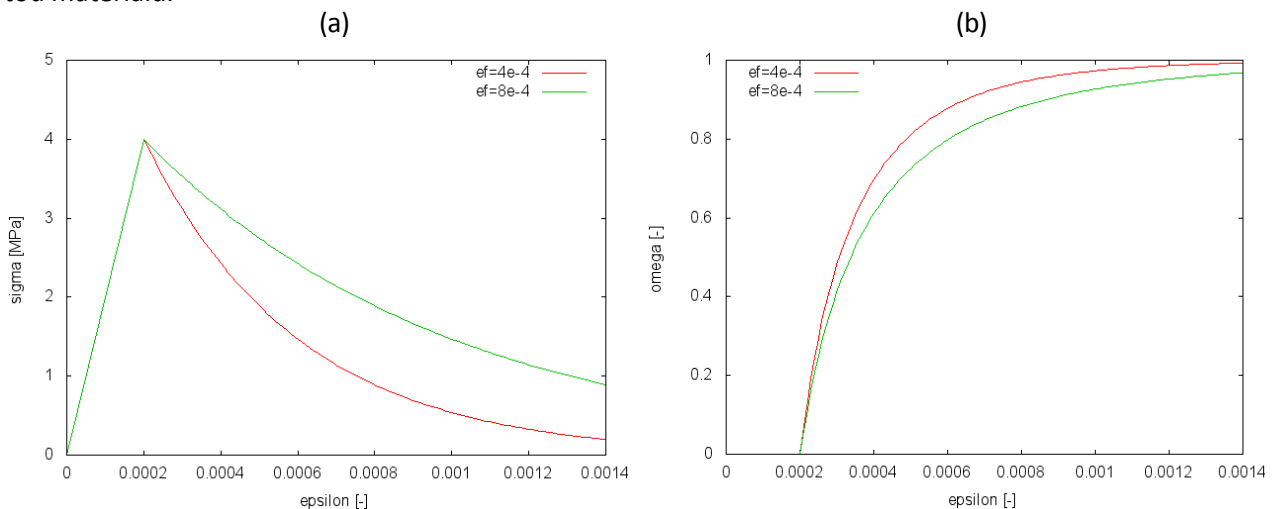
$$\omega = f(\kappa) \quad (2)$$

Konkrétní závislost poškození na proměnné κ lze zvolit různě, v našem případě použijeme předpis odpovídající exponenciálnímu změkčení.

$$f(\kappa) = 0 \quad \text{pro } 0 \leq \kappa \leq \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$f(\kappa) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\kappa} \exp\left(-\frac{\kappa - \varepsilon_0}{\varepsilon_f}\right) \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \kappa \quad (4)$$

Objevuje se zde konstanta ε_0 , což je mezní hodnota ekvivalentní deformace, po jejímž překročení se materiál začíná poškozovat. Další konstanta ε_f ovlivňuje průběh funkce poškození a souvisí s duktilitou materiálu.



Obrázek 1: Závislost (a) napětí a (b) poškození na deformaci pro $E = 20 \text{ GPa}$, $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^{-4}$, různé ε_f

1.1.1 Ekvivalentní deformace

Ve výpočtech používáme vyhlazené Rankinovo kritérium, které definuje ekvivalentní deformaci pomocí normy kladné části efektivního napětí.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{E} \|\langle \bar{\sigma} \rangle\|_{\sigma} = \frac{1}{E} \sqrt{\langle \bar{\sigma}_1 \rangle^2 + \langle \bar{\sigma}_2 \rangle^2 + \langle \bar{\sigma}_3 \rangle^2} \quad (5)$$

kde závorky $\langle . \rangle$ značí kladnou část čísla. Kladnou částí čísla rozumíme číslo samo, pokud je kladné, nebo nulu, pokud není. Platí tedy $\langle x \rangle = \max(0, x)$

1.2 Nelokální izotropní model poškození

V použitém nelokálním modelu se jako řídicí proměnná pro vývoj poškození používá nelokální ekvivalentní deformace $\bar{\varepsilon}$, definovaná jako vážený průměr lokální ekvivalentní deformace $\bar{\varepsilon}$ z určené oblasti.

$$\bar{\varepsilon}(x) = \int_V \alpha(x, \xi) \bar{\varepsilon}(\xi) d\xi \quad (6)$$

kde $\alpha(x, \xi)$ je normovaná váhová funkce. Váhová funkce použitá ve výpočtech vychází z funkce

$$\alpha_0(s) = \left\langle 1 - \frac{s^2}{R^2} \right\rangle^2 \quad (7)$$

kde R je poloměr nelokální interakce a s je vzdálenost bodů x a ξ . Pro $s \geq R$ má funkce α_0 nulovou hodnotu.

Vzhledem k tomu, že pracujeme s konečným tělesem, objem přispívající k nelokální deformaci se v blízkosti hranice snižuje. Vždy ale musí být splněna normalizační podmínka

$$\int_V \alpha(x, \xi) d\xi = 1 \quad (8)$$

Toho lze docílit použitím nelokální váhové funkce ve tvaru

$$\alpha(x, \xi) = \frac{\alpha_0(\|x - \xi\|)}{V_r(x)} \quad (9)$$

kde referenční objem V_r je definován

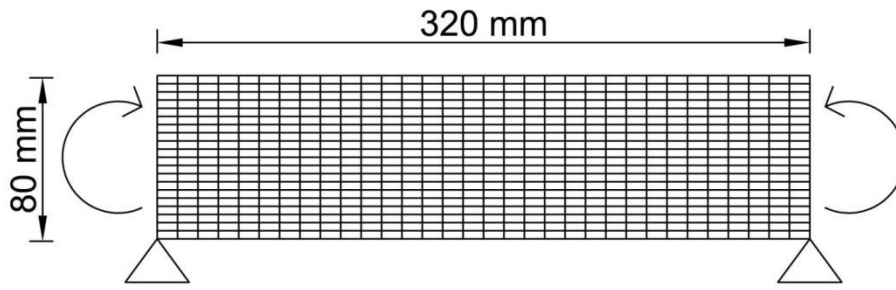
$$V_r(x) = \int_V \alpha_0(\|x - \xi\|) d\xi \quad (10)$$

1.3 Použité modely v programu OOFEM

Lokální i nelokální verze izotropního modelu poškození jsou implementovány v OOFEMu pod názvy idm1 a idmnl1.

