



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**VYUŽITÍ VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU IMPACT FEM PŘI  
ŘEŠENÍ ÚLOH MECHANIKY TĚLES**

THE USAGE OF IMPACT FEM WORKBENCH FOR TASK SOLUTION IN THE FIELD OF SOLID MECHANICS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Filip Ferenc

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Filip Ferenc**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Využití výpočtového programu Impact FEM při řešení úloh mechaniky těles**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce je zaměřena na řešení úloh mechaniky těles pomocí metody konečných prvků (MKP) v programovém prostředí Impact FEM. Program využívá explicitní formulaci MKP a je vhodný pro simulaci rychlých dějů. Student v práci využije dosavadní znalosti z předmětů mechaniky těles (Pružnost Pevnost, Dynamika, Fyzika). Výstupem práce pak bude porovnání získaných výsledků s analytickými úvahami, případně s výsledky jiného výpočtového prostředí (ANSYS nebo ANSYS Workbench).

### **Cíle bakalářské práce:**

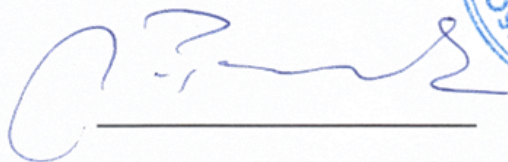
- základní orientace v prostřední Impact–FEM
- tvorba výpočtových modelů
- analýza získaných výsledků s následnou verifikací
- popis tvorby výpočtových modelů a diskuze nad výsledky

### **Seznam doporučené literatury:**

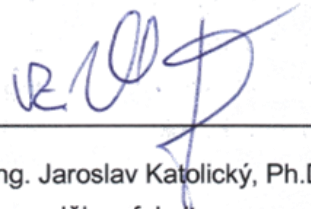
Yuriy Mikhaylovskiy, Impact, [www.impact-fem.org](http://www.impact-fem.org), přístup 13. září 2016

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 7. 10. 2016



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na výpočet základních úloh mechaniky těles s využitím programu Impact FEM. V úvodu této práce je pár základních informací o numerických výpočtech, konkrétně o metodě konečných prvků. Dále je čtenář seznámen s programem Impact FEM. Hlavní náplní práce je verifikace geometricky jednoduchých úloh s analytickým řešením a programovým prostředím Ansys Workbench. Závěrem je celkové zhodnocení programu, kdy na základě dosažených výsledků je konstatováno, že program v současné době není vhodný k výpočtu úloh mechaniky těles, avšak může dobře sloužit jako výuková pomůcka.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Impact FEM, model, síťování, verifikace

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on calculating the main tasks in the field of solid mechanic with usage Impact FEM. At the beginning, there is some basic information about a numerical calculation focusing on the Finite element method. The second part deals with Impact FEM programme description and model preparation. The main part of this thesis are examples of the tasks which I evaluated by Impact FEM. Results of those calculations were compared to the results obtained by analytic calculations and programme Ansys Workbench. Based on those verification calculations, I consider the Impact FEM programme is not able to calculate the main tasks of solid mechanic at this moment but it may be useful as a learning tool.

## **KEYWORDS**

Impact FEM, model, meshes, verification

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

FERENC, F. *Využití výpočtového programu Impact FEM při řešení úloh mechaniky těles*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 44s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Využití výpočtového programu Impact FEM při řešení úloh mechaniky těles“ vypracoval samostatně s využitím uvedených zdrojů, dále jsem vycházel z odborné literatury a konzultací.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Filip Ferenc

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych velice rád poděkoval především svému vedoucímu závěrečné práce, panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D., za ochotu a všechnen čas, který mi věnoval.

Velké díky patří mé přítelkyni, která mi pomohla při korektuře této práce a mé rodině, která mě celou dobu studia podporovala.

## OBSAH

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. ÚVOD .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| <b>2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....</b>                            | <b>2</b>  |
| <b>2.1 Historie .....</b>                                        | <b>2</b>  |
| <b>2.2 Teorie, základní vztahy a rovnice .....</b>               | <b>3</b>  |
| 2.2.1. Rovnice rovnováhy .....                                   | 3         |
| 2.2.2. Rovnice geometrické.....                                  | 4         |
| 2.2.3. Konstitutivní vztahy .....                                | 4         |
| 2.2.4. Okrajové podmínky.....                                    | 5         |
| <b>2.3 Dynamika .....</b>                                        | <b>5</b>  |
| 2.3.1. Implicitní metoda .....                                   | 5         |
| 2.3.2. Explicitní metoda .....                                   | 6         |
| <b>3. IMPACT FEM.....</b>                                        | <b>6</b>  |
| <b>3.1 Open Source .....</b>                                     | <b>6</b>  |
| <b>3.2 Základní informace o programu Impact FEM.....</b>         | <b>7</b>  |
| <b>3.3 Preprocessor.....</b>                                     | <b>8</b>  |
| 3.3.1. Prvky .....                                               | 9         |
| <b>3.4 Processor.....</b>                                        | <b>10</b> |
| <b>3.5 Postprocessor .....</b>                                   | <b>11</b> |
| <b>3.6 Graph.....</b>                                            | <b>12</b> |
| <b>3.7 Help.....</b>                                             | <b>13</b> |
| <b>4. TUTORIÁLY.....</b>                                         | <b>15</b> |
| <b>4.1 Tutoriál č. 1 - Čtvercový plech zatížený tlakem .....</b> | <b>15</b> |
| <b>4.2 Tutoriál č. 2 - Ohyb konzolové desky .....</b>            | <b>17</b> |
| <b>4.3 Tutoriál č. 3 – Kolize válců .....</b>                    | <b>20</b> |
| <b>5. VERIFIKAČNÍ ÚLOHY .....</b>                                | <b>22</b> |
| <b>5.1 Verifikační úloha č. 1.....</b>                           | <b>22</b> |

|            |                                                  |           |
|------------|--------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.1.     | Zadání úlohy.....                                | 22        |
| 5.1.2.     | Analytický výpočet .....                         | 23        |
| 5.1.3.     | Ansys Workbench .....                            | 24        |
| 5.1.4.     | Impact FEM .....                                 | 24        |
| 5.1.5.     | Vyhodnocení výsledků verifikační úlohy č. 1..... | 25        |
| <b>5.2</b> | <b>Verifikační úloha č. 2.....</b>               | <b>28</b> |
| 5.2.1.     | Zadání úlohy.....                                | 28        |
| 5.2.2.     | Analytický výpočet .....                         | 28        |
| 5.2.3.     | Ansys Workbench .....                            | 29        |
| 5.2.4.     | Impact FEM .....                                 | 29        |
| 5.2.5.     | Vyhodnocení výsledků verifikační úlohy č. 2..... | 30        |
| <b>5.3</b> | <b>Verifikační úloha č. 3.....</b>               | <b>35</b> |
| 5.3.1.     | Zadání úlohy.....                                | 35        |
| 5.3.2.     | Analytický výpočet .....                         | 35        |
| 5.3.3.     | Výpočet Ansys Workbench.....                     | 36        |
| 5.3.4.     | Výpočet Impact FEM.....                          | 37        |
| 5.3.5.     | Vyhodnocení výsledku verifikační úlohy č. 3..... | 38        |
| <b>6.</b>  | <b>RADY PRO BUDOUCÍ UŽIVATELE.....</b>           | <b>40</b> |
| <b>7.</b>  | <b>ZÁVĚR.....</b>                                | <b>41</b> |
|            | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>            | <b>43</b> |
|            | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>   | <b>44</b> |

## 1. ÚVOD

Každá doba přináší své vynálezy, úspěšné lidi a jejich převratné objevy. Když už si lidstvo myslelo, že v polovině 20. století není možné přijít s novými vynálezy a vše je již objeveno, bylo na omylu. Naopak bylo na začátku úplně nové éry. A to díky vzniku nových oborů jako jaderné inženýrství, raketové inženýrství, a hlavně díky obrovskému rozšíření dříve téměř neznámé počítačové techniky a numerických metod.

Každý problém, který řešíme, potažmo počítáme, si převádíme na modelovou situaci, tzn. danou úlohu si převedeme na úlohu jednodušší. Čím více požadujeme přesnější výsledek, tím více se naše modelová situace stává složitější. Problémy, které byly předtím neřešitelné nebo těžce řešitelné, se podařilo s využitím počítačové techniky vyřešit. Tak se začala rozvíjet a používat výpočetní technika a spolu s ní numerické metody. Tyto metody nás sice nedovedou k naprosto přesnému výsledku, ale postupnou aproximací se k němu přibližujeme. Hlavní výhodou numerických metod je, že dokážeme spočítat i problémy analyticky nepopsatelné nebo nevyřešitelné. Nedostaneme sice výsledky přesné, jako v případě běžných analytických popisů, ale dosáhneme alespoň přibližného řešení. Přesnost numerického výpočtu je dána schopností a zkušeností řešitele, a také přesností metody samotné. V inženýrské oblasti se stala nejpoužívanější metoda konečných prvků (dále jen MKP).

Tato bakalářská práce se zabývá výpočetním programem Impact FEM, který je postavený na principech MKP. Zjišťuje, zda je program vhodný a dobrý nástroj pro počítání úloh mechaniky těles. Na začátku bude čtenář seznámen se základními informacemi o MKP. Dále je představení programu. Následující část je věnována tutoriálům. Hlavní téma se zabývá verifikací a zjištěním funkčnosti programu. V poslední kapitole jsou sepsány užitečné informace pro potenciálního uživatele. Cíle této práce jsou základní seznámení s programem Impact FEM, tvorba výpočtových modelů a následná verifikace s vyhodnocením výsledků.

## 2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Při řešení úlohy pevnostní analýzy máme dva způsoby, jak dosáhnout výsledku. Analytickou nebo numerickou metodou.

Analytická metoda je historicky starší a přesnější. Jedná se o spojité řešení, kdy počet prvků je nekonečný a problém může být řešen pouze matematicky fiktivním infinitezimálním počtem. Hlavní výhodou analytického přístupu je, že výstupem je pouze jediné řešení, což nám dává obecnou funkční závislost mezi vstupními a výstupními veličinami. Při nalezení této závislosti lze mnohem snadněji posoudit závislost výstupních parametrů (napětí, deformace) na vstupních parametrech (zatížení, geometrie aj.). Toho se dá využít například při optimalizaci součástí. Analytická metoda je však limitována tím, že se dá použít pouze pro omezený počet geometricky jednoduchých úloh.

Naproti tomu se u numerické metody jedná o diskrétní řešení, které má pro každý model použitý přesně stanovený počet prvků. Touto metodou lze v zásadě určit každou matematicky popsatelnou úlohu. Řešení je teoreticky limitováno pouze hardwarem počítače a výpočtovým časem. Výsledky se však vztahují pouze ke konkrétně zadanému případu. Jakákoliv úprava, či změna okrajových podmínek znamená opakování celého výpočtu, což může znamenat ztrátu hodin, dnů, či týdnů. [1], [2]

Základním principem MKP je, že postupnou aproximací diskrétního problému se přibližujeme k problému spojitému. Postupnou diskretizací se snažíme rozdělit těleso na konečný počet jednoduchých prvků. Jednoduchými prvky jsou myšleny jednoduché geometrické tvary jako čtyřúhelníky, trojúhelníky atd. Podstatnou výhodou tohoto rozdělení je, že takto jednoduché tvary lze snadno matematicky popsat. Pomocí uzlů spojíme jednotlivé prvky a vytvoříme výpočtovou síť. Přesnost výpočtu velkou mírou závisí právě na hustotě sítě, tedy na počtu prvků, kterými těleso rozdělíme. [1], [3]

### 2.1 Historie

Metoda konečných prvků je numerická metoda, jejíž název se odvodil z anglické verze Finite Element Method (FEM). V inženýrských výpočtech se jedná o nejpoužívanější numerickou metodu. Datum vzniku této metody se často spojuje s vyšlou knihou (*Stress and deflection analysis of complex structures*) [4], vydanou v roce 1956, přestože některé myšlenky systému MKP byly popsány v knize, která byla vydána již v roce 1943 (*Variational methods for solution of problems of equilibrium and vibration*) [5]. V počátku vývoje MKP se jednalo spíše o akademické a vědecké užití, ale s postupným rozvojem se začala metoda používat častěji na úlohy z běžné praxe. Z toho plynulo, že začaly vznikat první komerční softwary. Mezi nejznámější a největší softwarové firmy zabývající se MKP výpočty patří ANSYS, ABAQUS, NASTRAN aj. Metoda konečných prvků si našla své uplatnění v mnoha směrech

např. statické pevnostní analýzy, rychlé dynamické děje, simulace proudění tekutin, termální, akustické a piezoelektrické analýzy aj. [1]

## 2.2 Teorie, základní vztahy a rovnice

Deformační varianta MKP vychází z Lagrangeova variačního principu, který je definován takto: „Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkové potenciální energii  $\Pi$  stacionární hodnotu.“ Tato uvedená stacionární hodnota existuje, je jednoznačná a představuje zároveň minimum potenciální energie. [1]

Základní rovnice MKP je definována pomocí třech matic. A to z matice tuhosti  $\mathbf{K}$ , matice neznámých parametrů  $\mathbf{U}$  a matice zatížení  $\mathbf{F}$ . Rovnice vypadá následovně:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1.1)$$

Takto určenou matici hledáme v každém uzlu naší soustavy. Dále řešíme soustavu rovnic (lineárních nebo nelineárních). Pomocí okrajových podmínek přesně definujeme soustavu rovnic a hledáme neznámé parametry. V případě deformační varianty jsou to parametry deformační, tedy posuv, resp. natočení uzlového bodu. Po vyřešení úlohy a vyčíslení deformačních parametrů je průběh hledaného posuvu na celé oblasti aproximován, což nás přibližuje k analytickému řešení. Poté můžeme zpětně dopočítat napětí, přetvoření aj. [1], [3]

K jednoznačnému určení soustavy tzn. k určení obecné napjatosti a deformace prostorové statické úlohy musíme znát celkem 15 neznámých funkcí proměnných v osách  $x, y, z$ .

- Tři posuvy  $u, v, w$
- Šest přetvoření  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$
- Šest napětí  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Tyto funkce jsou navzájem svázány systémem obecných rovnic pružnosti, které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Jsou to rovnice rovnováhy, rovnice fyzikální neboli konstitutivní a rovnice geometrické. [1]

### 2.2.1 Rovnice rovnováhy

Rovnice jsou podmínkami rovnováhy elementárního vnitřního prvku, na který, kromě složek napětí, působí vnější objemová síla (např. gravitační) o složkách  $O_x, O_y, O_z$  [ $\text{N/m}^3$ ]. Představují vzájemnou vazbu mezi složkami napětí, která musí být splněna vždy bez ohledu na typ materiálu, velikost deformací apod. Uvádíme je pro případ statického zatěžování [1]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + o_x = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + o_y = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + o_z = 0 \quad (1.4)$$

### 2.2.2 Rovnice geometrické

Geometrické vztahy se označují jako závislost mezi deformačními posuvy  $u$ ,  $v$ ,  $w$  v bodě tělesa a délkovými a úhlovými přetvořeními  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$ ,  $\gamma_z$  v témže bodě. Pro malé deformace jsou dány vztahy [6]:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.6)$$

### 2.2.3 Konstitutivní vztahy

Konstitutivní vztahy vyjadřují závislost mezi deformací a napjatostí v bodě tělesa. Matematicky je tato závislost vyjádřena vztahy mezi složkami tenzoru napětí a tenzoru přetvoření. Pro ideální hookův materiál, který je definován takto [6]:

- 1) Hlavní směry deformace a napjatosti jsou shodné.
- 2) Materiálové vlastnosti jsou určeny dvěma nezávislými veličinami, a to modulem pružnosti v tahu  $E$  a poissonovou konstantou  $\mu$ .
- 3) Závislost mezi souřadnicemi tenzoru napětí a přetvoření jsou lineární.

Pro takto definovaný materiál potom platí:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \quad (1.9)$$

Modul pružnosti ve smyku  $G$  lze určit pomocí modulu pružnosti  $E$  a poissonovovy konstanty vztahem [1]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.10)$$

### 2.2.4 Okrajové podmínky

K tomu, aby byla soustava matic řešitelná, musíme dodat okrajové podmínky, silové nebo geometrické. V daném místě a směru na povrchu můžeme vždy předepsat pouze jednu z uvedených podmínek.

Geometrické okrajové podmínky vyjadřují posuvy nebo natočení v různých bodech tělesa. Tyto podmínky vyplývají z uložení, či vzájemné interakce s druhým tělesem apod.

