

# Pevnostní analýza rámu stavební buňky

Šimonová Lucie

---

Bakalářská práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2017/2018**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Lucie Šimonová**  
**Osobní číslo: T16528**  
**Studijní program: B3909 Procesní inženýrství**  
**Studijní obor: Technologická zařízení**  
**Forma studia: kombinovaná**

**Téma práce: Pevnostní analýza rámu stavební buňky**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Vypracujte literární studii k danému tématu**
- 2. Provedte analýzu současného stavu**
- 3. Navrhněte pevnostní řešení rámu**
- 4. Provedte ekonomické zhodnocení**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**2. ledna 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 27. dubna 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ŠIMONOVÁ LUCIE


Obor: T2

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15.5.2018



.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo;

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se věnuje pevnostní analýze rámu stavební buňky. Model byl nejprve vytvořen v programu Autodesk Inventor ve 3D a poté byl následně převeden do programu Siemens NX 11, kde byla postupně provedena pevnostní analýza rámu. 3D model se musel převést na jednoduchý čárový model, abychom jednotlivým čarám byly schopni přiřadit síť z 1D elementů. Po důkladné přípravě modelu byla spuštěna pevnostní analýza, která vypočítala chování rámu při různých velikostech zatížení, které na rám skutečně působí. Bylo také ověřeno, zda zatížení, které působí na vyrobený kontejner, dokáže navržený rám unést a kolikrát stohovatelný tedy je.

Klíčová slova: pevnostní analýza, rám stavební buňky, druhy namáhání, FEM systém

## **ABSTRACT**

This thesis is focuses on stress-strain analysis of a modular unit frame.

The frame model was created in the Autodesk Inventor and subsequently transferred into the Siemens NX 11 system, where the stress-strain analysis was performed. The 3D model had to be transformed into a simple wire model to enable application of the 1D elements mesh. When preparations of the model had been completed the stress-strain analysis was performed to calculate the expected behavior of the frame under different loading. The thesis also verified the strenght limits of the proposed frame under different loading and so establish the container's potential to be stackable.

Keywords: stress-srain analysis, modular unit frame, types of strains, FEM system

Ráda bych poděkovala za spolupráci svému vedoucímu práce doc. Ing. Javoříkovi, Ph.D., který mi byl vždy nápomocen a jeho profesionální rady mě dovedli až k úspěšnému odevzdání bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce i verze v elektronické podobě, která byla nahraná do IS/STAG jsou identické.

Dále prohlašuji, že jsem na odevzdané bakalářské práci pracovala samostatně.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 MODULÁRNÍ KONSTRUKCE .....</b>	<b>12</b>
<b>2 MATERIÁL KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ.....</b>	<b>13</b>
2.1 VÝROBA OCELI.....	13
2.2 ROZDĚLENÍ OCELI .....	13
2.3 OCELI POUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	14
<b>3 NAVRHOVÁNÍ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ .....</b>	<b>15</b>
3.1 METODIKA MEZNÍCH STAVŮ.....	15
3.2 ZATÍŽENÍ.....	15
3.2.1 Rozdělení zatížení .....	16
3.2.2 Zatížení sněhem .....	17
3.2.3 Mezní stavy únosnosti.....	18
3.2.4 Mezní stavy použitelnosti .....	19
3.3 PROSTÝ TAH A TLAK.....	19
3.3.1 Zkouška prostým tahem a tlakem .....	20
3.3.2 Hookův zákon .....	21
3.3.3 Napětí při prostém tahu (tlaku) .....	23
3.4 OHYB .....	23
3.4.1 Napětí při ohybu.....	25
3.4.2 Průřezový modul v ohybu .....	27
3.5 KRUT.....	27
3.5.1 Napjatost v prutu během kroucení .....	27
3.5.2 Vztah mezi kroučícím momentem a smykovým napětím .....	28
<b>4 SPOJOVÁNÍ.....</b>	<b>29</b>
4.1 SPOJE ŠROUBOVANÉ A NÝTOVANÉ.....	29
4.2 SPOJE SVAŘOVANÉ .....	32
4.2.1 Svarové spoje .....	34
<b>5 VÝPOČETNÍ METODY .....</b>	<b>35</b>
5.1 UŽITÍ FEM SYSTÉMU .....	36
5.1.1 Rozdělení analýzy .....	36
5.1.2 Oblasti řešení.....	36
5.1.3 Postup při řešení problémů v mechanice pevných těles.....	37
5.1.4 Modely FEM .....	37
5.1.5 Geometrické vlastnosti.....	37
5.1.6 Uzel .....	37
5.1.7 Elementy .....	38
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>39</b>
<b>6 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>40</b>