2 Výpočty s lokálním izotropním modelem

Pro výpočty metodou konečných prvků (MKP) používáme nosník o rozměrech 320 x 80 mm rozdělený různě hustými sítěmi. Nosník je zatěžován pootočením konců, což do něj vnáší konstantní ohybový moment.



Obrázek 2: Nosník se základní sítí 32 x 20 prvků.

2.1 Chování v jednoosém tahu

Když analyzujeme chování prutu z materiálu s lokálním modelem poškození za jednoosého tahu MKP, zjistíme, že po dosažení meze pevnosti (resp. vrcholu pracovního diagramu materiálu) dochází k poškození pouze jednoho prvku a pružnému odtěžování všech ostatních. Tento jev může být vyvolán drobnými zaokrouhlovacími chybami ve výpočtu nebo nepatrným snížením tuhosti jednoho prvku. Znamená to, že práce potřebná k porušení celého prutu je rovna práci na porušení jednoho prvku a materiál vykazuje tím křehčí chování, čím jemnější síť zvolíme. Odstranění této závislosti lze docílit snížením či zvýšením duktility materiálu (parametru ϵ_f) nepřímo úměrně k velikosti prvku tak, aby práce potřebná k porušení jednoho prvku zůstala vždy stejná.

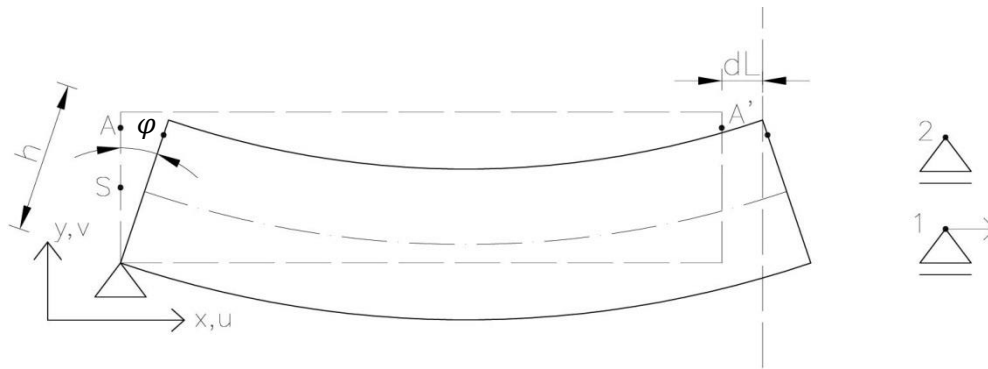
2.2 Předpokládané chování v ohybu

Pro nosník zatížený konstantním momentem očekáváme, že se nejprve začne při taženém okraji otvírat větší množství trhlin. V okolí těchto trhlin se začne snižovat napětí a dojde k jejich vzájemnému „stínění“. Dále se tedy budou šířit jen některé trhliny, přičemž nakonec zůstane jen jedna. Na základě předpokladu, že se nakonec poškození lokalizuje do jedné svislé vrstvy prvků, zkusíme uplatnit stejný postup odstranění závislosti na síti jako v případě jednoosého tahu.

2.3 Předpis okrajových podmínek

Jako první pokus o předepsání koncových pootočení byly uzly v koncových průřezech spojeny tuhými rameny a pootočení byla předepisována přímo uzlům uprostřed těchto ramen. Tento způsob řízení ale selhává, protože v důsledku vnutené rovinnosti koncového průřezu dojde k lokalizaci poškození do krajních prvků.

Jako nejlepší způsob se jeví tzv. periodické okrajové podmínky, které lze předepsat pomocí závislých uzlů. V průběhu dalšího popisu okrajových podmínek budeme používat značení uzlů podle Obrázku 3.



Obrázek 3: Znázornění předpisu periodických okrajových podmínek

Pro řízení výpočtu vytvoříme jeden řídicí uzel (uzel 1), ve kterém první stupeň volnosti u_1 bude reprezentovat rozdíl pootočení levého a pravého konce. Další pomocný uzel (uzel 2), bude umožňovat volné protažení střednice (tedy $u_2 = \Delta L$). Vodorovný posun uzlu A' potom bude předepsán jako

$$u_{A'} = u_A + u_2 + (y_S - y_{A'}) * u_1 \quad (11)$$

příčemž y_S je svislá souřadnice střednice. Za předpokladu malých hodnot úhlu φ potom platí

$$\varphi = \frac{\frac{h}{2} * u_1}{h} = \frac{u_1}{2} \quad (12)$$

tedy pokud rozdíl pootočení konců $\Delta\varphi = 2 * \varphi$, platí $u_1 = \Delta\varphi$.

2.4 Vyvolání lokalizace

Pokud necháme ohýbaný nosník naprosto homogenní, pak v závislosti na zvolené přesnosti výpočtu mohou nastat dva případy: Pokud bude přesnost dostatečně velká, k lokalizaci vůbec nedojde, a poškození se bude šířit rovnoměrně od spodního okraje. V opačném případě může dojít k lokalizaci v důsledku drobných zaokrouhlovacích chyb ve výpočtu. Za účelem vyvolání postupné lokalizace tedy oslabíme jednotlivé prvky spodního okraje následujícím způsobem: Liché prvky zůstanou neoslabené, každý 2. prvek oslaben o $1 \times dE$, každý 4. prvek o $2 \times dE$, každý 8. o $3 \times dE$ atd. podle hustoty sítě, přičemž prvek na konci se prohodí s prvkem uprostřed, aby byla největší trhлина uprostřed nosníku.