Silové okrajové podmínky vyjadřují rovnováhu mezi vnitřními a vnějšími silami elementárního prvku ležícího na hranici řešené oblasti. V případě přesného řešení, by mělo být na povrchu smykové a normálové napětí nulové. [1]

## 2.3 Dynamika

Při dynamických úlohách hraje ve výpočtu velkou roli čas, který jsme ve statických úlohách zanedbávali. Hledané veličiny, a tedy i posuvy, jsou také funkcí času. Derivací posuvu podle času získáme rychlost a zrychlení. Základní matice v dynamickém případě má tvar:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = F(t) \quad (1.11)$$

|            |            |
|------------|------------|
| Posuv-     | $U$        |
| Rychlost-  | $\dot{U}$  |
| Zrychlení- | $\ddot{U}$ |

Kdy  $M$  je matice hmotnosti,  $K$  je matice tuhosti a  $C$  je matice tlumení. Pro způsob časové integrace pohybové rovnice používáme dva algoritmy, implicitní nebo explicitní metodu. Spousta dynamických simulací vyžaduje velice malý integrační krok jako například srážky, nárazové testy nebo vysoce nelineární analýzy. V případě, že musí být časový krok okolo několika nanosekund, je implicitní řešič nepraktický, a to z důvodu obrovského navýšení výpočtového času. V takovýchto případech se používá explicitní metoda, která dovoluje počítat obrovský počet kroků v relativně přijatelném čase. [1]

### 2.3.1 Implicitní metoda

Implicitní metoda je vhodnější pro statické a „pomalejší“ úlohy s mírnými nelinearitami jako plasticita. „Posuvy v čase  $t_{n+1}$  získáváme z pohybové rovnice v tomtéž časovém okamžiku, odtud název algoritmu - implicitní.“ [1]

Při počítání statických úloh lze při zanedbatelných setrvačných silách vypustit matici hmotnosti. Implicitní algoritmus není přímo závislý na délce časového kroku, ovšem při nesprávně zvoleném časovém kroku je výsledek nepřesný. U této metody je snaha aplikovat co nejdelší časové kroky. [1]

### 2.3.2 Explicitní metoda

Explicitní metoda je vhodná pro simulaci rychlých dějů a vysoce nelineárních úloh jako rázová zatížení, borcení skořepin, srážky atd. Pro explicitní algoritmus je zapotřebí co nejmenší časový krok. Délku kroku lze vypočítat pomocí vzorce:

$$\Delta t_{cr} = L / c \quad (1.12)$$

$$c = \sqrt{E / \rho} \quad (1.13)$$

Kdy  $L$  je rozměr nejmenšího prvku sítě,  $E$  modul pružnosti v tahu a  $\rho$  je hustota materiálu. Délka časového kroku je potom řádově kolem  $10^{-5}$ - $10^{-7}$ . Při použití explicitního algoritmu je tedy analyzovaný časový interval rozdělen na mnohem více krátkých časových kroků, jejichž řešení je mnohem rychlejší než v případě implicitní metody.

Na rozdíl od implicitní metody se při vypuštění matice tuhosti algoritmus stává nefunkčním. Tento problém lze obejít pomocí kritického tlumení nebo zadáním hmotnosti či rychlosti tak, ať jsou setrvačné síly řádově zanedbatelné. Pak se jedná o řešení statické úlohy při použití dynamického řešiče. [1], [7]

## 3. IMPACT FEM

Program Impact FEM je vytvořen na bázi explicitního algoritmu. Vhodný je zejména k rychlým přechodovým dějům, padacím testům, nárazovým testům aj. Tento program řadíme do skupiny Open Source neboli otevřených programů. Open Source programy jsou volně přístupné a zdarma ke stažení. To je obrovská výhoda oproti komerčním programům, jejichž cena pro firmu či školu může vyšplhat až do milionů.

### 3.1 Open Source

Jak již je výše zmíněno, druh této licence je zcela zdarma. Programy jsou vymyšleny a naprogramovány skupinami nadšenců po celém světě, převážně vědci z výzkumných ústavů a univerzit.

Největší výhodou je nulová cena. V případě, že chce uživatel pomoci k rozvoji daného programu, může program podpořit peněžní dotací. Mezi další výhody se řadí to, že zdrojové kódy jsou otevřené. Uživatel si je může přizpůsobit podle vlastních potřeb a za jistých okolností

i dále šířit. V případě programu Impact FEM je výhodou instalace, která se skládá pouze ze stažení a nainstalování doplňků Java.

Bohužel má tento druh softwaru i spoustu nevýhod. Open Source programy nejsou tak uživatelsky příjemné a propracované jako běžné komerční softwary. Z tohoto důvodu se nevyužívají v takové míře, tudíž se vytváří méně návodů a tutoriálů. Jako další nevýhodu se dá považovat, že se uživatel u některých programů na bázi Open Source neobejde bez znalosti programování. Problém dále nastává v případě chyby či nefunkčnosti programu, jelikož neexistuje podpora daného systému. Uživatel je odkázán na diskuzní fóra. Některé Open Source programy nejsou podporovány systémem Windows a dají se spustit pouze na systému Linux, což pro uživatele může znamenat další starosti.

Programů Open Source je mnoho. Mezi nejznámější z oblasti mechaniky patří Salome, OpenFOAM, Aladdin aj. [3]

### 3.2 Základní informace o programu Impact FEM

Pro vypracování této práce byla použita verze 0.7.06.042 a také starší verze 0.7.06.040. Obě jsou ke stažení na stránkách [Impact FEM](#) [8]. Program byl navržen tak, aby byl snadno rozšiřitelný a přizpůsobivý uživatelům a vhodný k dalšímu programování. Tento program je napsán v programovacím jazyce Java, a to zejména ze dvou důvodů:

- 1) Java je objektově orientovaný programovací jazyk, a proto je ideální, právě pro naprogramování programu Impact FEM.
- 2) Java je čistý, jednoduchý a extrémně přenositelný jazyk.

Impact FEM je založen na explicitním krokovém algoritmu, který je používán právě k simulaci dynamických jevů jako srážky automobilů, padací testy a další druhy analýz, zahrnující zejména rychlé děje a velké deformace. Základním principem, ze kterého Impact FEM vychází, je rovnice,

$$F = M \cdot A \quad (1.14)$$

kde  $F$  představuje sílu,  $M$  je hmota a  $A$  výsledné zrychlení tělesa.

Kód provádí výpočet zrychlení tělesa následujícím způsobem. Při malých časových krocích dochází k přenosu zrychlení na malý posuv daného tělesa. Tento posuv je dále používán k výpočtu reakční síly, která vzniká při zatížení tělesa. Dále je tato reakční síla používána k výpočtu zrychlení. Poté se tento proces opakuje od začátku.

Pro řešení komplikací ohledně programu Impact FEM, slouží fórum na stránce [Source Forge](#). [8]

Program Impact FEM je tvořen z pěti základních částí, které dohromady slouží k úplné dynamické analýze. Preprocessor, processor, post processor, graph a help.

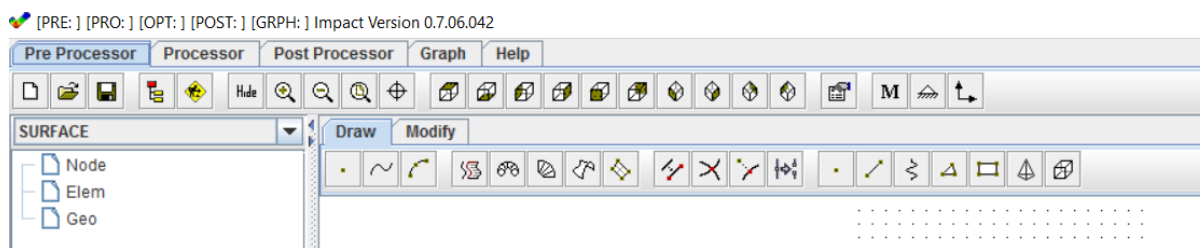
### 3.3 Preprocessor

Preprocessing je první část každé analýzy MKP. Slouží zejména k tvorbě výpočtového modelu, sítě, určení okrajových podmínek a typu materiálu. V programu Impact FEM jsou možné tři varianty, jak vytvořit kompletní výpočtový model. První možností je preprocessor GUI (uživatelské grafické rozhraní) zabudovaný v Impact FEM. Dalšími variantami jsou použití programu [Gmsh](#) nebo [GiD](#). [8]

GUI je zabudované preprocessorové prostředí pro tvorbu modelů, resp. sítě, pomocí bodů, křivek a těles (viz obr. 3.1). Uživatel si na začátku tvorby modelu určí, v jakých jednotkách bude úlohu řešit. Jelikož Impact FEM nepracuje s jednotkami, musí si uživatel hlídat jednotky sám. V návodu Impact FEM je přiložena tabulka, v níž je vyznačen řádek s doporučenými jednotkami (viz obr. 3.2). Tvorba sítě v GUI je velice pracná, a to z důvodu, že toto prostředí nemá vytvořen účinný nástroj, který by sloužil k vytvoření sítě. Uživatel je nucen „naklikat“ body, resp. uzly, a k nim příslušné prvkové křivky či tělesa. V případě složitější sítě je tento postup velice zdoluhavý. Dojde-li ke změně modelu, je potřeba „naklikat“ síť novou. Tato metoda má však i svou velkou výhodu, uživatel má plnou kontrolu nad vytvořenou sítí.

Další z možností pro tvorbu modelu a sítě je program Gmsh. Tento program je navržen pouze pro preprocessing a postprocessing. Jediným úkolem je tvorba modelu a sítě, a následné vyhodnocování výsledků. V preprocessoru programu Gmsh nelze nastavit okrajové podmínky ani materiálové charakteristiky. Není tedy možné model rovnou importovat do řešiče programu Impact FEM, jako v případě programu GiD. Problém nastává také s importem prostorových prvků, které buďto vůbec nainportovat nejdou, anebo hlásí chybu při spuštění výpočtu. Výhodou programu je, že je veřejně přístupný. [9]

Jako druhý doporučený program, dle návodu Impact FEM, je program GiD. Program je navržen jako preprocessor a postprocessor pro programy, které fungují na bázi MKP. GiD má možnost nahrání nástrojů programu Impact FEM. Je tedy schopen kompletního preprocessingu a není nutné nahrávat síť do GUI, tak jako v případě programu Gmsh. Bohužel tento program již není veřejně přístupný a nejnižší cena licence pro akademické využití se pohybuje okolo 550 €. V této práci byla použita měsíční zkušební licence, která je zdarma. [10]



Obr. 3.1 Preprocessor v prostředí Impact FEM.

| Length | Time    | Mass     | Force                    | Pressure                   | Velocity            | Density            | Energy                           | Gravity  |
|--------|---------|----------|--------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------|
| m      | s       | Kg       | Kg m/s <sup>2</sup>      | N/m <sup>2</sup>           | m/s                 | Kg/m <sup>3</sup>  | Kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> | 9.81     |
| m      | s       | Kg       | N                        | Pa                         | m/s                 | m Kg/l             | J                                | 9.81     |
| m      | s       | g        | mN                       | mPa                        | m/s                 | micro Kg/l         | mJ                               | 9.81     |
| m      | s       | Mg (ton) | KN                       | KPa                        | m/s                 | Kg/l               | KJ                               | 9.81     |
| m      | ms      | Kg       | MN                       | MPa                        | Km/s                | m Kg/l             | MJ                               | 9.81e-6  |
| m      | ms      | g        | KN                       | KPa                        | Km/s                | micro Kg/l         | KJ                               | 9.81e-6  |
| m      | ms      | Mg (ton) | GN                       | GPa                        | Km/s                | Kg/l               | GJ                               | 9.81e-6  |
| mm     | s       | Kg       | mN                       | KPa                        | mm/s                | M Kg/l             | micro J                          | 9.81e+3  |
| mm     | s       | g        | micro N                  | Pa                         | mm/s                | g/mm <sup>3</sup>  | nJ                               | 9.81e+3  |
| mm     | s       | Mg (ton) | N                        | MPa                        | mm/s                | Mg/mm <sup>3</sup> | mJ                               | 9.81e+3  |
| mm     | ms      | Kg       | KN                       | GPa                        | m/s                 | M Kg/l             | J                                | 9.81e-3  |
| mm     | ms      | g        | N                        | MPa                        | m/s                 | K Kg/l             | mJ                               | 9.81e-3  |
| mm     | ms      | Mg (ton) | MN                       | TPa                        | m/s                 | G Kg/l             | KJ                               | 9.81e-3  |
| cm     | ms      | g        | daN                      | 10 <sup>5</sup> Pa (bar)   | dam/s               | Kg/l               | dJ                               | 9.81e-4  |
| cm     | ms      | Kg       | 10 <sup>4</sup> N (KdaN) | 10 <sup>8</sup> Pa (Kbar)  | dam/s               | K Kg/l             | hJ                               | 9.81e-4  |
| cm     | ms      | Mg (ton) | 10 <sup>7</sup> N(MdaN)  | 10 <sup>11</sup> Pa (Mbar) | dam/s               | M Kg/l             | 10 <sup>5</sup> J                | 9.81e-4  |
| cm     | micro s | g        | 10 <sup>7</sup> N (MdaN) | 10 <sup>11</sup> Pa (Mbar) | 10 <sup>4</sup> m/s | Kg/l               | 10 <sup>5</sup> J                | 9.81e-10 |

**Obr. 3.2** Možnosti zadávání jednotek s vyznačenými doporučenými jednotkami.

### 3.3.1 Prvky

Program Impact FEM má k dispozici celkem 8 prvků. Základní prvky jsou testovány v kapitole 5 (verifikační úlohy). Jedná se o prvky skořepinové Shell\_BT\_4 a Shell\_C0\_3, a o prvky prostorové Solid\_Iso\_6 a Solid\_Iso\_4.

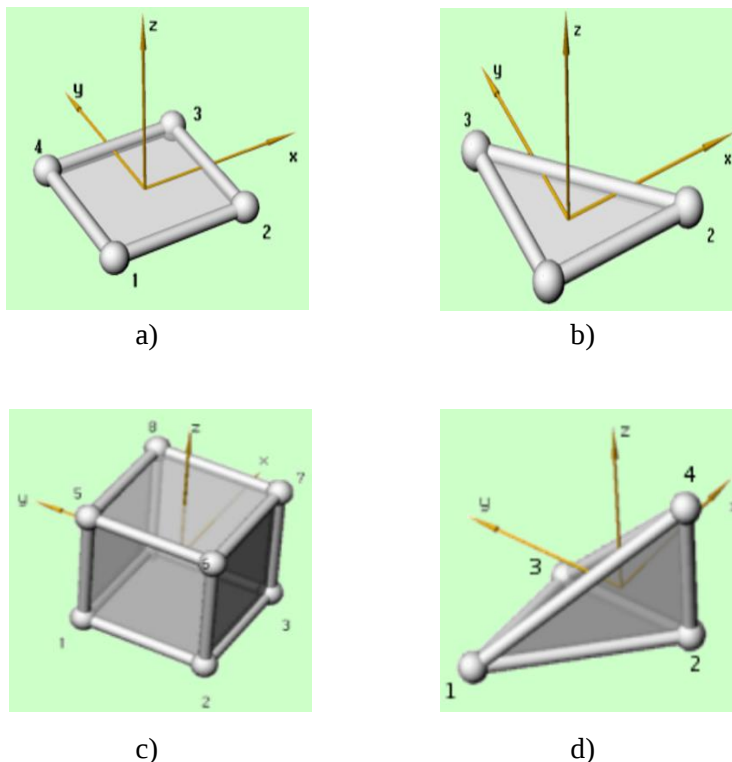
Shell\_BT\_4 je čtyřuzlový shell prvek založen na klasické belytchoko-tsai formulaci (viz obr. 3.3) Tento prvek je velice robustní a rychlý, proto se stal velmi oblíbeným právě pro explicitní řešení. Je však náchylný k hourglassigu. Jako jediný z prvků má v sobě zabudovanou funkci hourglass control, která tomuto jevu zabráňuje. Funkce je defaultně je zapnutá, ale v případě potřeby ji uživatel může vypnout.

Shell\_C0\_3 je tříuzlový shell prvek založený na klasické C0 formulaci (viz obr. 3.3). Doplnjuje prvky BT\_4 a je často používán ve vztahu s explicitními výpočty. Výhodou tohoto prvku je rychlost. Na rozdíl od prvku BT\_4 není potřeba funkce hourglass control. Trojúhelníky jsou díky své povaze tužší než prvek BT\_4, tudíž musíme používat tyto prvky s opatrností.

Solid\_Iso\_6 je prvek skládající se z osmi integračních bodů (viz obr. 3.3). Naskytuje se možnost nahradit jednu stranu, která je tvořena čtyřmi uzly, pouze uzlem jedním. Následkem nahrazení uzlů je způsobeno oslabení stability sítě. V době psaní nemá prvek zabudovanou

funkci hourglass control, tudíž se tato varianta příliš nedoporučuje. Při zpracování výsledků je možné nechat vykreslit napětí a přetvoření.

Solid\_Iso\_4 prvek je založen na degenerovaném prvku Solid\_Iso\_6 a je sestaven pomocí čtyř uzlů (viz obr. 3.3).



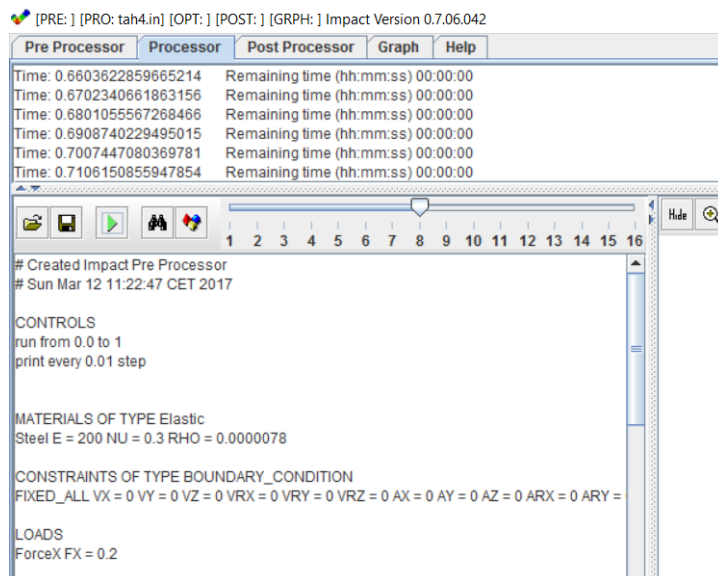
**Obr. 3.3** Základní prvky programu Impact FEM: a) Shell\_BT\_4, b) Shell\_C0\_3, c) Solid\_Iso\_6 d) Solid\_Iso\_4.