<b>7</b>	<b>ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....</b>	<b>41</b>
7.1	VLASTNOSTI OCELI.....	42
7.2	MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELI: .....	43
7.3	POUŽITÉ OCELOVÉ PROFILY.....	43
7.3.1	U profil.....	44
7.3.2	I profil.....	45
7.3.3	L profil .....	46
7.3.4	Uzavřený obdélníkový profil .....	46
<b>8</b>	<b>3D SOFTWARE .....</b>	<b>47</b>
8.1	SIEMENS NX .....	47
8.2	AUTODESK INVENTOR .....	49
<b>9</b>	<b>PEVNOSTNÍ ANALÝZA.....</b>	<b>50</b>
9.1	OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	50
9.2	ZATÍŽENÍ RÁMU.....	53
9.3	VÝSLEDKY ANALÝZY .....	57
<b>10</b>	<b>KALKULACE KOMPLETNÍHO KONTEJNERU .....</b>	<b>66</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>75</b>

## ÚVOD

Hlavním úkolem mé bakalářské práce je provést pevnostní analýzu rámu stavebního kontejneru. Dané téma jsem si zvolila, protože je mi nejbližší vůči mým dosavadním zkušenostem. Modulární stavební systémy jsou čím dál více oblíbené kvůli svojí rychlosti výstavby a možnosti kreativního rozsahu. Hlavním bodem modulární architektury je technický charakter. Mezi nejznámější stávající produkci patří český pavilon EXPO 2015, který firma KOMA vybuodovala v italském městě Miláně.

V první části bakalářské práce je v krátkosti představena ocel, používaná jako stavební materiál. Jsou zde popsány spojovací prostředky, které lze použít při spojování kovových konstrukcí. Z největší části se poté teoretická část věnuje jednotlivým druhům zatížení, které mohou na konstrukce působit. Jsou zde rozepsány jejich vlastnosti a možnosti výpočtu.

V této práci byl posouzen rám o rozměrech: 6058 x 2438 x 2840 mm, jako materiál byla použita konstrukční ocel S235 a S 355, která má pro tuto konstrukci vhodné vlastnosti. Pro pevnostní analýzu byl vybrán software od firmy Siemens NX 11, který používá nástroje CAE. V oblasti CAE je zahrnuta analýza napětí na jednotlivých součástech a sestavách, kde se používá analýza konečných prvků (FEA), analýza toku tepla a tekutin, tj. výpočet dynamiky kapalin (CFD), optimalizace produktu nebo procesu atd. Nástroje CAE se v dnešní době používají především v automobilovém, leteckém a lodním průmyslu.

V programu NX 11 byl rám vymodelován jednoduchými čarami. Následně byla na všech prvcích vytvořena síť z 1D elementů. Na každém prvku byly elementy nadefinovány po 20 mm. Následným zatěžováním stropních a podlahových konstrukcí, dle skutečných velikostí zatížení, které působí na vyrobený rám, se pomocí pevnostní analýzy ověřovalo, zda je rám vhodně navržen. Kladný výsledek pevnostní analýzy by měl sloužit jako důkaz, že je konstrukce dvakrát stohovatelná, což znamená, že na sobě rám unese další jeden kontejner. Ve finální části práce je zhotovena ekonomická kalkulace, která se týká nákladů za standardní kontejner.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MODULÁRNÍ KONSTRUKCE

Modulární architektura je založena na třech základních principech – prefabrikace, mobilita a variabilita. Pod pojmem modulární architektura jsou označovány stavby vytvořené z prefabrikovaných modulárních prvků, podobné cihlám s rozdílem, že tyto moduly již sami o sobě prostory obsahují a tím umožňují rychlejší proces výstavby. [1]

K hlavním výhodám modulárních konstrukcí patří ekologická a zároveň i ekonomická stránka, která vzbuzuje čím dál větší zájem odborníků ale také veřejnosti. Jako další výhodou je nutné zmínit variabilitu, která je základem modulární architektury, neboť pokud si odmyslíme variabilitu ve volbě fasády a skladby modulů, tak i samotná stavba z modulů je velmi lehce přemístitelná a rozebíratelná, přičemž není vůbec ohrožena její trvalost. Moduly lze převádět jak v hotovém stavu, tak složené, kdy jsou na místě smontovány. Modulární stavby mohou být převáženy různými způsoby, mohou být nízkoenergetické, dočasné trvalé, nebo stavěné na etapy. [1]

Mezi hlavní oblasti použití patří: soukromé bydlení, sociální zařízení, studentské koleje, věznice, budovy pro zdravotnictví a hotely, ale také jsou používány ke zřizování obydlí pro lokality pro překonání následků po zemětřesení a dalších přírodních katastrof. [1]

## 2 MATERIÁL KOVOVÝCH KONSTRUKCÍ

Architektonické používání kovu jako konstrukčního materiálu je dlouhodobý a složitý historický proces. Na rozdíl od jiných používaných materiálů například cihly či železobetonu je kov specifický stavební materiál. V současné architektuře se rozlišuje základní použití kovu na nosné a obvodové konstrukce budov a staveb. [2]