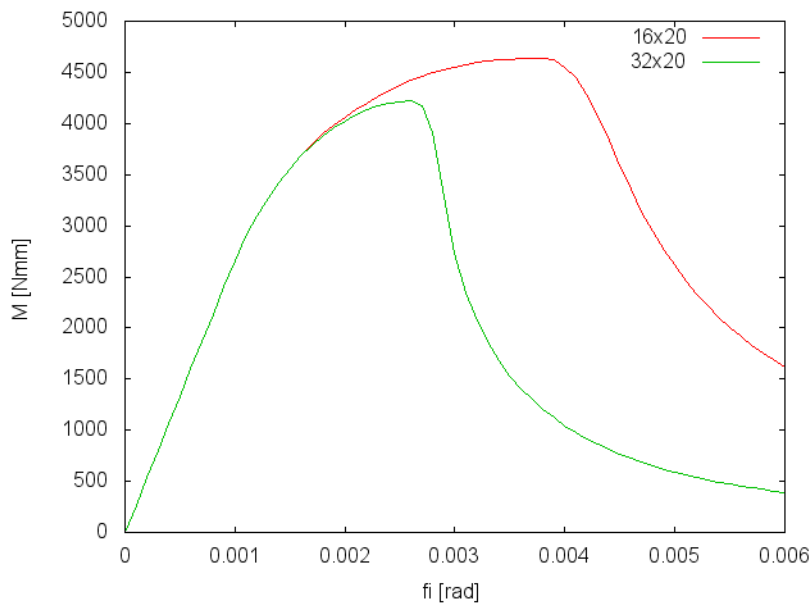
2.5 Vyhodnocení výpočtů

Pro výpočty s lokálním modelem byly použity následující hodnoty materiálových parametrů:

Modul pružnosti	$E = 20 \text{ GPa}$
Mezní elastická deformace	$\varepsilon_0 = 1,2 * 10^{-4}$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,2$
Snížení modulu pružnosti	$dE = 0,01 \text{ GPa}$

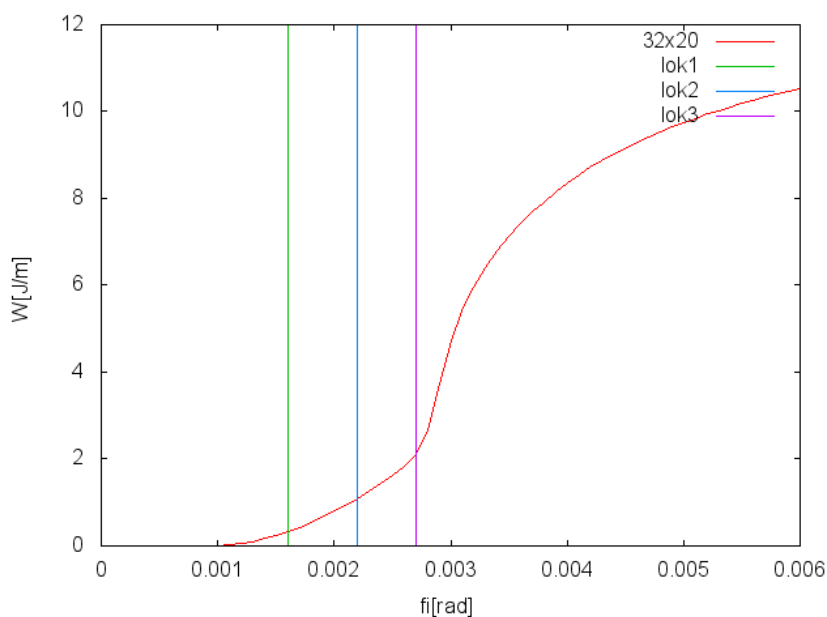
Jako základní síť použijeme síť 32×20 prvků s parametrem $\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$ počítanou v 60 krocích s přírůstkem pootočení $1 * 10^{-4}$ rad na 1 krok. Pracovního diagramu spočteného s těmito vstupními údaji se budeme snažit dosáhnout na ostatních sítích pomocí úpravy parametru ε_f .

Pro ověření hypotézy o vlivu velikosti prvku zkusíme nejdříve spustit výpočet pro sítě 16 x 20 a 32 x 20 se stejným parametrem $\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$. Z výsledků na obrázku 4 je vidět, že pro hrubší síť se materiál skutečně chová duktilněji.



Obrázek 4: Pracovní diagramy pro sítě 16 x 20 a 32 x 20 a $\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$

Když sledujeme poškození v průběhu výpočtu, zjistíme, že lokalizace probíhá v souladu s použitým oslabením (Obrázek 6). Vykreslíme průběh celkové disipace energie a do něj vyznačíme kroky, ve kterých dochází k lokalizaci. Na obrázku 5 je vidět, že většina disipace energie proběhne až po posledním kroku lokalizace, tedy v jedné vrstvě prvků. Lze tedy předpokládat, že odstranění závislosti na síti úpravou parametru ε_f bude fungovat.