Další prvky, které se dají použít při tvoření výpočtového modelu, jsou kontaktní prvky Contact\_Line a Contact\_Triangle. Jedná se o dvou a tříuzlové prvky, jejichž jediným úkolem je detekce přibližování uzlů jiných těles. Pokud se uzel jiného tělesa nachází v blízkosti kontaktního prvku, uzel je odtlačován reakční silou. Reakční síla je stejně velká jako síla, kterou působí uzel na element. Velikost reakční síly se dá korigovat pomocí hodnoty factor, což ovlivňuje vzdálenost, kdy začne prvek působit na přibližující se uzly. [8]

### 3.4 Processor

V Processorové části se provádí vlastní výpočet. Pro spuštění je nutné nahrát skript, který jsme uložili z preprocessoru v .in formátu. Skript musí obsahovat příslušnou síť, tzn. příslušný počet uzlů a elementů, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky. Před začátkem výpočtu si uživatel může ověřit zadané hodnoty v levém sloupci. Po načtení a kontrole, je výpočet

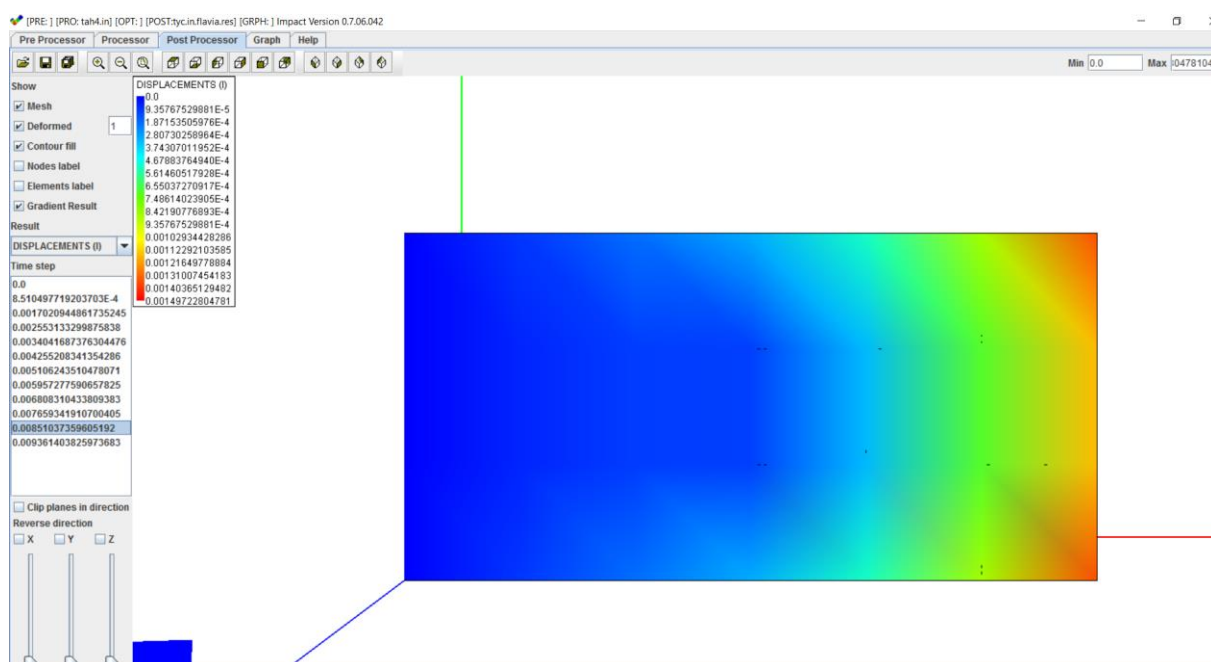
spuštěn zelenou šipkou. Poté se vypisují jednotlivé vypočtené časové kroky řešení. Program také zobrazuje, za jakou dobu bude výpočet dokončen (viz obr. 3.4).



Obr. 3.4 Processor prostředí Impact FEM.

### 3.5 Postprocessor

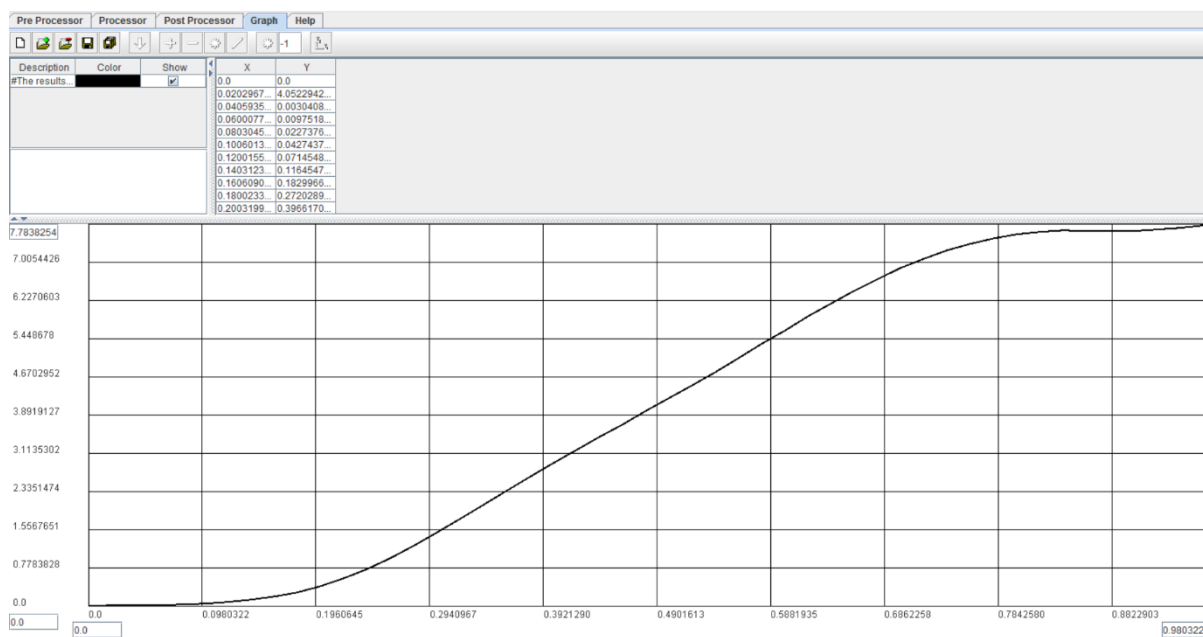
Postprocessor slouží k prohlížení výsledků. Při řešení úlohy v Processorové části se automaticky vygeneruje soubor s výsledky v .res formátu. Zmíněný formát je schopen otevřít buď Postprocessor Impact FEM nebo postprocessor programu GiD. V programu Gmsh se výsledky načíst nepodařilo. Po otevření si uživatel zvolí zobrazení výsledků deformací, přetvoření nebo napětí v různých osách v jakémkoli časovém okamžiku (viz obr. 3.5).



Obr. 3.5 Postprocessor v programu Impact FEM.

### 3.6 Graph

Pomocí funkce Graph dojde k vykreslení výsledků z trackeru (viz obr. 3.6). Trackery zapisují chování dané veličiny na jednom uzlu nebo elementu. Mezi nabízené trackery patří průběh síly, deformace, napětí, energie a momentu. Bez zásahu do kódu lze vykreslit deformace, přetvoření a napětí ve všech osách. Další druhy trackerů se musí napsat přímo do kódu. V případě preprocessoru programu GiD lze zadat tracker síly, momentu či zrychlení, při zadávání okrajových podmínek. Z těchto výsledků zjistíme, jak se nám jeden určitý bod chová v průběhu celé analýzy. Trackerů můžeme mít vykreslených více druhů z více prvků či uzlů najednou. Můžeme snadno porovnávat chování jednotlivých částí modelu v průběhu analýzy.



**Obr. 3.6** Výkreslení trackeru v programu Impact FEM.

### 3.7 Help

Jako poslední, a možná nejdůležitější záložkou, je funkce Help, ve které jsou uloženy všechny podklady týkající se programu Impact FEM (viz obr. 3.7). V levé části obrazovky se nachází nabídka základních prvků nápovědy. V úvodu jsou k dispozici základní prvky programu a manuál obsahující návod na instalaci. Dále je obsažen podrobný popis k použití jednotlivých funkcí. Na závěr jsou zde i odkazy na tutoriály a cvičné úlohy. Více informací lze najít na stránkách [Impact FEM](#). [8]



**Obr. 3.7** *Nápověda v prostředí Impact FEM.*

## 4. TUTORIÁLY

Při rozhodnutí použít program Impact FEM se uživatel nejprve pravděpodobně setká s tutoriály. Tutoriál je návod, který ukazuje krok po kroku na konkrétních příkladech použití daného programu. Navádí uživatele, jak se program instaluje, spouští a kde jsou umístěny ovládací prvky. Hlavním cílem je pomocí ukázkových příkladů naučit uživatele s programem zacházet. Na stránkách [Impact FEM](#) jsou k nalezení tři oficiální tutoriály. Jako první je video tutoriál, který představuje program pomocí vytvoření jednoduché úlohy. Další tutoriály jsou již v psané formě.

### 4.1 Tutoriál č. 1 - Čtvercový plech zatížený tlakem

První tutoriál je formou nekomentovaného videa. Video má délku devět a půl minuty. V tomto čase je ukázána tvorba modelu, sítě, zadání materiálu a okrajových podmínek. Následně je zobrazeno převedení úlohy do Processorové části a zahájení výpočtu. V poslední fázi videa je obsažena práce s Postprocesorem a Graphem.

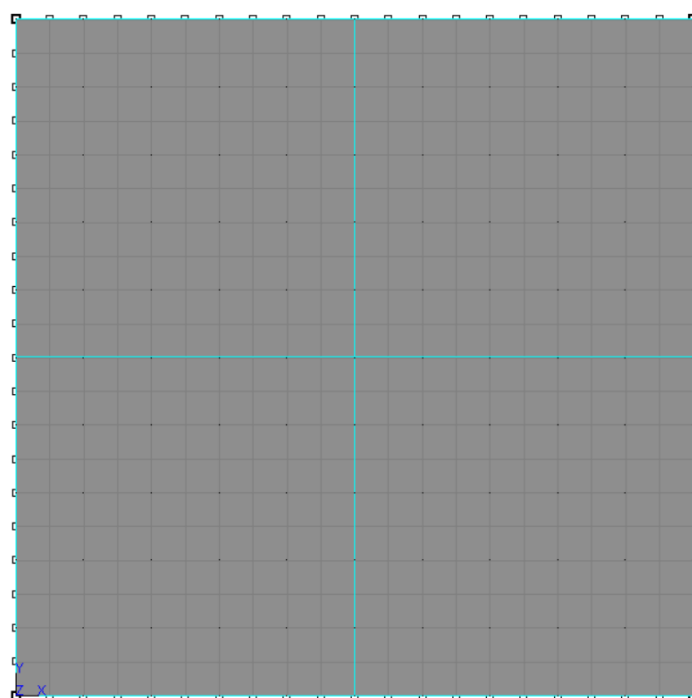
Zadání: Čtvercový plech o straně 100 mm a tloušťce 1 mm je zatížen rostoucím tlakem  $p = 2$  MPa. Zajištěn je proti pohybu vetknutím po obvodu. Použitým materiálem je ocel s modulem elasticity  $E = 210$  GPa, poissonovou konstantou  $\mu = 0,3$ , mezí kluzu  $R_p = 0,18$  GPa a elastoplastickým modulem  $EP = 0,1$ . Simulace je pozorována v čase 1 ms. [8]

U programu Impact FEM se vazební podmínky zadávají pomocí zrychlení a rychlosti v uzlu. V případě vetknutí se u obvodových uzlů zadají nulové rychlosti a zrychlení ve všech směrech. Zatížení se zadává v určitém časovém kroku. V případě této úlohy:

$$p = [0,0, 1,0.002]$$

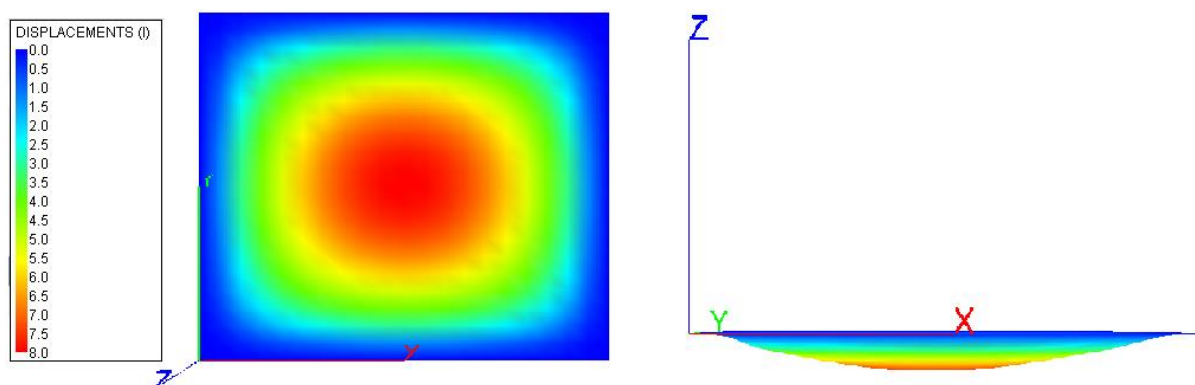
V čase 0 ms je zatížení nulové, v čase 1 ms je zatížení 0,002 GPa.

Síť je tvořena 400 čtvercovými prvky Shell\_BT\_4 a 840 uzly. Celá síť byla vytvořena v preprocessoru Impact FEM (viz obr. 4.1).

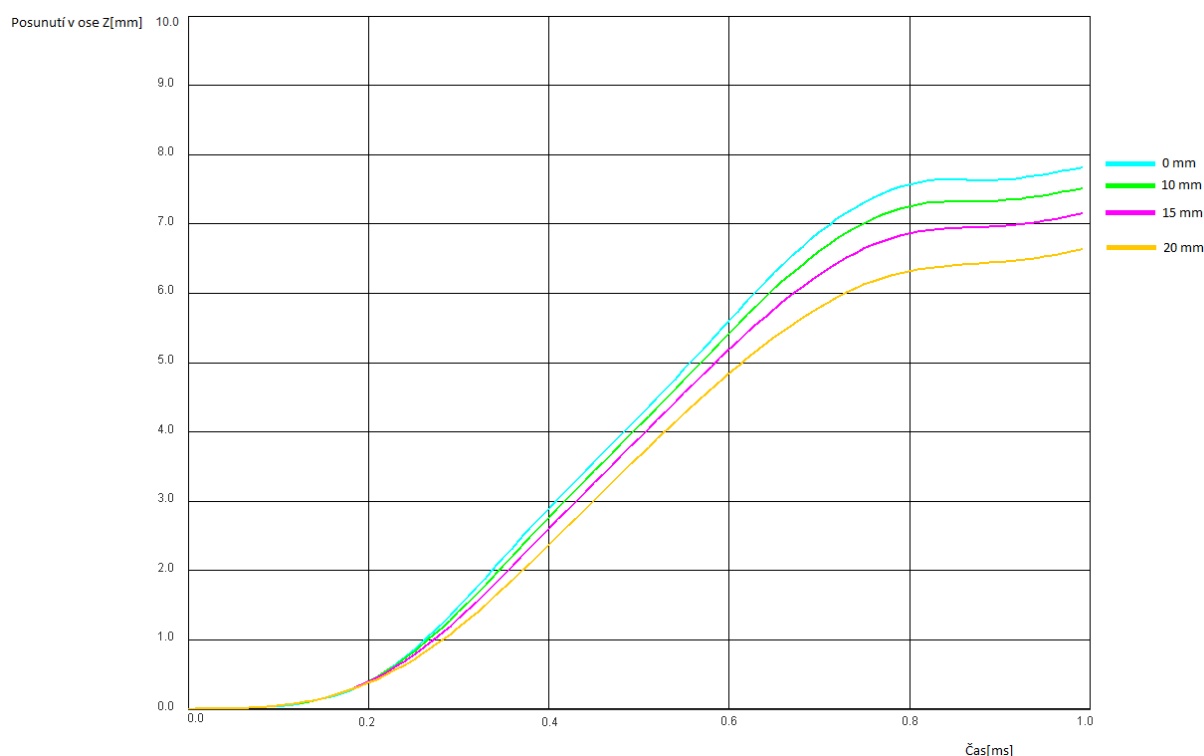


**Obr. 4.1** Síť tutoriálu č. 1.

Výsledkem příkladu je deformace v čase 1 ms vykreslena v Postprocessoru Impact FEM (viz obr. 4.2). Dalším výstupem je vykreslení grafu závislosti deformace na čase u uzlů v různé vzdálenosti od středu (viz graf 4.1). Maximální hodnota prohnutí je -7,8 mm.



**Obr. 4.2** Deformace v ose Z, úloha č. 1.



**Graf 4.1** Vykreslení závislosti deformace na čase. Uzel vzdálený 0, 10, 15 a 20 mm od středu desky.

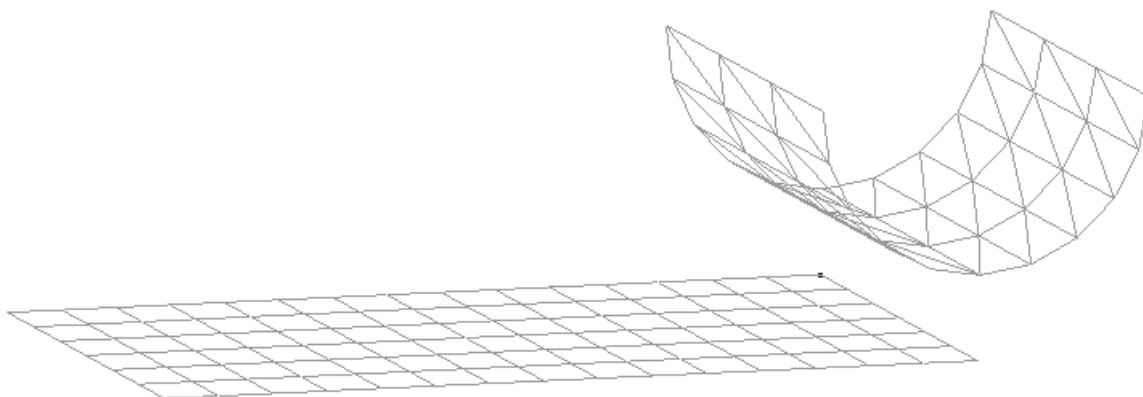
## 4.2 Tutoriál č. 2 - Ohyb konzolové desky

Druhý tutoriál je ve psané podobě. Pomocí poznámek a obrázků navádí, jak vytvořit model v prostředí programu GiD. Následně popisuje import do programu Impact FEM, kde je proveden výpočet. Zobrazení výsledků a vytvoření animace je opět v programu GiD. Tato úloha simuluje dopad nedeformovatelného tělesa na konzolovou desku.