### 2.1 Výroba oceli

Ocel je slitina železa s uhlíkem. Kromě železa a uhlíku obsahuje ocel v nevelkých množstvích různé příměsi: křemík, mangan, a jiné, které se dostaly do oceli při výrobě, a které podstatně ovlivňují vlastnosti oceli jako je například pevnost, tvárnost, odolnost proti korozi a jiné. Mezi škodlivé příměsi patří například síra a fosfor. Síra při vysokých teplotách způsobuje v oceli trhliny, fosfor při nízkých teplotách způsobuje křehkost. Velmi škodlivými příměsemi jsou především plyny, které snižují pevnost oceli (kyslík) a zmenšují její tvárnost (dusík). [2]

Ocel se vyrábí většinou zkujňováním surového železa vyrobeného ve vysoké peci. Podstatou zkujňování je snižování obsahu uhlíku a odstraňování příměsí železa okysličováním. [2]

Podle způsobu odkysličení rozlišujeme oceli:

- uklidněné
- neuklidněné
- polouklidněné

Nejčastěji používaná odkysličovadla jsou feromangan, a kovový hliník.

### 2.2 Rozdělení oceli

Abychom získali osobité fyzikálně-chemické nebo technologické vlastnosti musíme do oceli přidat speciální přísady (nikl, wolfram, vanad, měď, chrom a jiné). Tyto oceli se poté nazývají legované. Ocel, která neobsahuje z každého legovacího prvku více jak 3 až 5 % se nazývá nízkolegovaná ocel. Pokud ocel obsahuje vyšší množství legovacích prvků nazývá se vysocelegovaná ocel. Ve stavebnictví se nejvíce používá nízkolegovaná ocel. [2]

Podle způsobu výroby dělíme oceli:

- K tváření: např. kované, válcované nebo lisované polotovary, které se dokončují obráběním
- Na odlitky

Podle oblasti, kde ocel používáme se dělí na:

- Konstrukční oceli, které se používají při konstrukci různých druhů konstrukčních celků
- Nástrojové oceli, které se používají k výrobě tvářecích nebo obráběcích strojů.

### **2.3 Oceli používané při výrobě ocelových konstrukcí**

Pro nosné prvky ocelových konstrukcí se nejčastěji používá ocel třídy 10 a 11. Oceli třídy 10 zaručují pouze mechanické a technologické vlastnosti, zatímco oceli třídy 11 kromě mechanických a technologických vlastností zaručují také přesnost maximálního obsahu uhlíku, fosforu a síry. [4]

Dle charakteru dané konstrukce, požadavků na štíhlost a také podle ekonomických hledisek záleží na projektantovi, aby vhodně zvolil druh oceli či jejich kombinaci, která je pro danou konstrukci dle uvedených hledisek nejvhodnější. [4]

Oceli mají čtyři stupně svařitelnosti:

- Svařitelnost zaručená
- Svařitelnost zaručená podmíněná
- Svařitelnost dobrá
- Svařitelnost obtížná

### 3 NAVRHOVÁNÍ OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ

Nosné ocelové konstrukce je nutné navrhnout a vyrobit z vhodného materiálu, který splňuje požadované pevnostní, technologické, chemické a jiné vlastnosti. [2]

#### 3.1 Metodika mezních stavů

Úkolem každého projektanta je, aby byly stavební objekty navrženy spolehlivě a hospodárně. Spolehlivost je brána jako schopnost díla splnit v daných mezích a stanoveném čase požadované funkce se zachováním veškerých provozních ukazatelů. Konstrukce z oceli se navrhuje dle metodiky mezních stavů. Touto metodikou míříme ke zvýšení spolehlivosti a hospodárnosti daného návrhu na základě přesnějšího vystižení účinků zatížení konstrukce. [4]

Mezní stavy se rozdělují do dvou základních skupin:

- Mezní stavy únosnosti, kde společným znakem je bezpečnost konstrukce
- Mezní stavy použitelnosti, kde společným znakem je ztížená použitelnost konstrukce

#### 3.2 Zatížení

Konstrukce jsou zatěžovány silami, které vznikají díky jejich vzájemnému působení. Síly mohou taky vznikat díky působení fyzikálních účinků (teplotní účinky). [5]

Síly působící na těleso dělíme na síly:

- vnější (zatěžující)
  1. síly povrchové
    - a) osamělé síly – u kterých můžeme zatížení považovat za bodové, například osamělé břemeno na nosníku
    - b) spojitě zatížení – zatížení je rozloženo po celé ploše tělesa nebo po jeho části, například tlak v nádobě
  2. síly objemové (tíhová síla v gravitačním poli, například odstředivá síla)

Veškerá zatížení působící na těleso musí plnit podmínku statické rovnováhy vnějších sil. Složitější soustavy se převádí postupným uvolňováním na jednoduché soustavy,

musí se zachovat okrajové podmínky. Pokud řešíme soustavu nebo nerovnoměrný pohyb, musíme uvažovat setrvačné síly.