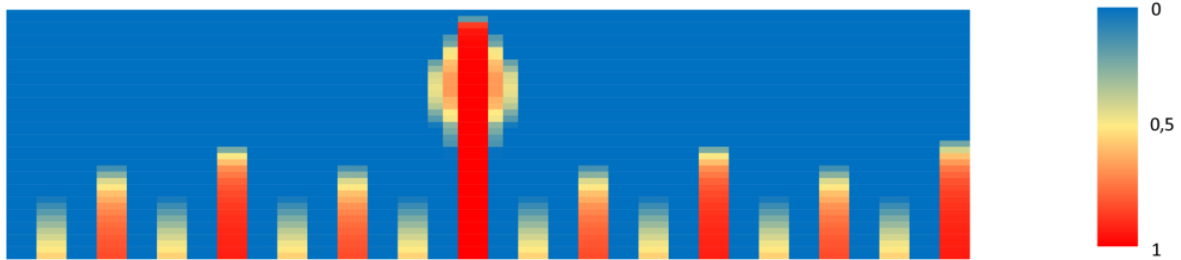
Obrázek 5: Průběh disipace pro síť 32 x 20 a $\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$. Svislé čáry značí průběh lokalizace. Lok1 – 16 trhlín → 8 trhlín, lok2 – 8 trhlín → 4 trhlíny, lok3 – 4 trhlíny → 1 trhlína

Pro definici vztahu pro úpravu ε_f vyjdeme z hodnot pro síť 32 x 20. Definujme tedy referenční velikost prvku $h_{ref} = 10 \text{ mm}$ a odpovídající hodnotu $\varepsilon_{f_ref} = 7 * 10^{-3}$. Podle [1] pak musí platit

$$\varepsilon_{f_i} * h_i = \varepsilon_{f_ref} * h_{ref} \quad (13)$$

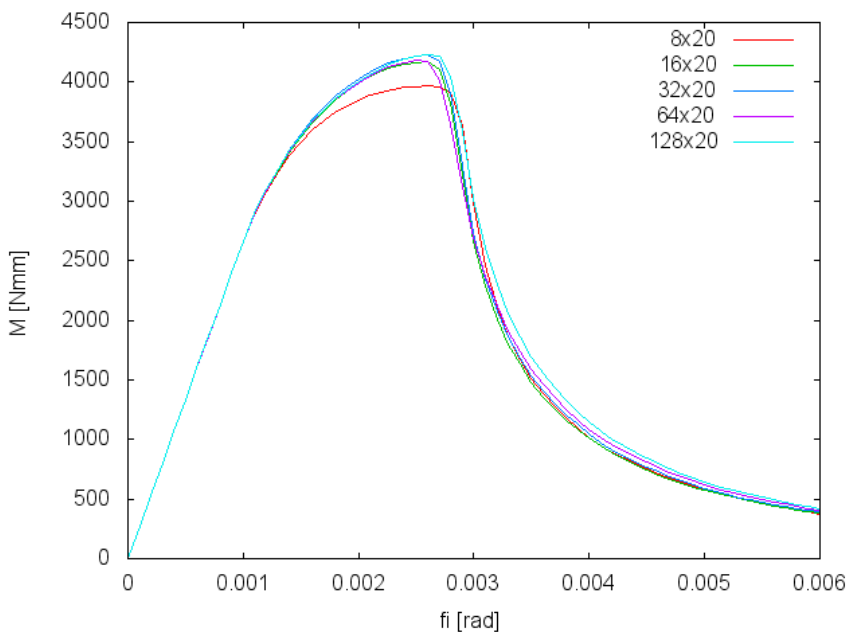
a z (13) snadno vyjádříme

$$\varepsilon_{f_i} = \frac{\varepsilon_{f_ref} * h_{ref}}{h_i} \quad (14)$$



Obrázek 6: Rozložení poškození pro síť 32 x 20 a $\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$ v posledním kroku

Když provedeme výpočty na různých sítích (s konstantním počtem prvků na výšku a různým počtem prvků na šířku) s úpravou parametru ε_f podle (14), zjistíme, že se vliv použité sítě skutečně daří odstranit (výsledky na obrázku 7). Na velmi hrubé síti 8 x 20 již lze pozorovat výraznější rozdíl, zde ale už pravděpodobně půjde o nepřesnost výpočtu na příliš hrubé síti.



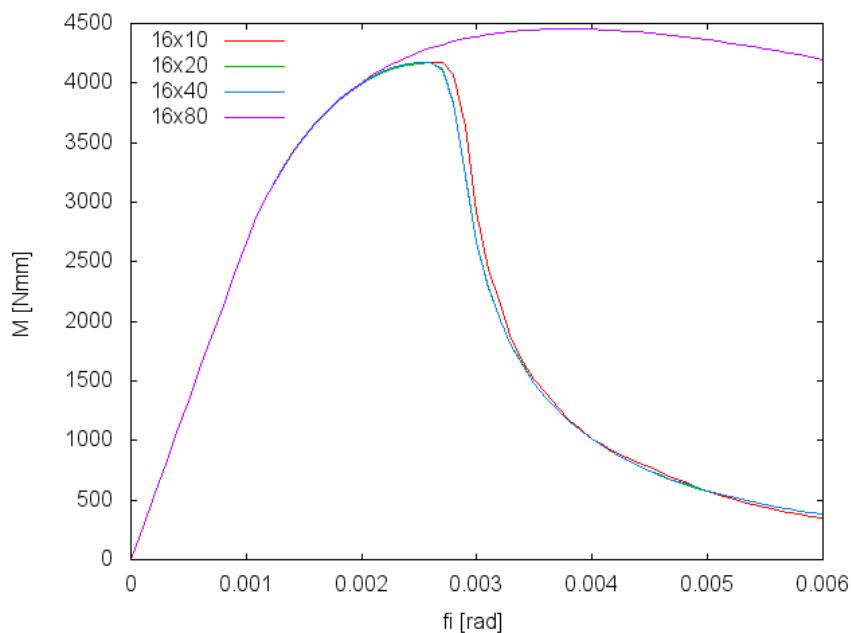
Obrázek 7: Pracovní diagramy pro různé sítě a příslušná ε_f ($\varepsilon_f = 7 * 10^{-3}$ pro síť 32 x 20)

Z dosavadních výsledků se zdá, že při lokalizaci v ohybu lze použít stejný způsob odstranění závislosti na síti jako při lokalizaci v tahu, nicméně další výsledky ukazují, že tomu tak není vždy.