**Zadání:** Zkušební těleso ve tvaru půlkruhové skořepiny vertikálně dopadne na konec konzolové desky z hliníku 2024-T3, jejíž rozměry jsou 100x50x2 mm. Materiál konzoly je zadán jako elastoplastický s modulem pružnosti  $E = 73 \text{ GPa}$ , poissonovou konstantou  $\mu = 0,33$ , mezí kluzu  $R_p = 0,344 \text{ GPa}$  a zpevňovacím faktorem  $EP = 0,1$ . Deska je jednostranně vetknutá. Zkušební těleso se pohybuje konstantní rychlostí 3 m/s. Čas simulace je 15 ms. [8]

Návod začíná stažením a instalací programu GiD. Pomocí jednoduchého přetažení složky implementujeme a spustíme prvky Impact FEM v programu GiD. Zajímavostí je, že program GiD pracuje s hladinami, tudíž se konzola vytváří v jiné hladině než samotné zkušební těleso. Tato skutečnost usnadňuje práci při tvorbě modelu.

Síť konzoly je tvořena obdélníkovými prvky. Na delší hraně konzoly je 15 prvků shell\_4\_BT, na kratší straně je prvků 6. Síť zkušebního tělesa je tvořena trojúhelníkovými prvky, kdy na půlkruhové hraně je 10 prvků a na spojovací hraně jsou prvky 3 (viz obr. 4.3).

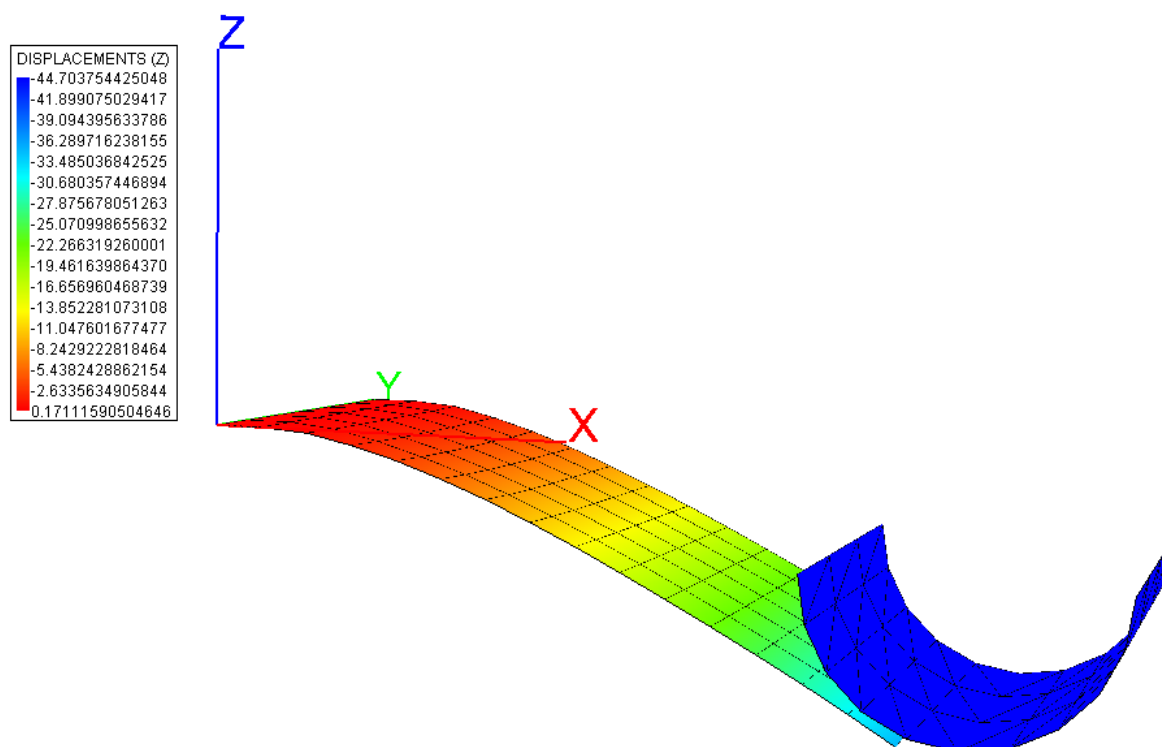


**Obr. 4.3** Síť úlohy č. 2.

V další části tutoriálu se přidává materiál a okrajové podmínky. Pro zadání materiálu je nutné mít zapnutý režim Impact. Jako materiál zkušebního tělesa se zadává contact triangle 1, což místo prvků Shell\_C0\_3 vytvoří prvky Contact\_triangle.

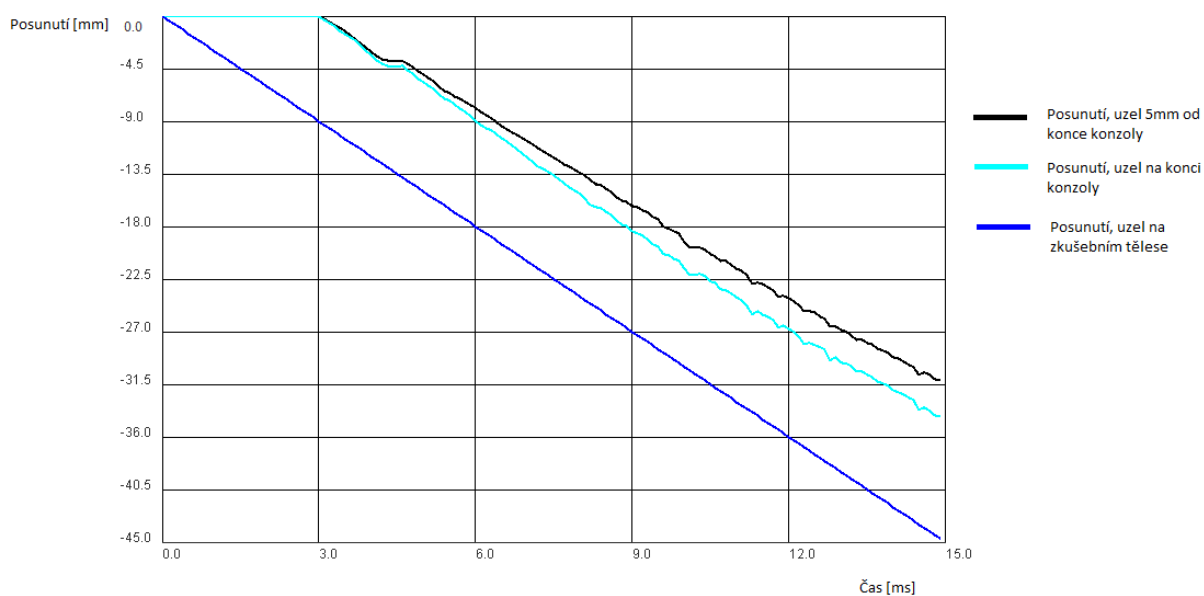
Vazební podmínky jsou určeny stejně jako u programu Impact FEM pomocí rychlosti a zrychlení. V případě konzoly, která je jednostranně vetknutá, se nastavují hodnoty zrychlení i rychlosti nulové. Zkušební těleso se pohybuje v ose  $z$ , tudíž je hodnota rychlosti  $v_z = -3$  m/s a v osách  $x$  a  $y$  je rychlost i zrychlení nulové. Ostatní hodnoty jsou ponechány ve výchozím nastavení, to znamená, že tyto veličiny nejsou kontrolovány.

V poslední fázi se nastavuje délka simulace, trackery a uživatelské informace. Poté se model uloží jako formát .in a spustí v programu Impact FEM. Po úspěšném provedení výpočtu je ukázáno zobrazení výsledků v postprocessorové části v programech Impact FEM a GiD (viz obr. 4.4). Obdobně se dají vykreslit výsledné grafy z trackerů. Pro vytvoření animace je však nutné použít program GiD.



**Obr. 4.4** Deformace konzoly v čase 15 ms.

Posun zkušebního tělesa v čase 15 ms je 44,7 mm a uzel na konci konzoly se posunul o 34 mm. Uzel ležící ve vzdálenosti 5 mm od konce konzoly má v témže časovém okamžiku posun 31 mm (viz graf 4.2).



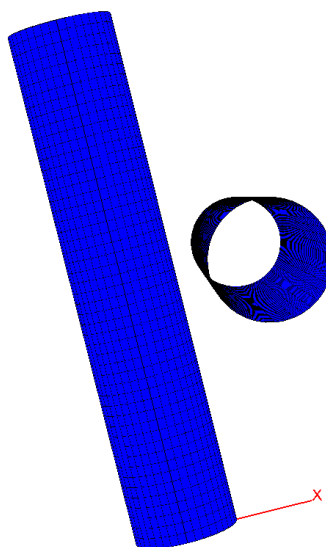
**Graf 4.2** Posunutí na konci a 5 mm od konce konzoly, posunutí uzlu na zkušebním tělese.

### 4.3 Tutoriál č. 3 – Kolize válců

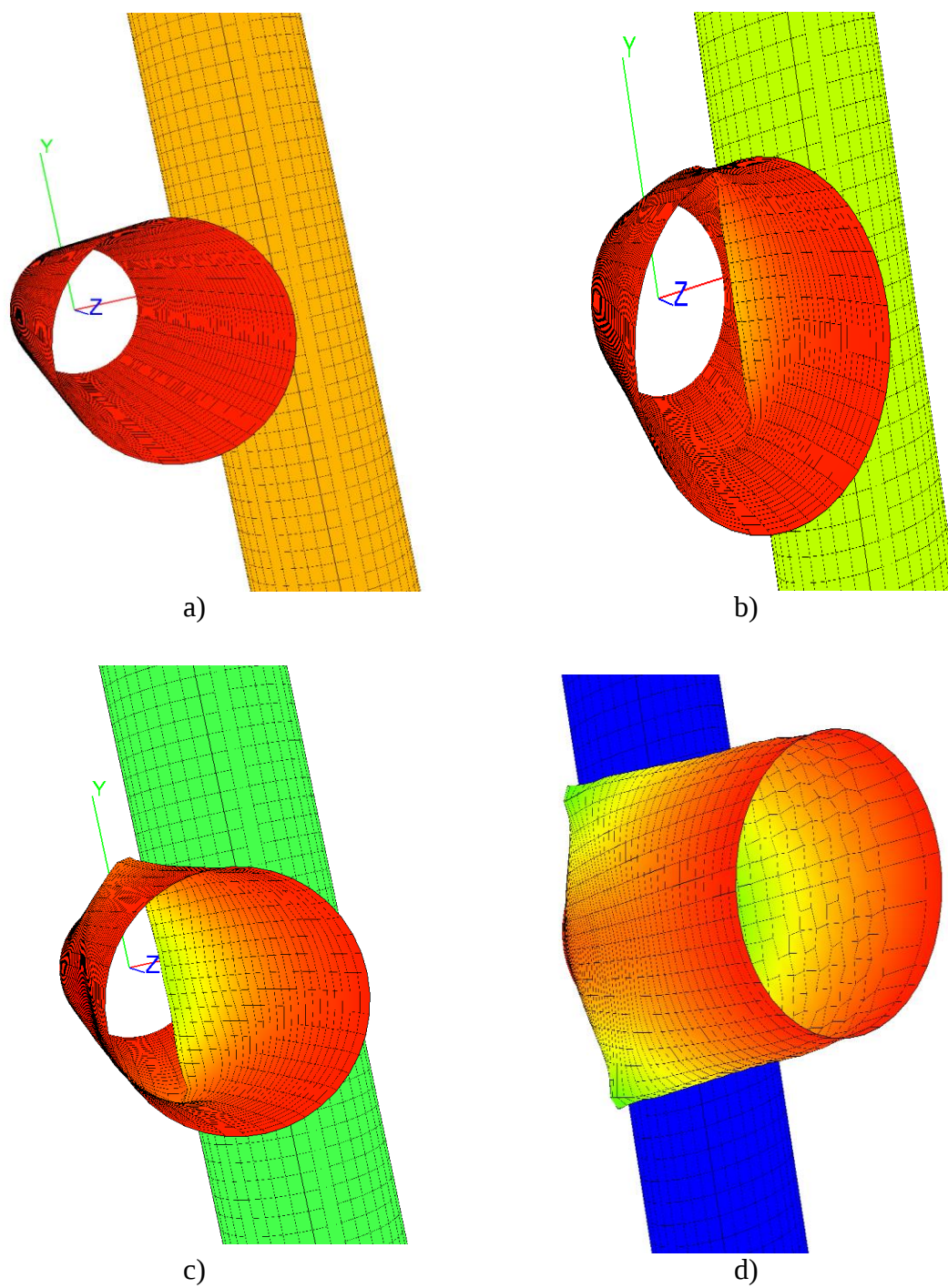
Třetí a poslední tutoriál je rovněž ve psané formě. Pro preprocessing je použit opět program GiD. Výpočet a postprocessing je ukázán v programu Impact FEM. Tento návod je již mnohem stručnější a předpokládá se znalost funkcí programu GiD z úlohy č. 2.

Zadání: Ocelová válcová skořepina o průměru 20 mm, délce 200 mm a tloušťce 1 mm narazí do válcové skořepiny o stejných rozměrech a materiálu. Materiálové charakteristiky jsou modul elasticity  $E = 210$  GPa, poissonova konstanta  $\mu = 0,3$ , mez kluzu  $R_p = 0,18$  GPa a elastoplastický zpevňovací faktor  $EP = 0,1$ . Deformovaná válcová skořepina je pootočená o  $90^\circ$  a oboustranně vetknutá. Rychlost pohybu pohybujícího se válce je  $v_x = -10$  m/s. Celkový čas simulace je 20 ms. [8]

Síť obou skořepin je tvořena pomocí Shell\_4\_BT prvků. Určením zrychlení a rychlosti definujeme okrajové podmínky soustavy. Rychlost a zrychlení oboustranně vetknuté skořepiny jsou nulové. Skořepina, která se pohybuje, má definovanou pouze rychlost  $v_x = 10$  m/s a ostatní složky rychlosti a zrychlení nekontrolované. Jakmile se nastaví všechny okrajové podmínky dojde ke spuštění výpočtu v programu Impact FEM a následně se provede postprocessing.



**Obr. 4.5** Válcové skořepiny v čase 0 ms.



**Obr. 4.6** Zobrazení posuvu v čase: a) 1 ms, b) 2 ms, c) 3 ms, d) 5,5 ms.

Poslední tutoriál bohužel není tak propracovaný. Oproti přechozímu tutoriálu je vše napsáno velmi stroze a uživatel je nucen vydedukovat jednotlivá fakta.

V mém případě se objevily následující komplikace, kdy po prvním úspěšném vytvoření sítě začalo docházet ve spoji dvou ploch k rozbalování pláště, aniž by na něj působilo jakékoli zatížení. Po stáhnutí starší verze Impact FEM problémy přestaly. Avšak záhy se objevil další problém. Jeden z uzlů při přiblížení k povrchu druhé skořepiny proniknul tímto povrchem. Komplikace se podařila odstranit zjemněním sítě. Vzhledem ke skutečnosti, že je program GiD komerční, ve zkušební verzi lze pracovat pouze s omezeným počtem uzlů a elementů. Řešením bylo zažádání o měsíční zkušební verzi. Bohužel další problém nastal při spuštění výpočtu. V tutoriálu je uveden výpočtový čas 20 ms, avšak v případě mého výpočtu dojde ke zhroucení v čase 5,5 ms. Avšak podle obrázků, které jsou v tutoriálu ukázány, bylo dosaženo stejných deformací pouze v jiných časech.

## 5. VERIFIKAČNÍ ÚLOHY

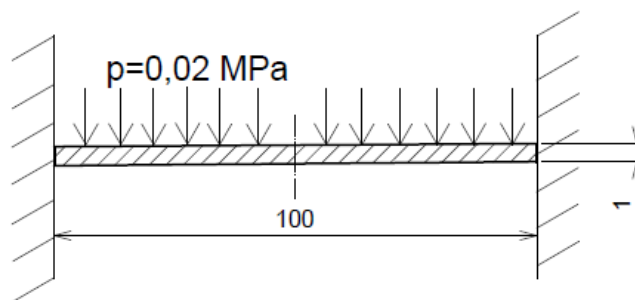
Kapitola je věnována verifikaci programu Impact FEM, tedy kontrole, zda výsledky tvořené tímto programem jsou věrohodné. Verifikace bude provedena na základních elementárních úlohách mechaniky těles. Jednotlivé úlohy budou spočteny programem Impact FEM a porovnány s analytickým řešením a s výsledky programu Ansys Workbench. Zmíněný verifikační program je vybrán ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je, že program byl vyučován v předmětu Metoda konečných prvků a výpočetní systém Ansys. Druhým hlavním důvodem je možnost tvorby implicitního i explicitního výpočtu. V průběhu všech verifikačních úloh jsou zadávány doporučené jednotky dle návodu Impact FEM, tedy rozměry a deformace v mm, tlak v GPa, síla v kN a čas v ms (viz obr. 3.2).

Zatěžování je velmi pomalé a plynulé, tudíž lze předpokládat zanedbatelný vliv setrvačných účinků. Z tohoto důvodu je možno srovnávat explicitní výpočet s analytickým řešením.