Díky vnějším silám, které působí na poddajné těleso se těleso deformuje a vytvářejí se v něm vnitřní síly. [5]

- vnitřní (intenzita síly = napětí)

### 3.2.1 Rozdělení zatížení

Dle způsobu a doby působení na konstrukci se zatížení dělí na vlivy:

- Stálé
- Nahodilé
  - Krátkodobé
  - Dlouhodobé
  - Mimořádné

Mezi zatížení stálá se řadí zatížení nosnými a výplňovými stavebními konstrukcemi a dalšími stálými součástmi budov. [5]

Mezi zatížení nahodilá krátkodobá se řadí:

- Zatížení stropů lidmi či nábytkem
- Zatížení sněhem
- Zatížení větrem

Mezi zatížení nahodilá dlouhodobá se řadí:

- Zatížení trvale osazenými zařízeními (stroje, motory, výtahy)
- Zatížení stropů skladovacích prostorů (knihovny, skladiště)
- Dlouhodobé tepelné vlivy

Mezi zatížení mimořádná se řadí:

- Účinky zemětřesení
- Zatížení vzniklá náhlými poruchami zařízení

Při výpočtu nosných konstrukcí se vytváří z těchto druhů zatížení vhodná kombinace dle současného výskytu jednotlivých zatížení. [5]



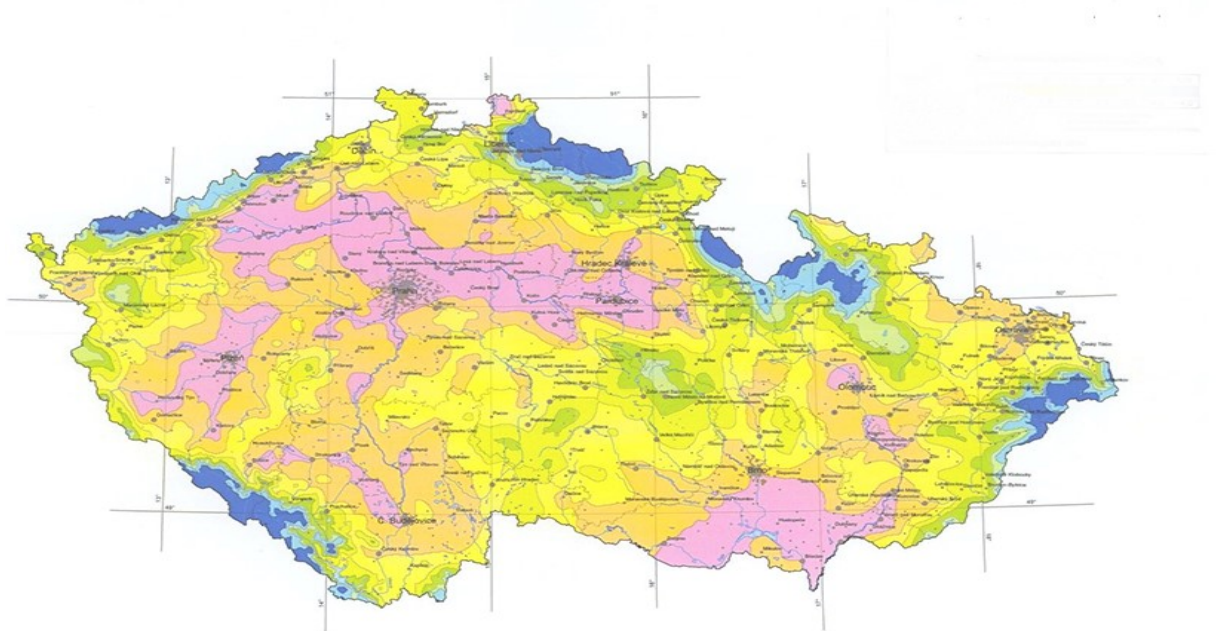
### 3.2.2 Zatížení sněhem

Toto zatížení je považováno za proměnné pevné zatížení a uvažují se zde trvalé a dočasné návrhové situace. [6]

Dělí se zpravidla na dva typy zatěžovacích stavů:

- Zatížení nenavátým sněhem (rozložení sněhu je závislé pouze na tvaru střechy)
- Zatížení navátým sněhem

Sněhová oblast	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
kN/m <sup>2</sup>	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	>4,0
kg/m <sup>2</sup>	70	100	150	200	250	300	400	>400



Obrázek 1: Mapa sněhových oblastí na území České republiky

Charakteristická hodnota pro zatížení sněhem na střeše se určí ze vztahu:

$$S = \mu_i C_e C_t S_k \quad (1.1)$$

$\mu_i$  = tvarový součinitel zatížení sněhem

$S_k$  = hodnota charakteristická pro zatížení sněhem na zemi (viz sněhová mapa)

$C_e$  = součinitel expozice 1,0

$C_t$  = tepelný součinitel 1,0 (<1,0 neizolované střechy)

TYP SNĚHU	Objemová tíha sněhu [kN/m <sup>3</sup> ]
Čerstvý sníh	1,0
Uležený sníh několik hodin či dnů	2,0
Starý sníh několik týdnů	2,5 – 3,5
Mokrý sníh	4,0