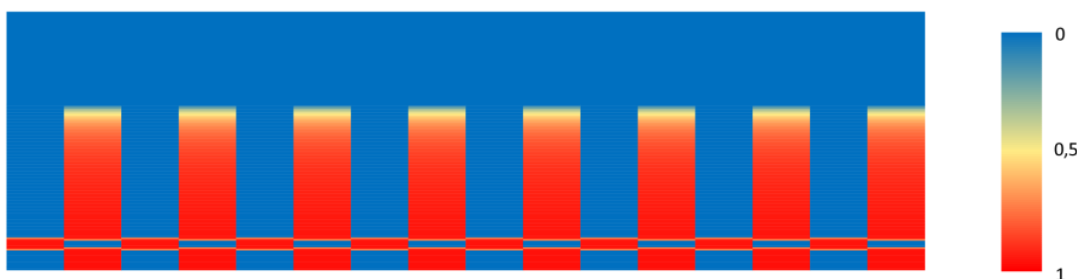
Při zjemňování sítě na výšku totiž poškození náhle přestává lokalizovat a pro síť o 80 prvcích na výšku dochází k mnohem duktilnějšímu chování. Z pracovních diagramů vidíme postupné zpřesňování výpočtu (mezi 16 x 20 a 16 x 40 už skoro není rozdíl) a náhle úplně odlišný průběh pro síť 16 x 80. K tomuto vzniku extrémní duktility dochází bez ohledu na počet prvků na šířku.

Další zvláštností sítě 16 x 80 je rozložení poškození (Obrázek 9). Nejdříve se začnou poškozovat pouze vrstvy s oslabenými prvky (sudé), ale potom poškození najednou „přeskočí“ do lichých, než se znovu vrátí do sudých vrstev. Pro srovnání uvádíme výsledky na síti 16 x 20 (Obrázek 10).

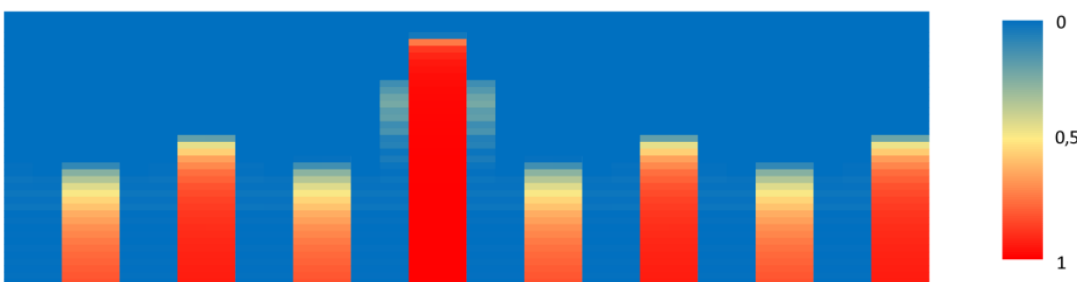
V [2] je popsána metoda, která na základě napjatosti a poškození umožňuje určit směr, ve kterém by mělo nejnáze docházet k lokalizaci. S aplikací této metody při zkoumání chování při zjemňování na výšku se počítá do budoucna.



Obrázek 8: Pracovní diagramy pro různý počet prvků na výšku



Obrázek 9: Rozložení poškození pro síť 16 x 80 v posledním kroku



Obrázek 10: Rozložení poškození pro síť 16 x 20 v posledním kroku

3 Výpočty s nelokálním modelem

S použitím nelokálního modelu poškození vstupuje do výpočtu parametr R , který má rozměr délky, a určuje okolí, ze kterého se počítá nelokální deformace. Očekáváme, že hodnota parametru R bude ovlivňovat šířku lokalizované zóny, tedy že při jeho zvyšování se materiál bude chovat duktilněji, podobně jako při zvyšování parametru ε_f . Především chceme zjistit, zda se použitím nelokálního modelu zbavíme nepříznivého vlivu velikosti prvku.

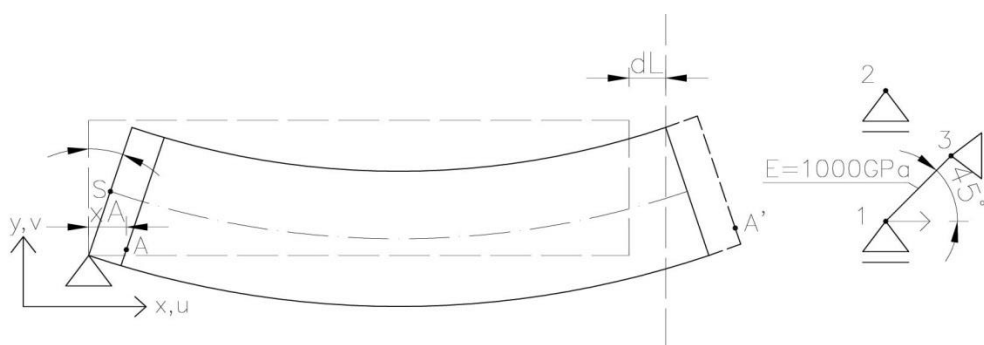
3.1 Předpis okrajových podmínek

Dosud jsme při výpočtech používali periodické okrajové podmínky, které předepisovaly pravému konci nosníku stejné posuny jako levému konci, zvětšené o přírůstek pootočení. Dá se říct, že se nosník choval jako výsek z nekonečného nosníku, kterému předepisujeme průměrnou křivost. Díky tomu byly předpoklady pro lokalizaci poškození všude stejné.

Když ovšem počítáme s nelokálním modelem, potřebujeme pro výpočet nelokální deformace na jednom okraji také informace o deformacích v navazujících prvcích druhého okraje. Bylo by možné upravit kód OOFEMu tak, aby při výpočtu v případě potřeby přistupoval k příslušným prvkům přímo, nicméně pro potřeby naší úlohy se spokojíme s alternativním řešením.