### 5.1 Verifikační úloha č. 1

#### 5.1.1 Zadání úlohy

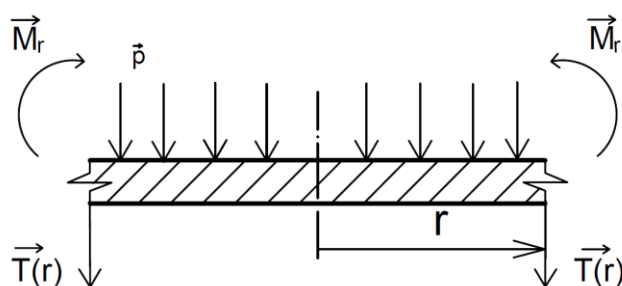
Jedná se o ocelovou desku po obvodu vetknutou. Deska je kruhového tvaru o průměru 100 mm a tloušťce 1 mm, zatížena tlakem  $p = 0,00002$  GPa (viz obr. 5.1). Výpočet se zabývá pouze elastickou oblastí materiálu. Materiálové charakteristiky jsou modul pružnosti  $E = 210$  GPa, poissonova konstanta  $\mu = 0,3$  a hustota  $\rho = 0.0000078$  M Kg/l.



**Obr. 5.1** Zadání verifikační úlohy č. 1.

### 5.1.2 Analytický výpočet

U analytického výpočtu se vychází z předmětu Pružnost a pevnost II, kde se probírala kruhová a mezikruhová deska. Nejprve se provede uvolnění vazeb (viz obr. 5.2), dále se sepíší okrajové podmínky (1.15) a určí se liniová reakční síla (1.16).



**Obr. 5.2** Uvolnění vazeb verifikační úlohy č. 1.

$$r = 0 \Rightarrow \vartheta = 0 \quad (1.15)$$

$$r = R \Rightarrow \vartheta = 0$$

$$r = R \Rightarrow w = 0$$

$$\tau_{(r)} \cdot 2\pi r + p\pi r^2 = 0 \quad (1.16)$$

$$\tau_{(r)} = -\frac{p \cdot r}{2}$$

Následujícím krokem je určení tuhosti desky (1.17)

$$B = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (1.17)$$

Liniovou reakční sílu (1.16) a tuhost desky (1.17) dosadíme do diferenciální rovnice (1.18), postupnou integrací dostaneme obecný předpis pro natočení  $\vartheta$  (1.19) a posuv  $w$  (1.20).

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot v) \right] = -\frac{\tau}{B} \quad (1.18)$$

$$\vartheta = \frac{p \cdot r^3}{16 \cdot B} - \frac{p \cdot R^2 \cdot r}{16 \cdot B} \quad (1.19)$$

$$w = \frac{p \cdot r^4}{64 \cdot B} - \frac{C_1 \cdot r^2}{4} + C_2 \cdot \ln|r| + C_3 \quad (1.20)$$

Po následném dosazení okrajových podmínek do rovnic (1.19) a (1.20) získáme rovnice posuvu  $w$  (1.21) a natočení  $\vartheta$  (1.22).

$$w = \frac{p \cdot r^4}{64 \cdot B} - \frac{p \cdot R^2 \cdot r^2}{32 \cdot B} + \frac{p \cdot R^4}{64 \cdot B} \quad (1.21)$$

$$\vartheta = \frac{p \cdot r^3}{16 \cdot B} - \frac{p \cdot R^2 \cdot r}{16 \cdot B} \quad (1.22)$$

Jelikož se snažíme vypočítat maximální průhyb desky, tak nás natočení nezajímá. Maximální průhyb desky je v ose zatížení, tedy ve středu zatěžované desky na poloměru  $r = 0$  mm.

$$w = \frac{p \cdot R^4}{64 \cdot B} = 0,1066 \text{ mm} \quad (1.23)$$

Hodnotu vycházející z této rovnice budeme považovat za teoreticky správnou a verifikaci výsledků budeme vztahovat k této hodnotě  $w = 0,1066$  mm.

### 5.1.3 Ansys Workbench

Nejprve je vytvořen statický výpočet pomocí Static structural. Statická analýza slouží k ověření analytického výpočtu a kontrole správnosti modelu vytvořeného v programu Ansys Workbench. Poté je model naimportován do explicitního řešiče a celý příklad je řešen jako rychlý dynamický děj v čase 1 ms.

### 5.1.4 Impact FEM

Model je vytvořen v programu GiD z důvodu jednoduššího zacházení, a také zejména protože GUI nemá pro tvorbu sítě patřičné nástroje. V první části je síť tvořena jedním kruhem vyplněným čtyřúhelníkovými Shell\_4\_BT prvky. Síť však není dostačující z důvodu vygene-

rování velkých prvků uprostřed sítě. V další fázi je deska rozdělena na čtyři části, čímž se došlo k zjemnění prvků ve střední části sítě. Jako poslední je vytvořena síť obsahující trojúhelníkové prvky Shell\_C0\_3 a dochází tedy k opětovnému zjemnění sítě. Především se sjednotila velikost prvků sítě.

Při importu sítě přímo z programu GiD se stává, že se výpočet při načítání elementů zastaví na 90 % a bez jakékoliv chyby nepokračuje. Problém se dá částečně vyřešit tím, že se okrajové podmínky a materiálové charakteristiky zadají až v preprocesoru GUI, tudíž se v programu GiD vytvoří pouze síť. Po obvodu desky jsou nastaveny rychlosti a zrychlení na nulovou hodnotu, čímž se simuluje vetknutí desky. Výpočet a postprocessing byl proveden v programu Impact FEM.

### 5.1.5 Vyhodnocení výsledků verifikační úlohy č. 1

Před vyhodnocováním výsledků je zde uvedeno několik problémů, které se při tvoření úlohy vyskytly.

Původním záměrem bylo vytvořit kompletní model v programu GiD a pouze importovat tento model do řešiče Impact FEM. Při importování a následném spuštění výpočtu se však zobrazilo chybové hlášení o nerozpoznání vazebních podmínek. Při načtení sítě se zadanými materiálovými charakteristikami, bez okrajových podmínek a bez zatížení se výpočet bez problému spustil. Po následném zadání vazebních podmínek se opět nevyskytl žádný problém.

Další postup byl zvolen jako importování sítě s vazebními podmínkami do programu Impact FEM, a až zde bylo nastaveno zatížení.

Při opětovném spuštění analýzy bylo zobrazeno další chybové hlášení, že není zadán materiál. Problém spočíval v tom, že materiál sice zadán byl, ovšem při importu do GUI se oddělil od prvků. Řešením bylo zadání materiálu v GUI.

Takto upravený model se bez chybového hlášení zastavil při načítání elementů na 90 %. Při upravování modelu v GUI zůstávaly ve skriptu příkazy z programu GiD. Příkazy nebyly přiřazeny k uzlům ani elementům, avšak stále setrvaly ve skriptu. Po vymazání přebytečných příkazů nenastala žádná patrná změna, ovšem je možné, že i přes vymazání tyto příkazy ovlivnily načítající se výpočet. Následně byla vytvořena síť v programu GiD. Materiálové charakteristiky, okrajové podmínky byly zadány v programu Impact FEM.

Při exportu z GiD musí být vždy zadán materiál, jinak se importují pouze uzly bez prvků. Jelikož původně zadáný materiál zůstával vepsaný ve skriptu, mohl způsobovat chybu při načítání elementu. Bylo přistoupeno k radikálnímu řešení přejít na preprocessor Gmsh.

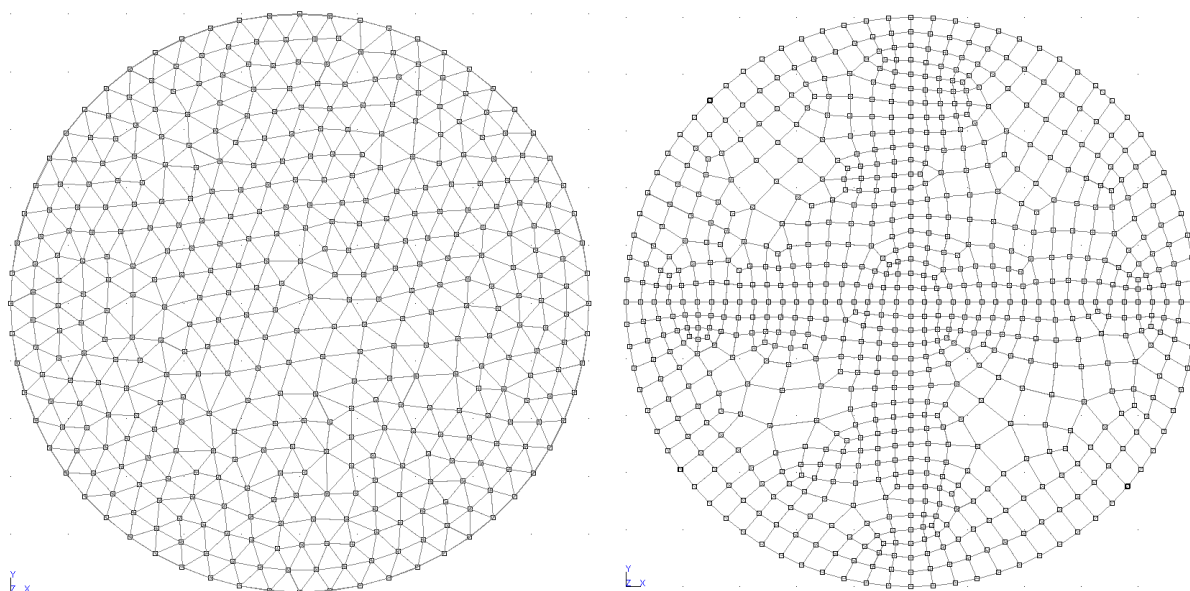
V programu Gmsh nelze nastavovat materiálové charakteristiky ani okrajové podmínky se zatížením, jako je tomu v programu GiD. Takto vytvořenou síť jsem načetl do programu

Impact FEM a byly zadány okrajové podmínky, materiálové charakteristiky a zatížení. Po spuštění výpočtu bylo vše v pořádku a výpočet se úspěšně dokončil. V programu Gmsh jsem tedy vytvořil několik druhů sítí a provedl analýzy. Následně jsem mohl přistoupit k další fázi, a to hodnocení výsledku.

|                    | Typ prvku  | Počet prvků | Počet uzlů | Deformace [mm] | Odchylka [%] |
|--------------------|------------|-------------|------------|----------------|--------------|
| Analytický výpočet | -          | -           | -          | 0,1066         | -            |
| Ansys implicit     | -          | 414         | 3290       | 0,1048         | 2            |
| Ansys explicit     | -          | 2820        | 4413       | 0,1488         | 29           |
| Impact FEM         | Shell_BT_4 | 404         | 435        | 0,0945         | 12,80        |
| Impact FEM         | Shell_C0_3 | 368         | 205        | 0,0960         | 11,04        |
| Impact FEM         | Shell_BT_4 | 2612        | 2693       | 0,0979         | 8,89         |
| Impact FEM         | Shell_C0_3 | 2402        | 1256       | 0,0986         | 8,11         |
| Impact FEM         | Shell_C0_3 | 5329        | 2745       | 0,0989         | 7,79         |
| Impact FEM         | Shell_BT_4 | 4671        | 4780       | 0,0983         | 8,44         |

**Tabulka 1** Výsledky verifikační úlohy č. 1.

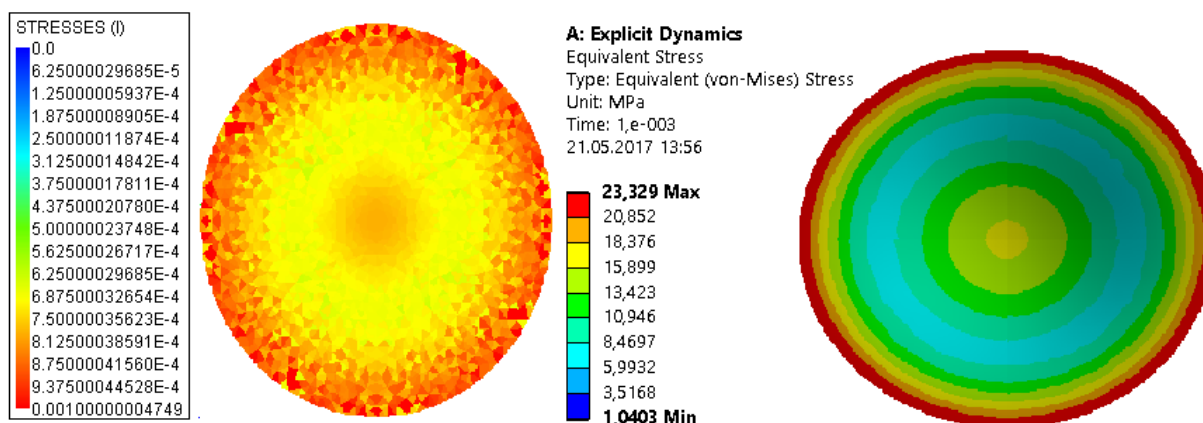
V tabulce 1 čtenář vidí výsledky výpočtu programu Impact FEM, ANSYS Workbench a výsledek analytického výpočtu. Výpočet byl proveden na šesti různých sítích, kdy výsledky všech byly uspokojivé. Maximální odchylka od analytického výpočtu byla 13 % na síti obsahující 404 prvků Shell\_4\_BT a 11 % na síti obsahující 368 Shell\_C0\_3 prvků. Nejlepší dosažený výsledek je 7,9 % na síti obsahující 5329 prvků Shell\_C0\_3. U implicitního řešiče Ansys Workbench bylo dosaženo 2% odchylky se sítí obsahující 414 elementů. Explicitním řešičem Ansys Workbench bylo dosaženo výsledku, který se od analytického výpočtu liší o 29 %. Otázkou je, zda můžeme srovnávat statické zatěžování se zatížením dynamickým, jestli bychom neměli spíše odchylky počítat k výsledkům programu explicitního řešiče. Dále bych se pozastavil nad srovnáním prvků Shell\_BT\_4 a Shell\_C0\_3. Již z prvních dvou výpočtů lze vidět, že použitím menšího počtu prvků Shell\_C0\_3 je dosaženo lepšího výsledku než při použití Shell\_BT\_4 o 1,6 %. Dle mého názoru je tato odchylka způsobena tím, že prvky Shell\_C0\_3 mají trojúhelníkový tvar, tudíž vyplní kruhový prostor mnohem jednodušeji než čtvercové Shell\_BT\_4 prvky (viz obr. 5.3).



**Obr. 5.3** Ukázka sítí, vlevo síť s prvky Shell\_C0\_3 a napravo síť s prvky Shell\_BT\_4.

Na obrázku 5.4 je vidět porovnání napětí vykreslených programy Ansys Workbench a Impact FEM. Programem Ansys Workbench je vykresleno napětí von-Mises. Impact FEM má na výběr napětí v různých osách nebo napětí označeno velkým písmenem I. Bohužel v nápo-vědě ani na stránkách programu není k nalezení, o jaký druh napětí se jedná. Na diskuzním fóru je tento dotaz položen již v roce 2014, avšak doteď je ponechán bez odpovědi.

V porovnání s programem Ansys Workbench se jedná o nejsrovnatelnější napětí jak vykreslením, tak hodnotami. Z tohoto důvodu předpokládám, že bude počítáno podobným způsobem, tedy že se jedná o napětí von-Mises nebo jemu podobné.

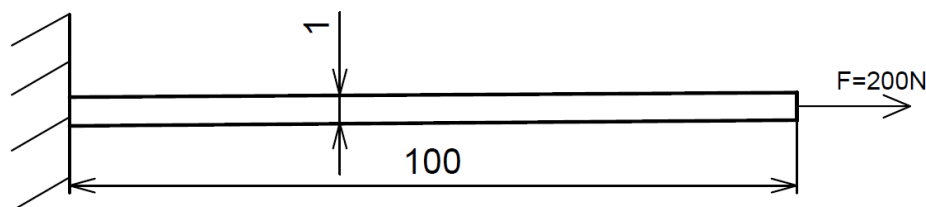


**Obr. 5.4** Porovnání vykreslení napětí (von-Mises) programu Ansys Workbench (vlevo) a (I) Impact FEM (vpravo).

## 5.2 Verifikační úloha č. 2

### 5.2.1 Zadání úlohy

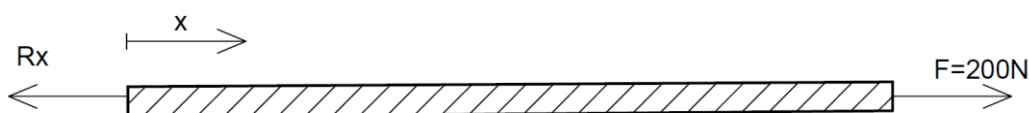
Jedná se o ocelový plech zatížený jednoosým tahem. Plech dlouhý 100 mm, široký 50 mm a tlustý 1 mm je zatížen tahovou silou o velikosti 200 N (viz obr. 5.5). Materiálové charakteristiky jsou modul pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$ , poissonova konstanta  $\mu = 0,3$  a hustota  $\rho = 0.0000078 \text{ M Kg/l}$ . Úkolem je otestovat prvky Shell\_BT\_4 a Shell\_C0\_3.



**Obr. 5.5** Zadání verifikační úlohy č. 2.

### 5.2.2 Analytický výpočet

Analytický výpočet vychází z předpokladu, že je plech zatížený prostým tahem. Úloha musí splňovat: prutové předpoklady, příčný průřez se přibližuje (oddaluje) a následně deformuje, prvek se uvolňuje v nedeformovaném stavu a jedinou nenulovou složkou vnitřních sil v prutu je normálová síla. [11] Výpočet začíná uvolněním vazeb (viz obr. 5.6), dále se určí vnitřní účinky (1.24). a napětí v plechu (1.25). Na závěr vypočteme pomocí Castiglianovy věty posuv v ose x (1.26).