Tabulka 1: Objemová tíha sněhu

Úhel sklonu střechy	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8 (60 - \alpha) / 30$	0,0
$\mu_2$	$0,8 + 0,8\alpha / 30$	1,6	-----

Tabulka 2: Tvarový součinitel  $\mu_i$ 

### 3.2.3 Mezní stavy únosnosti

Únosnost konstrukce se popisuje stanovenou hodnotou rozhodující veličiny (síly, momentu, napětí, přetvoření), nebo funkce takových veličin při kterých je dosaženo příslušných mezních stavů únosnosti. Dovednost materiálu (prvku, konstrukce) odolávat účinkům zatížení se obecně označuje jako pevnost; je popisována vzhledem k druhu materiálu, ale také k použitému namáhání, k povaze vyšetřovaného mezního stavu atd. [4]

Normová pevnost je hodnota popisovaná s danou statistickou zárukou proti překročení skutečné pevnosti v příslušných normách. [4]

Výpočtová pevnost  $R_d$  se určí vydělením normové pevnosti součinitelem spolehlivosti materiálu  $\gamma_m = 1,15 - 1,25$ .

$$R_d = \frac{R_y}{\gamma_m} [MPa] \quad (2.1)$$

$R_y$  – normová pevnost

$\gamma_m$  – součinitel spolehlivosti materiálu

Součinitel podmínek působení  $\gamma_m$  vyjadřuje skutečné působení materiálu, prvku, konstrukce v určitých podmínkách systematické povahy (vliv teploty, vlhkosti). [4]

Do skupiny mezních stavů únosnosti se řadí tato kritéria:

- Pevnosti prosté. Mezní stav je dán mezními trvalými deformacemi, které jsou pro zjednodušení vymezeny limitní hodnotou výpočtové pevnosti.
- Stability polohy (převržení, posunutí)
- Reologie (nárůst deformací)

### 3.2.4 Mezní stavy použitelnosti

Použitelností konstrukce se vysvětluje takový stav, kdy je konstrukce schopna bez omezení či překážek plnit svou provozní funkci při běžných provozních podmínkách a při obvyklém zatížení. [4]

Kritéria se volí do těchto skupin:

1. Statické přetvoření
2. Dynamická odezva
3. Estetický účinek

Kritéria skupin 1, 2 se vážou na zabezpečení bezporuchové funkce vnitřního vybavení stavebního objektu (příčky, omítky, fasády apod.), kritéria 2, 3 také zabezpečují nerušený provoz strojního a technologického zařízení, zdraví člověka uvnitř i v okolí objektu. [4]

## 3.3 Prostý tah a tlak

Prut je definován jako součást, u které výrazně převažuje jeden rozměr nad druhým. Prut je namáhán tahem či tlakem pouze v případě, pokud je v každém bodě střednice prutu jedinou složkou výsledných vnitřních sil normálová síla, která je orientovaná ve směru vnější (vnitřní) normály příčného řezu, kterým je prvek uvolněn. [8]

Normálové napětí je v průřezu taženého či tlačného prutu konstantní a neutrální osa leží v nekonečnu:

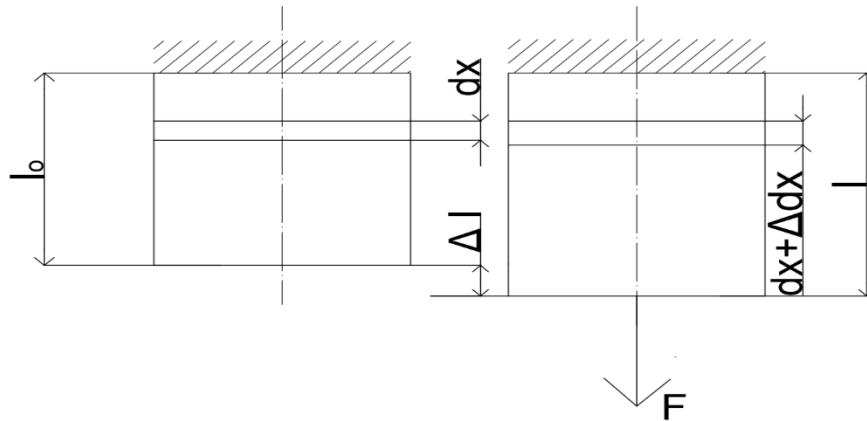
$$\sigma = \frac{N}{A} \leq R_d \text{ [Pa]} \quad (1.1)$$

N – normálová síla

A – účinná plocha průřezu

R<sub>d</sub> – výpočtová pevnost materiálu prutu

Př.:



Obrázek 2: Deformace v tahu

$$l = l_0 + \Delta l \text{ [m]} \quad (2.1)$$

$$\Delta l = l - l_0 \text{ [m]} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.1)$$

$\varepsilon$  - relativní prodloužení definuje prodloužení, které připadá na jednotku délky tělesa