Za okraji nosníku vytvoříme „virtuální prvky“, kterými prodloužíme nosník minimálně o hodnotu parametru R . Jde nám o to, abychom na okrajích nosníku dodali informaci o deformaci, aniž bychom jinak ovlivnili výpočet. Virtuálním prvkům tedy přidělíme téměř nulový modul pružnosti $E = 10^{-8}$ MPa a deformaci jim předepíšeme pomocí závislých uzlů. Vzhledem k nízké tuhosti prvky nebudou přispívat k uzlovým silám a poslouží pouze jako nositelé informace o deformaci. Tímto docílíme rovnoměrných podmínek pro lokalizaci i s nelokálním modelem bez jakýchkoli úprav kódu OOFEMu.

V průběhu dalšího popisu okrajových podmínek budeme používat značení uzlů podle obrázku 11. Čárkovaná čára za pravým okrajem výseku vyznačuje vrstvu virtuálních prvků.



Obrázek 11: Znázornění předpisu okrajových podmínek pro uzly virtuálních prvků

Libovolný uzel virtuálního prvku A' je vlastně jeho vzor (uzel A) zkopírovaný na pravý okraj výseku. Pootočení konců výseku jsou ovšem navzájem opačná. Pro vodorovný posun uzlu A' stále platí (11), svislý posun je ale třeba upravit podle rozdílu natočení, takže potřebujeme předepsat

$$v_{A'} = v_A + \Delta\varphi * X_A \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že OOFEM neumožňuje zadat různé koeficienty pro jednotlivé stupně volnosti jednoho vzorového uzlu (tedy pokud předepíšeme $u_{A'} = \dots + u_A$ bude automaticky $v_{A'} = \dots + v_A$), musíme vytvořit další pomocný uzel. Uzel 3 bude spojen s uzlem 1 prutem s vysokou tuhostí pod úhlem 45°. Díky tomu bude platit, že $v_3 = u_1 = \Delta\varphi = 2 * \varphi$. Koeficienty u svislých a vodorovných posunů musí být stejné, takže předepisujeme

$$u_{A'} = u_A + u_2 + (y_S - y_{A'}) * u_1 + X_A * u_3 \quad (16)$$

$$v_{A'} = v_A + v_2 + (y_S - y_{A'}) * v_1 + X_A * v_3 \quad (17)$$

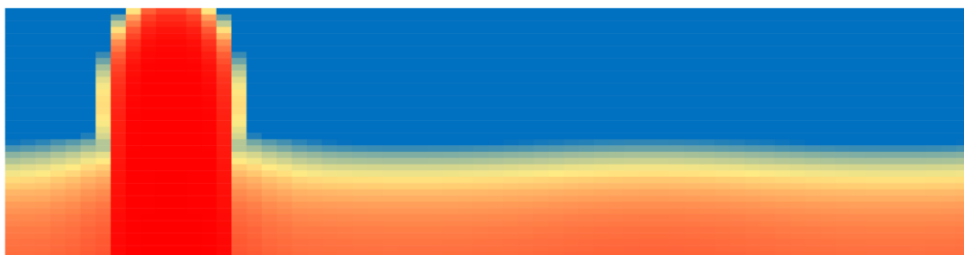
Vzhledem k podepření uzlů 1, 2, 3 je ovšem $v_1 = 0, v_2 = 0, u_3 = 0$. Díky tomu (16) odpovídá (11), a po dosazení $v_3 = \Delta\varphi$ také (17) odpovídá (15).

3.2 Vyvolání lokalizace

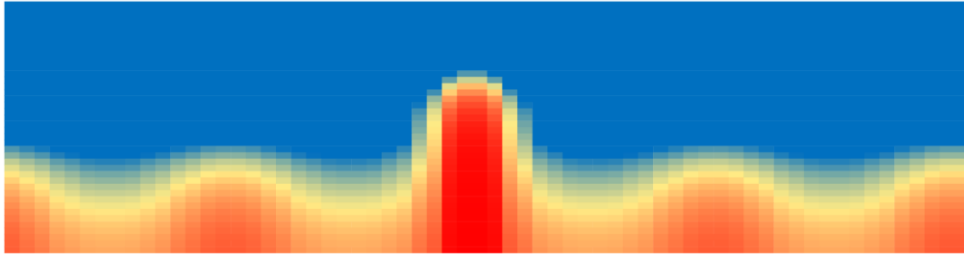
Od nelokálního modelu se dá čekat mnohem rovnoměrnější rozložení poškození po nosníku. Rozhodně předem nevíme, jak od sebe budou vzdáleny případné oblasti s větší koncentrací poškození. Proto při vyvolávání lokalizace upustíme od postupného oslabování každého druhého prvku a místo toho oslabíme jen jeden prvek spodního okraje.

3.3 Vyhodnocení výpočtů

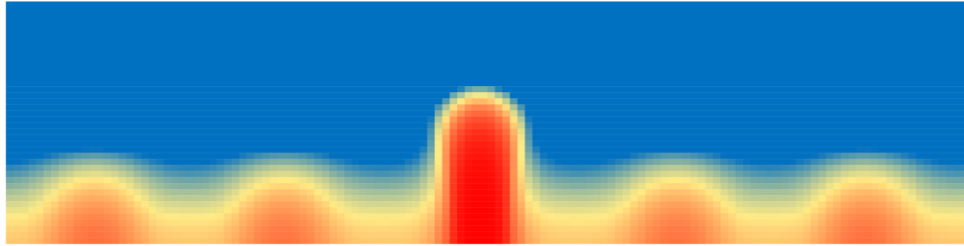
Dle očekávání má parametr R velký vliv na rozložení poškození po nosníku. Jeho hodnota ovlivňuje vzdálenost oblastí, ve kterých proběhne první fáze lokalizace. Poškození je nejdříve rovnoměrné a poté dojde k lokalizaci do svislé oblasti s oslabeným prvkem a do oblastí vzdálených o určitý násobek R. V pokročilejší fázi zatěžování dojde nakonec k lokalizaci pouze do oslabené oblasti. Pro síť 32 x 20 je vzdálenost lokalizovaných oblastí rovna 8 * R, ale při zjemňování patrně dochází k zpřesnění a vzdálenost se zmenšuje. Průběhy poškození (obrázky 12, 13 a 14) budou zobrazeny pro R = 10 mm a R = 20 mm a pro nízkou hodnotu $\varepsilon_f = 1,5 * 10^{-3}$, neboť na křehčím materiálu se oblasti zvýšeného poškození liší výrazněji.