**Obr. 5.6** Uvolnění vazeb verifikační úlohy č. 2.

$$\sum F_x = 0$$

$$-R_x + F = 0$$

$$R_x = F \tag{1.24}$$

$$\sigma_x = \frac{F}{S} = \frac{200}{50 \cdot 1} = 4 \text{ MPa} \tag{1.25}$$

$$u = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^l \frac{Rx}{ES} \cdot \frac{\partial Rx}{\partial F} dx = \frac{F \cdot l}{E \cdot S} = 0,0019 \text{ mm} \quad (1.26)$$

Řešení analytického výpočtu předpokládáme za teoreticky správné. Výsledky obou programů jsou srovnávány s deformací  $u = 0,0019 \text{ mm}$  a napětím  $\sigma_x = 4 \text{ MPa}$ .

### 5.2.3 Ansys Workbench

V programu Ansys Workbench je nejprve vytvořena statická úloha. Výpočtem je ověřen analytický výsledek a zároveň geometrie vytvořená v modeláři Ansys Workbench. Model je dále použit k řešení úlohy pomocí explicitního řešiče. Při zadávání síly je v explicitním řešiči defaultně nastavena funkce Step, což značí, že v časovém okamžiku 0 ms síla skokově vzroste na zatěžovací hodnotu a je konstantní až do konce simulace. Abychom mohli výsledky porovnat s analytickým výpočtem, je potřeba sílu rozložit lineárně v čase. V okamžiku 0 ms je zadáno nulové zatížení, poté síla lineárně roste až do 1 ms, kde působí maximální síla  $F_x = 200 \text{ N}$ .

### 5.2.4 Impact FEM

U druhé verifikační úlohy je použit preprocessor GUI, tudíž odpadají problémy s importem do processorové části. Síť je poměrně jednoduchá, takže není problém ji připravit pouze se základními nástroji.

V první části je vytvořena síť pomocí prvku Shell\_4\_BT. K zamezení posuvu v ose  $x$  jsou nastaveny vazební podmínky  $u_x = 0$  a  $v_x = 0$ . Dále je zadáno zatížení  $F_x = [0,0,1,0.2]$ . Stejně jako u programu Ansys Workbench je v čase 0 ms zatížení nulové a poté lineárně roste do 1 ms, kde působí maximální síla  $F_x = 200 \text{ N}$ . Pro nastavení materiálového modelu je použita místní knihovna, z níž je vybrán materiál steel elastic.

Po importu do processoru výpočet hlásí chybu v okrajových podmínkách. Ve skriptu je vypsáno zatížení z předchozího výpočtu, které zde již nemá být. Jelikož není zatížení přiřazeno k žádným uzlům, nemělo by zasahovat do výpočtu. Při smazání přebytečného zatížení přímo ze skriptu, není dosaženo žádných změn. Chyba je odstraněna přepsáním původní podmínky, namísto vytvoření nové. Opětovným zkoušením je zjištěno, že název nové okrajové podmínky obsahuje mezeru, což podle všeho Impact FEM nedokáže přečíst.

Po spuštění simulace se výpočet, jako u úlohy č. 1, zastaví na 90 % načítání elementů. Rovněž není možné soubor nahrát do preprocessoru, jelikož program hlásí poškození souboru. Jedinou možností je vytvoření nového modelu. Při tvorbě je použita nově vytvořená vazební podmínka, avšak výpočet je opět zastaven na 90 %. Další možností je vytvoření stejného modelu ve starší verzi Impact FEM 0.7.06.040, kde je výpočet proveden v pořádku.

Chyba byla nejspíše způsobena nahráváním starých okrajových podmínek do skriptu. Po opětovném stažení, extrahování a spuštění nové verze Impact FEM, problém zmizel.

Nakonec jsou vytvořeny 4 sítě pomocí prvků Shell\_BT\_4 a 4 sítě pomocí prvků Shell\_CO\_3, na nichž je provedena verifikace.

### 5.2.5 Vyhodnocení výsledků verifikační úlohy č. 2

Výsledky dosažené programem Impact FEM jsou v porovnání s oběma metodami posunuty o řád výše. Mělo by platit, že se stoupajícím počtem elementů se výsledek zpřesňuje. V tabulce 2 je vidět, že u této úlohy je tomu právě naopak. S rostoucím počtem prvků se výpočet neustále vzdaluje od správného řešení.

|                    | Typ analýzy | Prvek                | Počet prvků | Deformace [mm] | Odchylka [%] |
|--------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------|--------------|
| Analytický výpočet | -           | -                    | -           | 0,0019         | -            |
| Workbench          | static      | čtyřúhelníkový prvek | 200         | 0,002          | 5            |
| Workbench          | explicit    | čtyřúhelníkový prvek | 210         | 0,0023         | 21           |
| Workbench          | explicit    | čtyřúhelníkový prvek | 1225        | 0,0022         | 16           |
| Impact FEM         | sít' 1      | Shell_BT_4           | 50          | 0,0111         | 484          |
| Impact FEM         | sít' 2      | Shell_BT_4           | 200         | 0,0119         | 526          |
| Impact FEM         | sít' 3      | Shell_BT_4           | 528         | 0,0254         | 1237         |
| Impact FEM         | sít' 4      | Shell_BT_4           | 2000        | 0,0402         | 2016         |

**Tabulka 2** Výsledky verifikační úlohy č. 2.

Z důvodu opakovaného zhroucení sítě, jsou pro tuto úlohu prvky shell\_CO\_3 nepoužitelné (viz obr. 5.7).



**Obr. 5.7** Zhroucení sítě při použití Shell\_CO\_3 prvků.

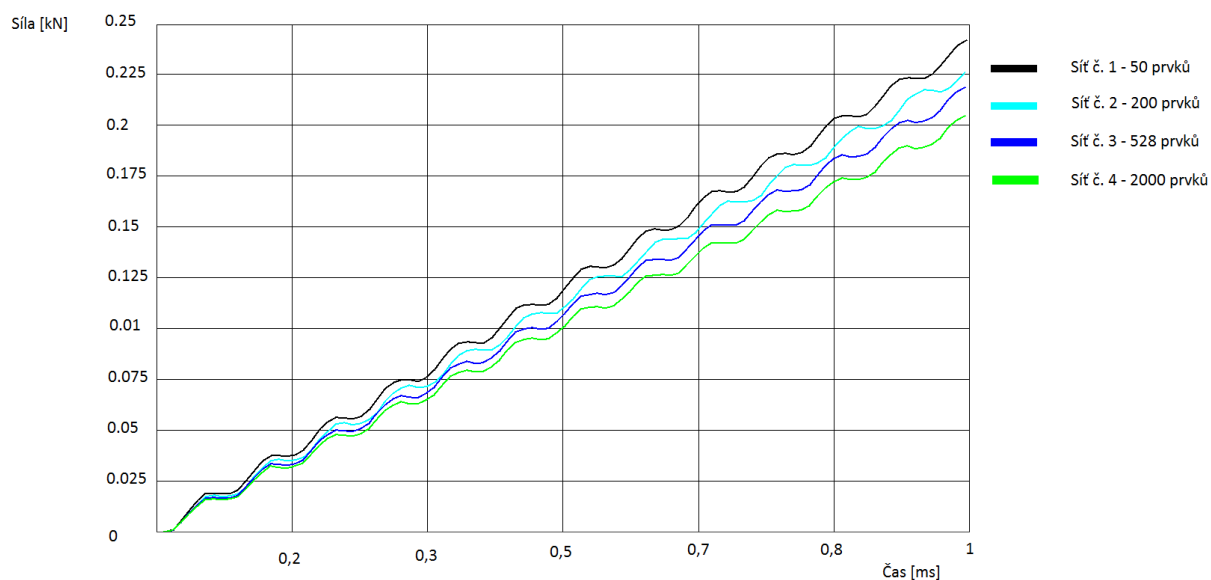
Dále jsou uvedeny některé z chyb, které se podařilo odhalit. Tyto chyby ovšem nejsou důvodem znehodnocení výsledku o řád.

První chyba je v samotném zatěžování, jelikož síla je závislá na počtu elementů (viz graf 5.1). Z grafů lze vyčíst, že při nižším počtu elementů je dosaženo zatěžovací síly  $F_x = 200$  N v kratším časovém úseku, přičemž síla dál lineárně roste. Další růst způsobuje zvětšení zatěžovací síly, až o 40 N, v konečném časovém okamžiku. S rostoucím počtem elementů se v časovém okamžiku 1 ms zatížení přibližuje k zadané síle. V případě sítě č. 4 je zatížení nejpřesnější, přesto výsledky nevykazují výrazné zlepšení. Z tohoto důvodu chyba není brána jako závažná a výsledky jsou vyhodnoceny v konečném časovém okamžiku 1 ms.

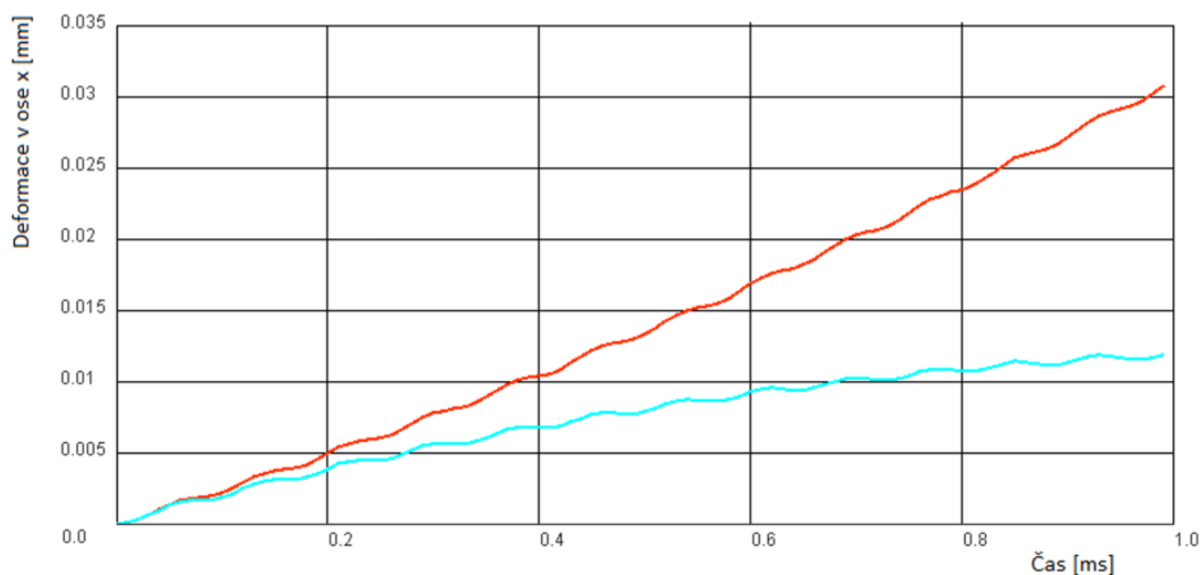
Zatěžovací síla globálně roste lineárně, avšak lokálně vykazuje sinusové chování (viz. graf 5.1). Toto chování je zanedbáváno, z důvodu nezanesení výrazné chyby do výpočtu.

Na obrázku 5.8 lze vidět model se sítí č. 2 v čase 1 ms. Deformace by měla od místa vetknutí růst lineárně po celé délce modelu. Z obrázku je patrné, že tomu tak není, a místo lineární deformace se vytvořily deformační pruhy tzv. izolinie. Špatně vykreslené deformace můžou do vyhodnocování výsledku vnést podstatnou chybu. Musí být zohledněno, zda budou brány výsledky deformace z jedné nebo z druhé izolinie (viz graf 5.2). V grafu jsou vykresleny uzly v průběhu zatěžování z oblasti obou deformačních pruhů. Červená izolinie se chová globálně lineárně, naopak světle modrá izolinie se chová nelineárně. Navzdory skutečnosti, že předpokládaná deformace je lineární, jsou výsledky brány z modré izolinie, která se více přibližuje analytickému výpočtu. Dále bych zdůraznil, že deformační pruhy jsou vyobrazeny u všech sítí.

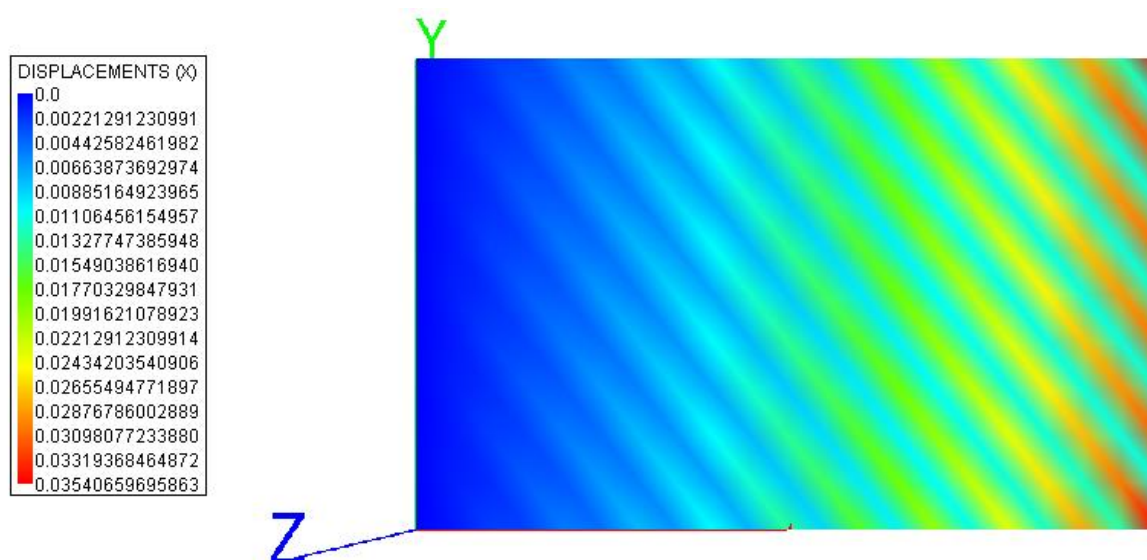
Výše uvedená chyby můžou být způsobeny nestejným zatížením uzlů. Na grafu 5.3 je ukázáno rostoucí zatížení dvou uzlů ležících vedle sebe. Z grafu vyplývá, že uzly nejsou stejnoměrně zatěžovány, tudíž vytvářejí nestejnou deformaci a vznikají izolinie.



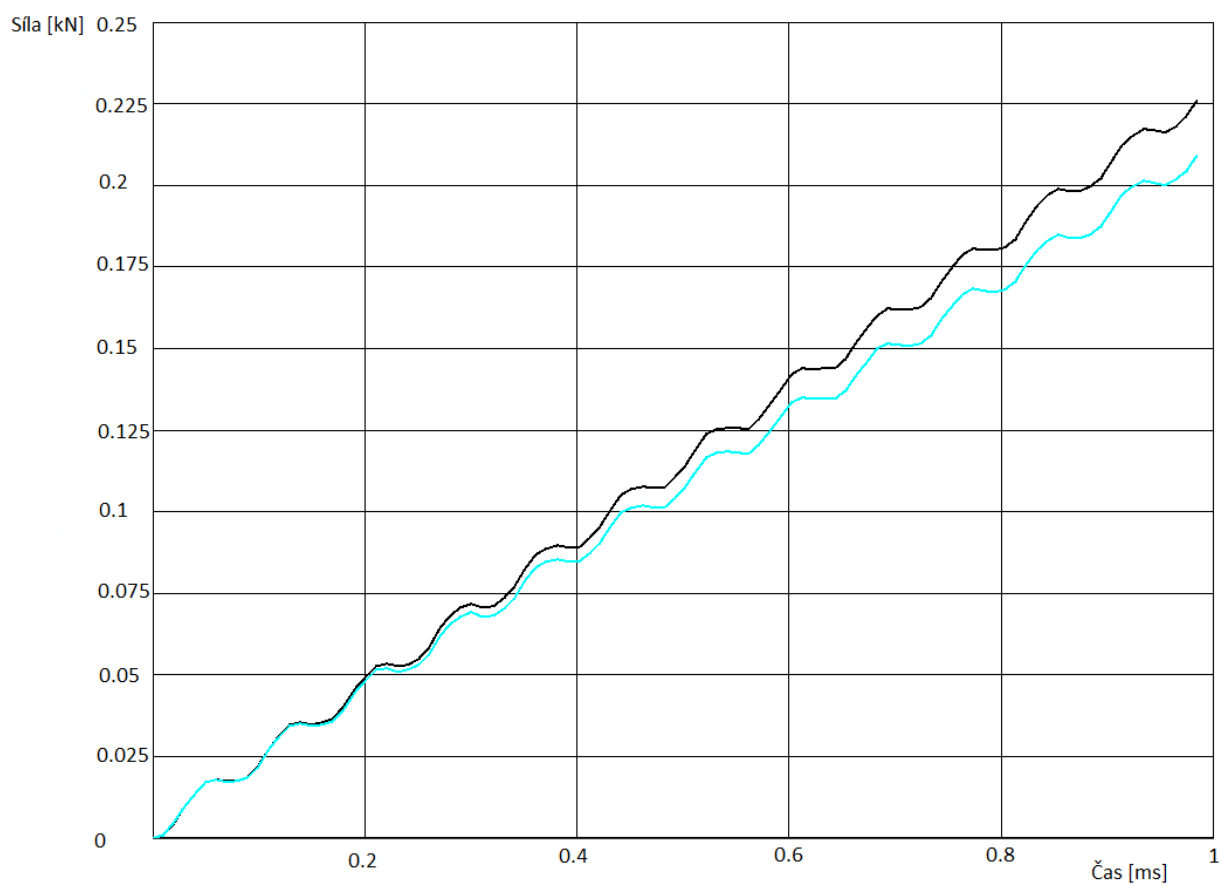
**Graf 5.1** Vykreslení zatěžovacích sil v závislosti na počtu prvků.



**Graf 5.2** Zobrazení dvou různých deformačních izolinií v průběhu zatěžování. Červená křivka patří uzlu v oblasti červené izolinie z obrázku 5.9 a světle modrá křivka patří uzlu z oblasti světle modré izolinie.