$l_0$  – počáteční délka

$l$  – délka

$\Delta l$  – prodloužení tělesa

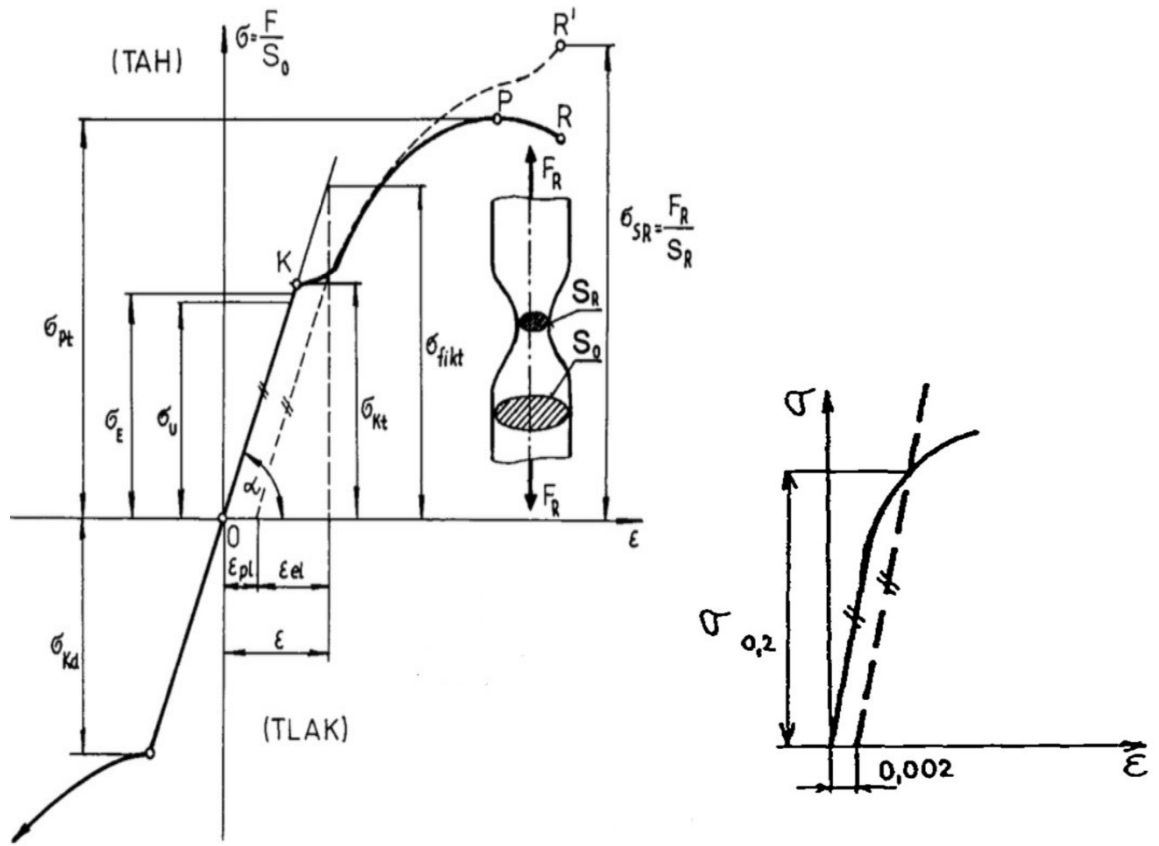
(Volek, 2006, s. 14)

### 3.3.1 Zkouška prostým tahem a tlakem

Zkouška prostým tahem patří mezi jedny ze základních mechanických zkoušek materiálu.

Úkolem této zkoušky je:

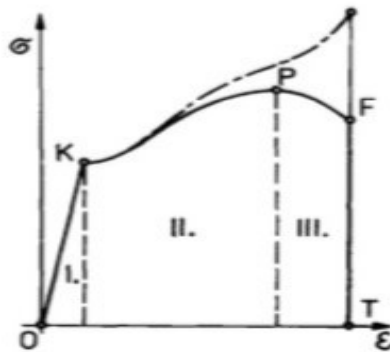
- U tahu zjistit závislost napětí na poměrném přetvoření a obráceně
- Zjistit skutečnou posloupnost mezních stavů
- Určit charakteristiku materiálu [8]



Obrázek 3: Chování materiálu při namáhání tahem/tlakem

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [Pa]} \tag{5.1}$$

### 3.3.2 Hookův zákon



Obrázek 4: Průběh hookova zákona

Hookův zákon je dán vztahem:

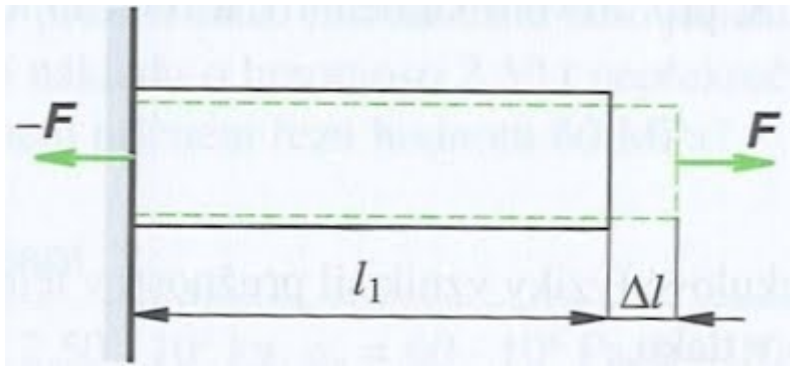
$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ [Pa]} \quad (6.1)$$

$E$  – Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu) [Pa]

$\epsilon$  - relativní prodloužení [bezrozměrná veličina]

$\sigma$  – normálové napětí [Pa]

Modul pružnosti  $E$  je řazen mezi základní charakteristiky materiálu. Má velký vliv na deformační vlastnosti, například průhyby, zkrácení atd. Všeobecně platí, že při růstu modulu pružnosti materiálu klesá jeho deformace a naopak. [9]



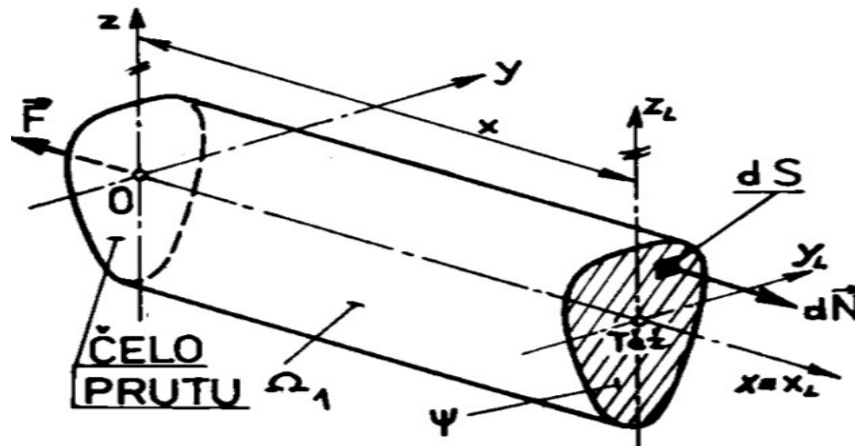
Obrázek 5: Prodloužení tělesa při zatížení tahem

Pokud budeme postupně zvětšovat velikosti sil, které mají za příčinu deformaci daného tělesa, výsledkem bude závislost normálového napětí  $\sigma$  na relativním prodloužení  $\epsilon$ .

Přímá úměrnost (mezi relativním prodloužením a normálovým napětím) nám ve formě Hookova zákona dokáže předpovídat prodloužení natahovaných předmětů. [9]

Hookův zákon také platí při pružné deformaci tlakem, v tomto případě se jedná o relativní zkrácení  $\epsilon$  a  $E$  je modulem pružnosti v tlaku. [9]

### 3.3.3 Napětí při prostém tahu (tlaku)



Obrázek 6: Napětí při prostém tahu

$$\sum F_x = 0; \quad \sum M_y = 0; \quad \sum M_z = 0 \quad (7.1)$$

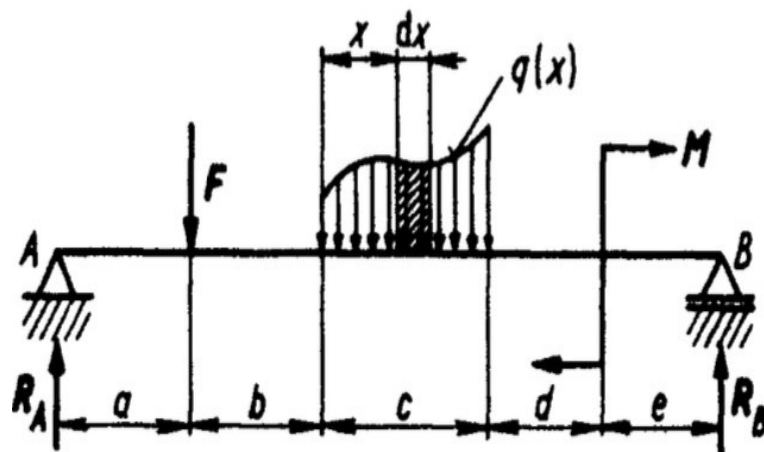
$$\sigma = \sigma_{(y,z)} = \text{konst.} \quad \rightarrow \quad \sigma = \frac{N}{S} \text{ [Pa]} \quad (8.1)$$

## 3.4 Ohyb

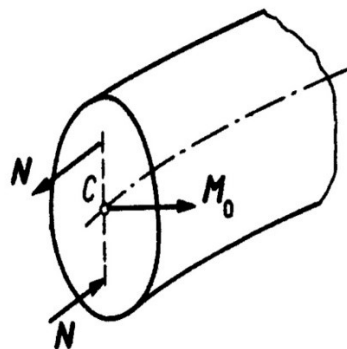
Ohyb je považován za namáhání, během kterého se původně přímý krut zakřivuje do rovinné či prostorové křivky.