Obrázek 12: Rozložení poškození v posledním kroku pro síť 32 x 20, R = 20 mm, $\varepsilon_f = 1,5 * 10^{-3}$



Obrázek 13: Rozložení poškození v posledním kroku pro síť 32 x 20, $R = 10 \text{ mm}$, $\varepsilon_f = 1,5 * 10^{-3}$



Obrázek 14: Rozložení poškození v posledním kroku pro síť 64 x 20, $R = 10 \text{ mm}$, $\varepsilon_f = 1,5 * 10^{-3}$

Při nastavení příliš malých hodnot R nebo ε_f dochází v průběhu zatěžování k tzv. snapbacku. K vysvětlení vzniku tohoto jevu zapišme přírůstek řídicí proměnné jako

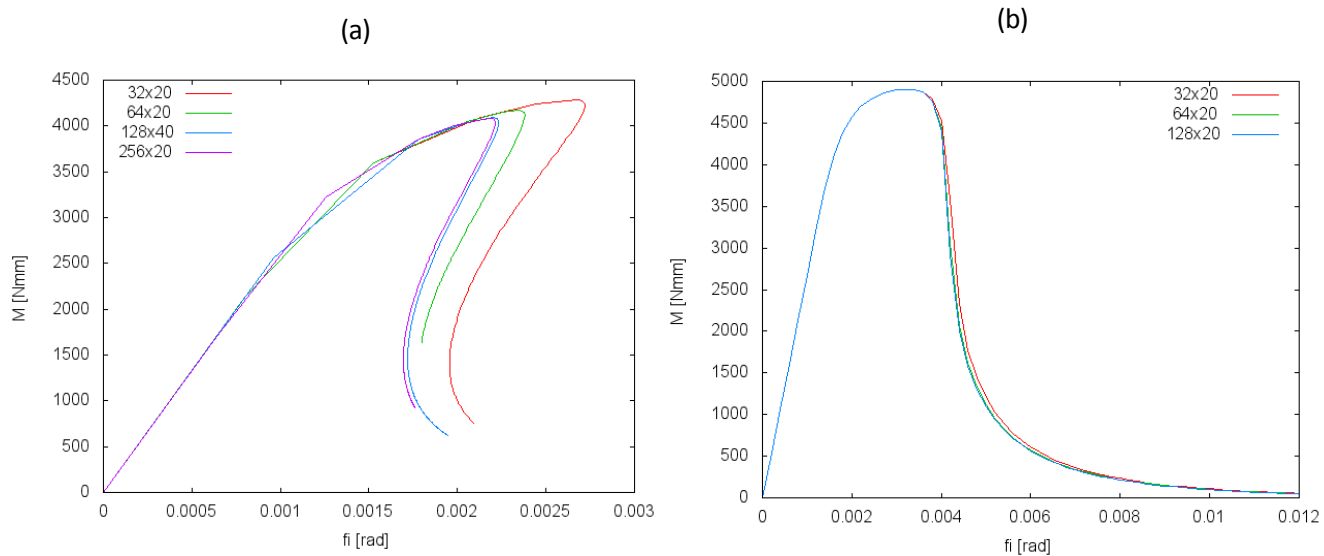
$$\Delta(\Delta\varphi) = \Delta(\kappa_{loc}) * L_{loc} + \Delta(\kappa_u) * L_u \quad (18)$$

kde κ_{loc} resp. L_{loc} je průměrná křivost, resp. délka lokalizované zóny, a κ_u resp. L_u je průměrná křivost, resp. délka odtěžované zóny. Dále platí, že celková délka $L = L_{loc} + L_u$. Křivost lokalizované oblasti při pokračujícím zatěžování roste, zatímco křivost odtěžované oblasti klesá ($\Delta(\kappa_{loc}) > 0$, $\Delta(\kappa_u) < 0$), je tedy zřejmé, že pro dostatečně malé L_{loc} nebo $\Delta(\kappa_{loc})$ může pravá strana rovnice (17) nabývat záporných hodnot. To se ovšem neslučuje s dosavadním způsobem řízení výpočtu, kdy předepisujeme v každém kroku konstantní kladné $\Delta(\Delta\varphi)$.