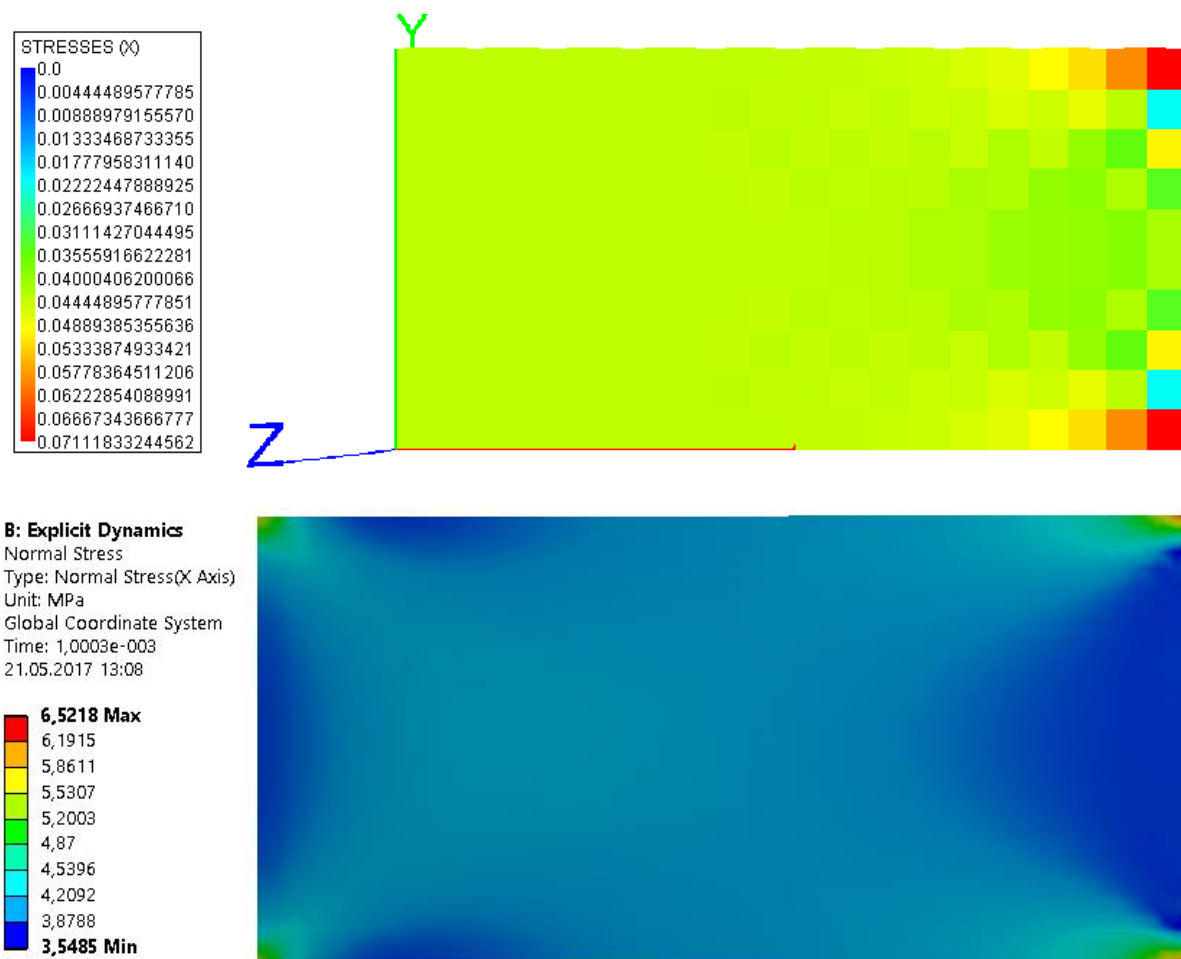


**Obr. 5.8** Zobrazení deformovaného modelu se sítí č. 2 v čase 1 ms.

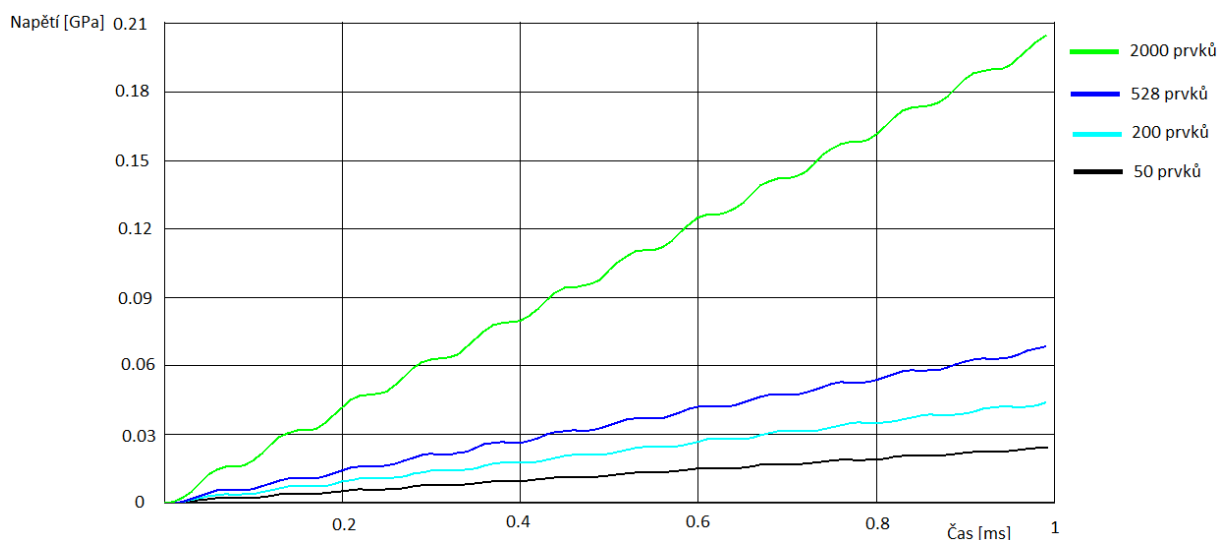


**Graf 5.3** Zobrazení zatížení dvou uzlů vedle sebe.

Výsledky napětí jsou rovněž posunuty o řád výše, avšak vykreslení je obdobné jako u programu Ansys Workbench (viz obr. 5.9). S přibývajícím počtem elementů roste také napětí (viz graf 5.4). Rozdíl mezi jednotlivými sítěmi dosahuje až 180 MPa, přičemž nejvíce vzdálený je výsledek sítě č. 4.



**Obr. 5.9** Vykreslení napětí v čase 1 ms. Impact FEM síť č. 2 (nahore), explicitní řešič Ansys Workbench (dole).

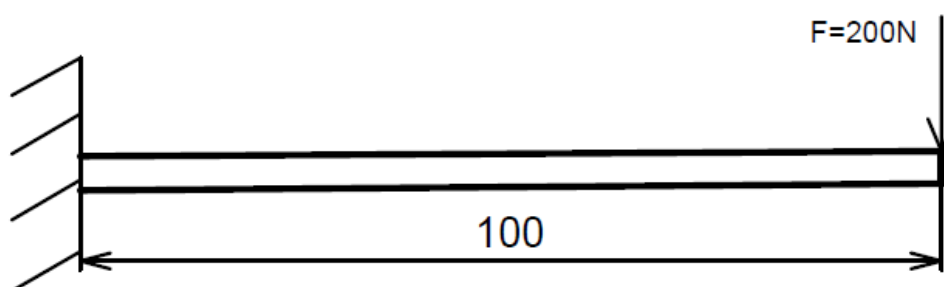


**Graf 5.4** Vykreslení napětí v závislosti na čase a počtu elementů.

### 5.3 Verifikační úloha č. 3

#### 5.3.1 Zadání úlohy

Ocelová tyč čtvercového průřezu o straně 15 mm a délce 100 mm je zatížena silou o velikosti  $F = 200 \text{ N}$  ve směru osy Y (viz obr. 5.10). Tyč je zadána pomocí modulu pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$ , poissonovou konstantou  $\mu = 0,3$  a hustotou  $\rho = 0,0000078 \text{ M Kg/l}$ . Hlavním cílem úlohy je ověření prostorových prvků Solid\_Iso\_6 a Solid\_Iso\_4.

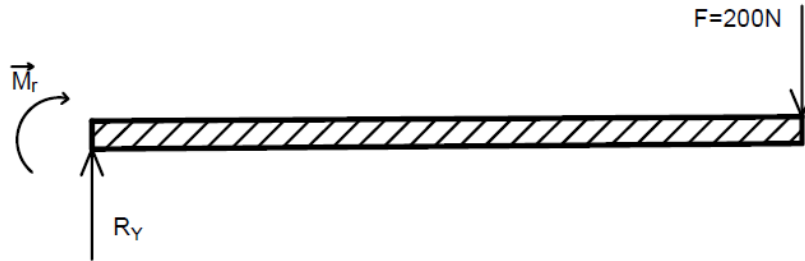


**Obr. 5.10** Zadání verifikační úlohy č. 3.

#### 5.3.2 Analytický výpočet

Analytický výpočet vychází z předpokladu, že prut namáháme prostým ohybem. Předpokládáme tedy, že příčné průřezy se vzájemně natáčíjí kolem osy ležící v příčném průřezu a následně se deformují. Dalším předpokladem je, že prut je zatížen pouze ohybovým momentem. [11]

Postup je stejný jako v předchozích případech. Nejprve je nosník uvolněn (viz obr. 5.11) a je vypočtena reakční síla a moment (1.27). Dále je určen osový kvadratický moment a modul průřezu v ohybu (1.28). Následně je pomocí Castigliánovy věty zjištěn posuv na konci nosníku (1.29). V poslední fázi je spočteno napětí nosníku v bodě vetknutí (1.30).



**Obr. 5.11** Uvolnění nosníku.

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 & \sum M &= 0 \\ -R_y + F &= 0 & -M_r - F \cdot l &= 0 \\ R_y &= F & M_r &= -F \cdot l \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$J_y = \frac{b^4}{12} \quad W_o = \frac{J_y}{b/2} \quad (1.28)$$

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^l \frac{M_r}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_r}{\partial F} dx = \frac{-F \cdot l^3}{E \cdot J_y \cdot 3} = -0,0752 \text{ mm} \quad (1.29)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_r}{W_o} = -35,56 \text{ MPa} \quad (1.30)$$

Řešení vycházející z těchto rovnic budeme považovat za teoreticky správná a verifikaci výsledků je vztažena k hodnotám  $w = -0,0099 \text{ mm}$  a  $\sigma = 36 \text{ MPa}$ .

### 5.3.3 Výpočet Ansys Workbench

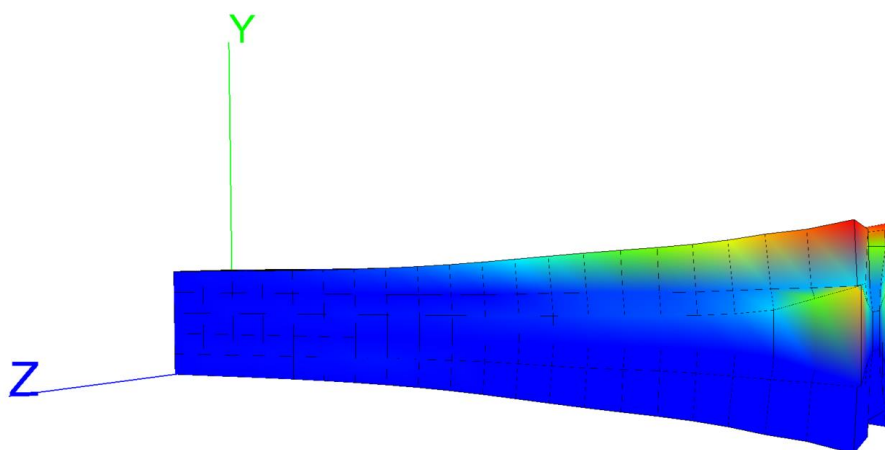
Pro ověření analytického výpočtu a výpočtového modelu je vytvořena statická analýza. Výsledek při zachování defaultního nastavení je  $w = -0,0756 \text{ mm}$ . Stejný model byl použit také pro explicitní analýzu. Výsledek explicitního řešení je  $w = -0,0688 \text{ mm}$ . Z důvodu, který je zmíněn v bodu 5.3.4, je nastaven materiál jak s lineární (elastickou) částí charakteristiky, tak nelineární (plastickou). Nyní se hodnota průhybu pohybuje okolo  $w = -0,0688 \text{ mm}$ . Výsledek je shodný jako při použití materiálu s pouze elastickou charakteristikou. Důvodem je malé zatížení, materiál se tedy vůbec nedostane do oblasti plastické deformace. Tento závěr nám potvrzuje i analytický výpočet (1.30).

### 5.3.4 Výpočet Impact FEM

GUI preprocessor programu Impact FEM nemá zabudovaný nástroj k vytvoření prostorové sítě. Model byl tedy vytvořen v programu GiD. Program Gmsh není využíván, zejména z důvodu složitějšího vytváření sítě a špatného exportu do programu Impact FEM.

V úloze jsou použity hexahedrální prvky Solid\_Iso\_6 a tetrahedrální prvky Solid\_Iso\_4. Rychlosti a zrychlení jsou na jedné straně nosníku nastaveny na nulovou hodnotu, čímž se simuluje jednostranně vetknutý nosník. Následně je přidána síla  $F_y = [0,0,1,-0.2]$ , z čehož vyplývá, že v časovém okamžiku 0 ms je síla nulová a lineárně roste až do 1 ms. Zde působí síla o velikosti  $F = 200$  N v záporném směru osy Y. Po nastavení všech výše zmíněných okrajových podmínek a spuštění výpočtu, dojde k zhroucení modelu. Průběh výpočtu je v pořádku, přičemž při vygenerování výsledku se tyč zobrazí v okamžiku 0 ms. Po dosažení časového okamžiku 0,05 ms dojde ke zhroucení modelu (viz obr. 5.12).

První předpokládaná chyba je v zadání zatížení. Následně jsou aplikovány síly v osách x a y, o velikostech 2 N – 10 kN. Výpočet pokaždé reaguje zhroucením modelu. Druhou možností je předělání okrajových podmínek, jelikož je vycházeno z předpokladu špatného zadání vazeb. Po vyzkoušení různých vazebních podmínek nejsou zaznamenány žádné změny. Poslední možností je vyzkoušení změny materiálu. Ocel s elastickou charakteristikou se vyměnila za ocel s charakteristikou elastoplastickou. K zhroucení modelu již nedochází, tudíž se dále pracuje pouze s elastoplastickým modelem materiálu. Zadán je pomocí modulu pružnosti  $E = 210$  GPa, poissonovy konstanty  $\mu = 0,3$ , hustoty  $\rho = 0,0000078$  M Kg/l, meze kluzu  $\sigma_k = 0,180$  GPa, a konstanty  $EP = 0,1$ . Konstanta je definována jako zpevňovací faktor v oblasti plastické deformace. Zatížení je natolik malé, že by v nosníku nemělo dojít k překročení meze kluzu materiálu. Z tohoto důvodu předpokládáme pouze elastické chování materiálu.



**Obr. 5.12** Zhroucení modelu verifikační úlohy č. 3. Vykreslena je deformace v ose Y v čase 0,05 ms. Zatížení je silou  $F = -200$  N v ose Y.

### 5.3.5 Vyhodnocení výsledků verifikační úlohy č. 3

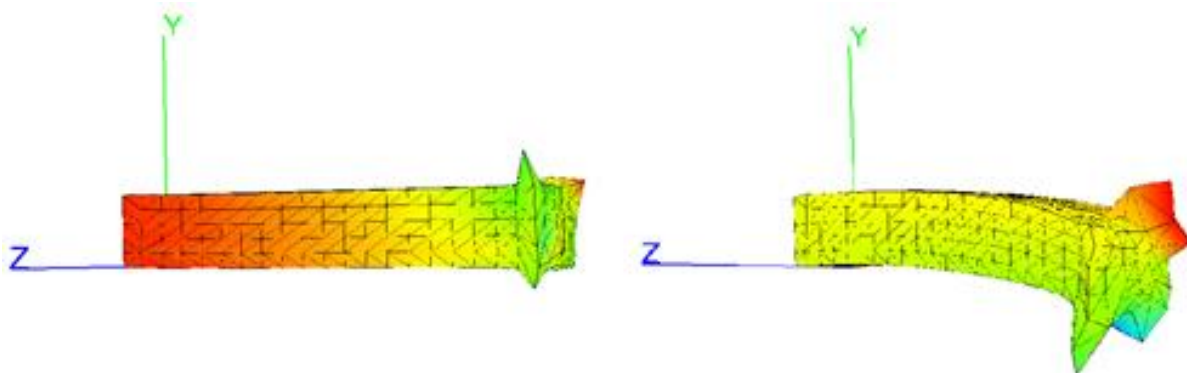
Deformace se zcela vymyká předpokládaným výsledkům. Napětí je posunuto o řád výše, navíc ne zcela odpovídá vykreslení programu Ansys Workbench.