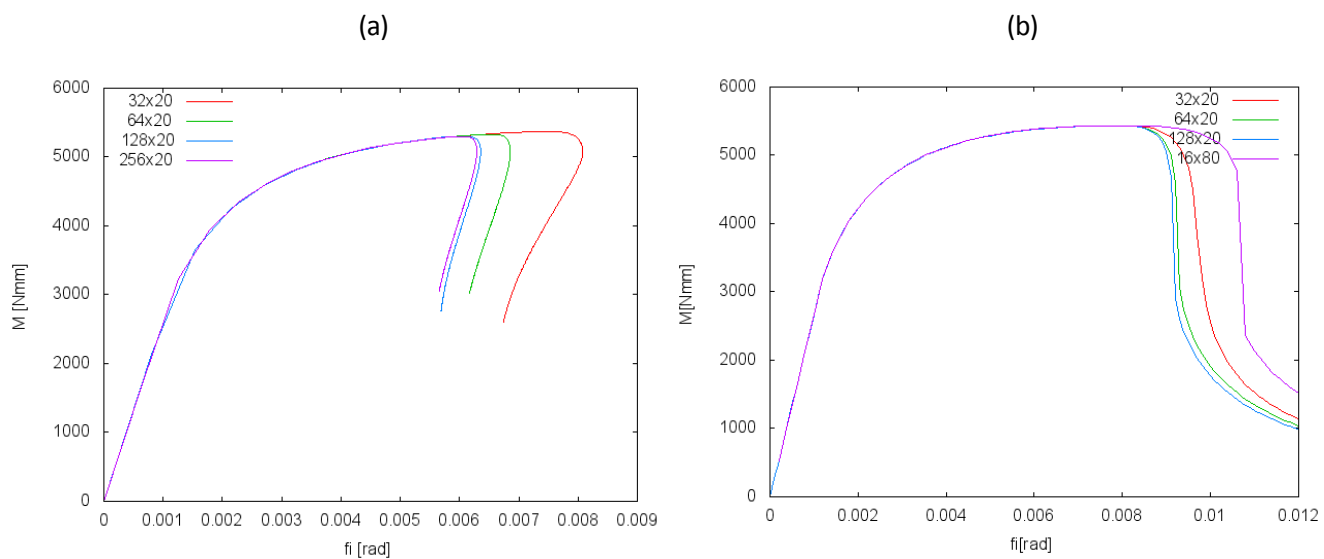
Pokud očekáváme vznik snapbacku, přikročíme k řízení výpočtu pomocí rozdílu posunů dvou uzlů spojených oslabeným prvkem. U těchto uzlů můžeme předpokládat, že se budou nacházet uvnitř lokalizované zóny. Rostoucí rozdíl jejich posunů tedy odpovídá kladnému $\Delta(\kappa_{loc})$. S novým řízením jsme již schopni získat přesný tvar pracovního diagramu i pro velmi křehké chování.

Další výpočty na sítích 32 x 20 až 256 x 20 (obrázky 15 a 16) ukazují, že za použití nelokálního modelu již velikost lokalizované zóny nezávisí na velikosti prvku (pouze se na hustší síti trochu zpřesňuje), nýbrž na parametru R . Ze spočtených globálních pracovních diagramů je patrné, že přesnost výpočtu závisí na poměru parametru R a velikosti prvku (čím větší R nebo menší prvek, tím přesnější výpočet).

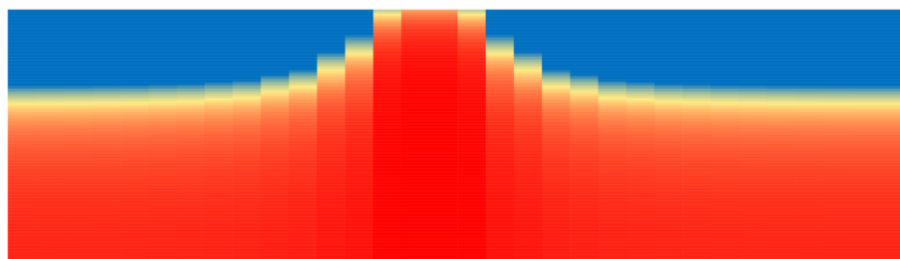
Problémem se zjemňováním na výšku nelokální model netrpí. Výsledky na síti 16 x 80 se od ostatních sítí se stejnými parametry výrazněji neliší (Obrázek 16b, Obrázek 17).



Obrázek 15: Pracovní diagramy pro (a) $\varepsilon_f = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $R = 10$ mm, (b) $\varepsilon_f = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $R = 40$ mm



Obrázek 16: Pracovní diagramy pro (a) $\varepsilon_f = 7 \cdot 10^{-3}$, $R = 10$ mm, (b) $\varepsilon_f = 7 \cdot 10^{-3}$, $R = 20$ mm



Obrázek 17: Rozložení poškození v posledním kroku pro síť 16×80 , $R = 20$ mm, $\varepsilon_f = 7 \cdot 10^{-3}$

Závěr

V této práci bylo prozkoumáno chování nosníku za ohybu za použití lokální a nelokální verze izotropního modelu poškození. Při výpočtech MKP musely být použity některé neobvyklé metody řízení výpočtu.

Vliv okrajů nosníku na lokalizaci poškození byl odstraněn pomocí periodických okrajových podmínek. Pro výpočty s nelokálním modelem bylo ještě třeba dodat na okrajích informace o deformaci, což zajistily „virtuální prvky“. V některých případech byla také použita metoda řízení výpočtu rozdílem posunů dvou uzlů.

Při výpočtech s lokálním modelem byl použit způsob odstranění závislosti řešení na velikosti prvku známý z [1]. Tento způsob do jisté míry fungoval, avšak při větším zjemňování sítě na výšku náhle selhalo umělé vyvolání lokalizace a poškození se přestalo šířit jen svislým směrem.

Potvrdil se předpoklad, že výsledky dosažené s nelokálním modelem nebudou trpět patologickou závislostí na velikosti prvku. Řešení s nelokálním modelem při zjemňování sítě konvergovalo a problém při zjemňování na výšku zde nenastal.

Do budoucna plánujeme podrobně prozkoumat průběh poškozování s lokálním modelem metodikou pro výpočet podmínek lokalizace popsanou v [2]. Doufáme, že se díky tomu podaří odhalit příčinu vzniklého problému.

Literatura

- [1] Jirásek, M. (2012). *Přetváření a porušování materiálů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- [2] Jirásek, M., & Horák, M. (2010). Localization Properties of Damage Models. *Computational Modelling of Concrete Structures*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- [3] Patzák, B., OOFEM project home page, <http://www.oofem.org>, 2000.