Průhyby vypočtené programem Impact FEM odpovídají v programu Ansys Workbench zatížení 20 kN, tedy 100krát většímu. Deformace jsou tedy zcela mimo rámec odchylek nebo nepřesností (viz tabulka 3). S přibývajícím počtem elementů se výsledky vzdalují od teoreticky správného řešení a přibližují se k hodnotě  $w = -61$  mm. Výpočet by neměl být ovlivněn změnou materiálu, jelikož jak pro elastický, tak i pro elastoplastický materiál vychází výsledek v programu Ansys Workbench stejně, jak bylo předpokládáno.

|                    | Typ analýzy | Prvek       | Počet prvků | Deformace [mm] |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Analytický výpočet | -           | -           | -           | -0,0752        |
| Workbench          | static      | Hexahedral  | 180         | -0,0756        |
| Workbench          | explicit    | Hexahedral  | 500         | -0,0694        |
| Workbench          | explicit    | Hexahedral  | 22 500      | -0,0669        |
| Impact FEM         | explicit    | Solid_Iso_6 | 135         | -11,97         |
| Impact FEM         | explicit    | Solid_Iso_6 | 500         | -16,46         |
| Impact FEM         | explicit    | Solid_Iso_6 | 2 000       | -60,56         |
| Impact FEM         | explicit    | Solid_Iso_6 | 5 000       | -60,8          |

**Tabulka 3** Výsledky verifikační úlohy č. 3.

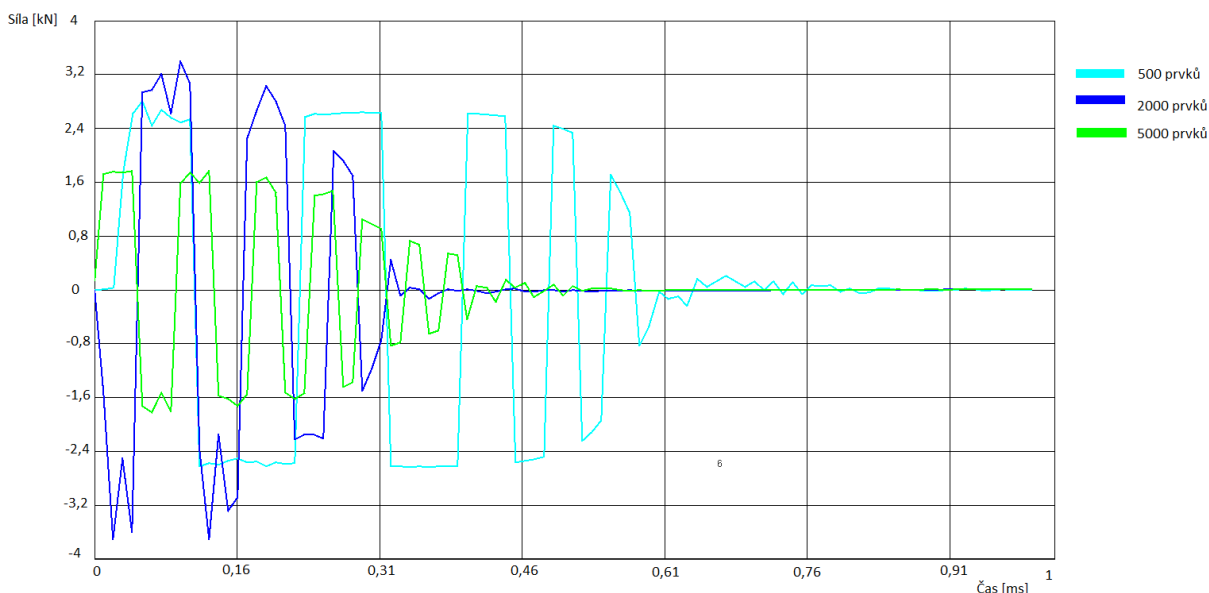
Pro analýzu nejsou použity prvky Solid\_Iso\_4 z důvodu opakovaného selhání modelu. Ke zhroucení dochází nezávisle na typu či velikosti zatížení. Na obrázku 5.13 je ukázáno selhání modelu při tahovém zatížení na levé straně a při ohybovém zatížení na straně pravé.



**Obr. 5.13** Zhroucení modelu při použití prvku Solid\_Iso\_4. Vlevo tah 200 N, napravo ohyb 200 N.

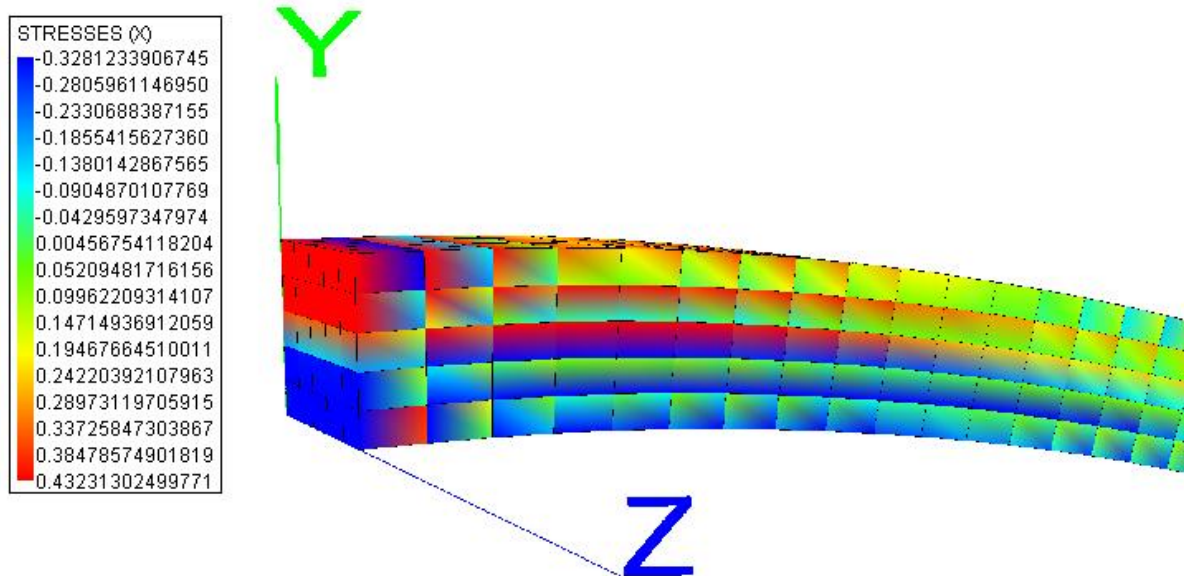
Při vykreslování trackerů síly se nepodařilo vytvořit graf, který by vyhovoval předpokládaným křivkám, přičemž trackery jsou umístěny na uzly v místě vetknutí. Síly rostou do velikosti několika kN, oscilují a poté se ustálí na nulové hodnotě (viz graf 5.5).

Druhou možností je sledování momentů vznikajících v průběhu zatěžování. Předpokládané momentové zatížení je v ose z. Avšak při vykreslení výsledků je moment, jak v místě vetknutí, tak i po celé délce, nulový. Dále je uvažováno, zda prvky nejsou natočeny jiným směrem než globální osa. Díky tomu by byly momenty vykresleny v jiném souřadném systému. Ačkoli jsou změněny osy vykreslování, výsledek je opět nulový v jakémkoliv místě nosníku.



**Graf 5.5** Vykreslení trackerů sil v závislosti na čase a počtu elementů.

Dle výpočtu (1.30) a programu Ansys Workbench je napětí okolo 40 MPa. Při vykreslení napětí programem Impact FEM je dosaženo hodnot okolo 400 MPa. Vykreslení napětí na první pohled odpovídá předpokládanému stavu. V horní části jsou složky tahové a ve spodní části je napětí tlakové, avšak při detailnějším zkoumání lze vidět, že v tahových složkách napětí jsou i místa tlaková a naopak (viz obr. 5.14).



**Obr. 5.14** Vykreslení ohybového napětí programem Impact FEM. Zobrazena deformace v ose Y.

## 6. RADY PRO BUDOUCÍ UŽIVATELE

Poslední bod práce je zasvěcen kapitole, která obsahuje užitečné rady pro budoucí uživatele programu Impact FEM.

- Při tvorbě 2D sítě je vhodnější použít preprocessor programu Impact FEM nebo programu Gmsh. V případě 3D sítě je jedinou možností použití programu GiD.
- V případě programu GiD je nutno zapnout prvek Impact ihned při spuštění, jinak hrozí zaseknutí programu a následná ztráta vytvořené sítě.
- Zatížení je lepší rozdělit alespoň do dvou časových kroků. Například v nulovém čase zadat nulové zatížení a v čase konečném zatížení maximální.
- Názvy okrajových podmínek nesmí obsahovat mezery v názvech a musí se dbát na rozlišování čárek a teček.
- Uložení souboru je možné pouze za použití správného formátu .in nebo .res.
- Po načtení okrajových podmínek do processoru je třeba řádně zkontrolovat jejich správné nastavení. Někdy staré okrajové podmínky zůstávají v mezipaměti a načtou se společně s novým skriptem. V některých případech stačí tyto podmínky smazat, ale občas je uživatel nucen program restartovat. V krajní situaci je potřeba znovu extrahovat Impact FEM, čímž uživatel přijde o vytvořené okrajové podmínky.
- Trackery se zadávají buď vepsáním přímo do skriptu anebo pomocí programu GiD společně s okrajovými podmínkami. Takto zadané trackery se ukládají defaultně do složky, ze které je program Impact FEM spuštěn.

## 7. ZÁVĚR

V této práci byl představen program Impact FEM, tedy explicitní řešič na bázi metody konečných prvků. Na úvod byl čtenář seznámen s metodou konečných prvků. Dále byl představen program Impact FEM a jeho části, ze kterých se skládá. Následující část byla věnována tutoriálům. Nejdůležitější část se zabývala verifikačními úlohami. V poslední části byl sepsán souhrn poznatků pro budoucí uživatele programu Impact FEM.

Na začátku zhodnocení bych rád uvedl, že program Impact FEM je první open-source, se kterým jsem se setkal. Veškerá srovnání jsou provedena s komerčním programem Ansys Workbench.

S hodnocením samotného programu začnu od základu, tedy preprocesorem GUI. Dle mého názoru není dostačující. Pro tvorbu jednoduchých sítí disponuje všemi potřebnými funkcemi, avšak při potřebě analýzy náročnějšího modelu není schopen generace sítě. Program Impact FEM ovšem není zaměřený na preprocessing a v nápovědě je doporučeno použití programů Gmsh a GiD. Gmsh je velice kvalitní program pro tvorbu modelu a sítě, ale propojení s programem Impact FEM není zcela ideální. Problém nastává při importu objemových prvků. V nápovědě programu Impact FEM je preferován k tvorbě modelu program GiD. Program je také velice kvalitní a dobře se s ním pracuje, navíc obsahuje nástroje pro tvorbu modelu přímo pro program Impact FEM.

Processorové části bych vytknul pouze již několikrát zmíněný problém s ukládáním okrajových podmínek do mezipaměti.

V postprocessorové části jsem na žádný výrazný problém nenarazil. Jedinou nevýhodou je, že není možné vytvořit animaci přímo v postprocesoru. Tato skutečnost se však dá obejít s využitím programu GiD.

Tutoriály z webové stránky Impact FEM jsou, i přes pár nejasností, udělány kvalitně. Bez větších problémů se podle nich dá naučit ovládat program Impact FEM a program GiD.

Za nejtěžší a zároveň nejrozporupnější část pokládám verifikační úlohy. Jednotlivé úlohy byly navrženy co nejjednodušeji z důvodu usnadnění posouzení použitelnosti programu Impact FEM. Na základě provedených úloh můžeme konstatovat, že program má problémy s vykreslováním napětí. Deformace je v případě první verifikační úlohy uspokojivá. U druhé úlohy je sice o řád posunutá, ale relativně odpovídá stavu zatěžování, kdežto u třetí úlohy je deformace zcela zcestná a vůbec neodpovídá velikosti zatěžující síly. Z výše uvedených důvodů lze říci, že je program nevyhovující a uživatel se nemůže spoléhat na výsledky vypočtené tímto programem. Připouští se skutečnost, že za příčinou nepřesných výsledků mohou být malé zkušenosti v oboru explicitních výpočtů. Avšak vzhledem k tomu, že jsem se programem zabýval více než půl roku a nebyl jsem schopen dojít lepších výsledků, předpokládám, že program není zcela doladěn.

Přestože se u testovacích úloh zcela neosvědčil, nerad bych program zcela zavrhl. Myslím si, že v některých konkrétních situacích může být velice užitečný a naprosto dostačující. Ovšem při porovnání s komerčními programy je tento program stále na začátku svých možností. Například úlohu, kterou jsem v programu Ansys Workbench měl sestrojenou v řádu několika desítek minut, v programu Impact FEM jsem zpracovával několik desítek hodin.

Za největší problém považuji technickou podporu. V případě problému je uživatel odkázán na fórum, které je však bez jakékoliv odezvy. Poslední odpovědi na fóru od tvůrců programu jsou z prosince roku 2014. Také mnou vznesený dotaz čeká již čtyři měsíce na odpověď, tudíž jsem se rozhodl napsat žádost o pomoc jednomu z tvůrců programu Impact FEM. Bohužel také zcela bez úspěchu.

I přes všechna negativa jsem rád za možnost vypracování verifikace programu Impact FEM, jakožto mé bakalářské práce. Osvojil jsem si práci s programovým prostředím, které pracuje na principu MKP. V průběhu zpracování jsem se naučil tvorbu výpočtového modelu a vyhodnocování výsledků. Určitým přínosem bylo také systematické dohledávání chyb, což mi v budoucnu pomůže při práci v jiném programu MKP. V neposlední řadě jsem se také naučil spoustu nových funkcí při používání explicitního řešiče programu Ansys Workbench.

Závěrem bych rád zhodnotil program Impact FEM jako velice zajímavou myšlenku a vzhledem ke skutečnosti, že je zcela zdarma, jako dobrou výukovou pomůcku. Pro využití programu při běžných výpočtech úloh mechaniky těles je potřeba program náležitě doladit.

---

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II*. Brno, 2011.
- [2] ZIENKIEWICZ, O.C a R.L TAYLOR. *The Finite Element Method: Volume 1*. 5 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, 689 s. ISBN 0750650494.
- [3] TOMÁNEK, Jiří. *Zpracování přehledu MKP aplikací na bázi Open Source*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [4] TURNER, M.J. Stress and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956, **23**(9), 1-22.
- [5] COURANT, R. Variational methods for solution of problems of equilibrium and vibration. *Bull.Am.Math.Society*. 1943, **49**(1), 1-23.
- [6] ONDRÁČEK, Emanuel. *Mechanika těles: pružnost a pevnost II*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 8021432608.
- [7] LEE, Huei-Huang. *Finite element simulations with ANSYS workbench 14: [theory, applications, case studies]*. 1. Mission: SDC Publications, 2012, 602 s. : il. 1 CD-ROM. ISBN 9781585037254.
- [8] *Dynamic Finite element Program Suite Impact* [online]. b.r. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.impact-fem.org/>
- [9] *Gmsh* [online]. b.r. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://gmsh.info/>
- [10] *The personal pre and post processor* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.gidhome.com/>
- [11] JANÍČEK, Přemysl. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 3., přeprac. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 802142592x.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Použité symboly

| Symbol          | Jednotka             | Popis                        |
|-----------------|----------------------|------------------------------|
| $K$             | [-]                  | matice tuhosti               |
| $U$             | [-]                  | matice neznámých parametrů   |
| $F$             | [-]                  | matice zatížení              |
| $u$             | [mm]                 | posuv v ose x                |
| $w$             | [mm]                 | posuv v ose y                |
| $v$             | [mm]                 | posuv v ose z                |
| $\varepsilon_x$ | [-]                  | délkové přetvoření v ose x   |
| $\varepsilon_y$ | [-]                  | délkové přetvoření v ose y   |
| $\varepsilon_z$ | [-]                  | délkové přetvoření v ose z   |
| $\gamma_x$      | [-]                  | délkové přetvoření v ose x   |
| $\gamma_y$      | [-]                  | délkové přetvoření v ose y   |
| $\gamma_z$      | [-]                  | délkové přetvoření v ose z   |
| $\sigma_x$      | [MPa]                | napětí v ose x               |
| $\sigma_y$      | [MPa]                | napětí v ose y               |
| $\sigma_z$      | [MPa]                | napětí v ose z               |
| $\tau_{xy}$     | [MPa]                | smykové napětí v rovině xy   |
| $\tau_{yz}$     | [MPa]                | smykové napětí v rovině yz   |
| $\tau_{zx}$     | [MPa]                | smykové napětí v rovině zx   |
| $o_x$           | [ $N \cdot m^{-3}$ ] | objemová síla ve směru osy x |
| $o_y$           | [ $N \cdot m^{-3}$ ] | objemová síla ve směru osy y |
| $o_z$           | [ $N \cdot m^{-3}$ ] | objemová síla ve směru osy z |
| $E$             | [MPa]                | Modul pružnosti v tahu       |
| $G$             | [MPa]                | Modul pružnosti ve smyku     |
| $M$             | [-]                  | matice hmotnosti             |
| $C$             | [-]                  | matice tlumení               |
| $t$             | [s]                  | čas                          |
| $L$             | [mm]                 | rozměr nejmenšího prvku sítě |
| $\rho$          | [kg/m <sup>3</sup> ] | hustota                      |
| $A$             | [m/s <sup>2</sup> ]  | zrychlení                    |
| $p$             | [MPa]                | tlak                         |
| $\mu$           | [-]                  | poissonova konstanta         |

---

|              |                   |                                                    |
|--------------|-------------------|----------------------------------------------------|
| $M_r$        | $[N \cdot m]$     | Moment                                             |
| $r$          | $[mm]$            | proměnná veličina (poloměr)                        |
| $R$          | $[mm]$            | poloměr desky                                      |
| $\vartheta$  | $[^\circ]$        | natočení desky                                     |
| $\tau_{(r)}$ | $[N \cdot m]$     | liniová síla                                       |
| $B$          | $[MPa \cdot m^3]$ | ohybová tuhost desky                               |
| $R_x$        | $[N]$             | reakční síla v ose x                               |
| $M_r$        | $[N \cdot m]$     | reakční moment                                     |
| $J_y$        | $[m^4]$           | osový kvadratický moment                           |
| $W_o$        | $[m^3]$           | modul průřezu v ohybu                              |
| $\sigma_k$   | $[MPa]$           | mez kluzu                                          |
| EP           | $[-]$             | zpevňovací konstanta v oblasti plastické deformace |

**Použité zkratky**

|       |                                                |
|-------|------------------------------------------------|
| tzn.  | to znamená                                     |
| MKP   | metoda konečných prvků                         |
| aj.   | a jiné                                         |
| FEM   | finite element method (metoda konečných prvků) |
| resp. | respektive                                     |
| apod. | a podobně                                      |
| atd.  | a tak dále                                     |