Typy zatížení nosníků:

- Ohybovým momentem
- Osamělými silami kolmými na k ose prutu
- Spojitě rozloženým zatížením [11]



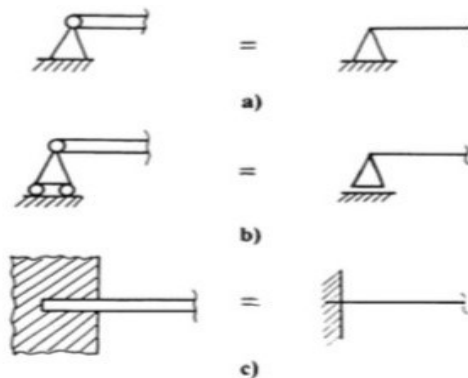
Obrázek 7: Prostý ohyb

Obrázek 8: Ohybový moment  $M_0$



Uložení nosníků:

- a) Pevná kloubová podpora
- b) Posuvná kloubová podpora
- c) Vetknutí



Obrázek 9: Typy uložení

Pokud vnější síly působí kolmo na osu prutu v rovině, která je určena osou prutu a jednou z jejích hlavních os je centrála os setrvačnosti průřezu poté nastává **prostý ohyb**. Neutrální osa prochází těžištěm průřezu a je také kolmá k rovině zatížení. [11]

V případě, že v průřezu nepůsobí posouvající síly  $Q$ , a tudíž ani kroutící moment  $M_k$  ohyb se nazývá prostý. Pouze v tomto případě platí Bernoulliova-Navierova hypotéza, protože v průřezu nevznikají smyková napětí tudíž ani smykové deformace. [11]

### 3.4.1 Napětí při ohybu

Díky působení vnějších silových účinků vzniká v přímých prutech ohyb a poté nastane jeho prohnutí a změna délky vláken. Díky vnitřním silám působí v řezu ohybový moment  $M_0$  a posouvající síla  $T$ . Napětí  $\sigma$  a  $\tau$  je v daném řezu vyvoláno pomocí vnitřních sil. Jejich úkolem je nahradit účinek odstraněné části, a proto musejí být se soustavou vnějších sil, která působí na neodstraněnou část v rovnováze. [11]

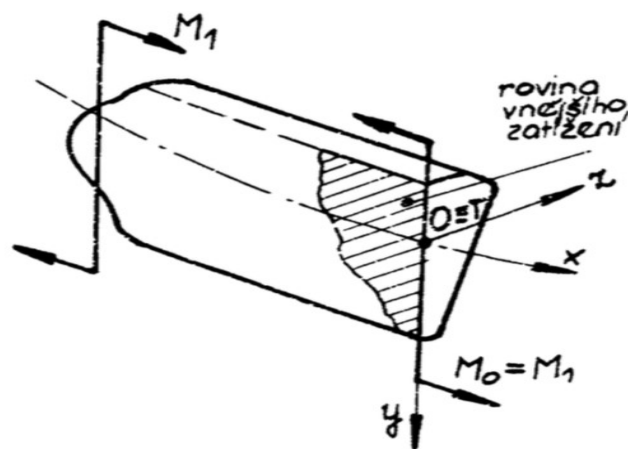
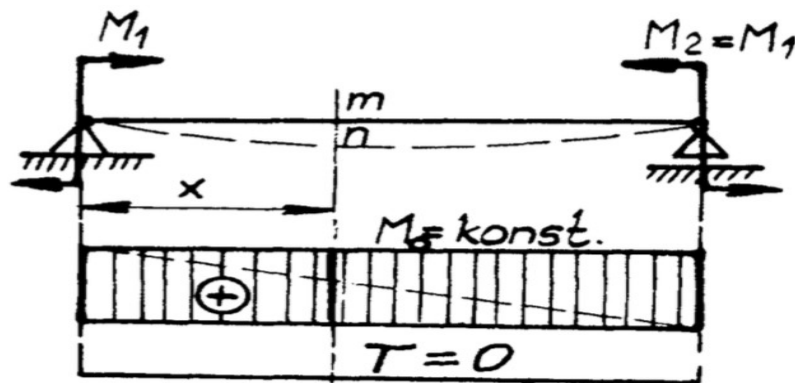
$$\sigma = f_1[M_0(x)] \quad (9.1)$$

$$\tau = f_2[T(x)] \quad (10.1)$$

- Z daných rovnic vyplývá, že čím větší jsou  $M(x)$  a  $T(x)$  o to větší je napětí  $\sigma$  a  $\tau$ .
- Řezy, které byly před deformací rovinné, zůstávají při rovinném pohybu rovinné (Bernoulliho hypotéza)
- Vlákná, která jsou podélná, na sebe vzájemně netlačí, a proto díky účinkům normálových napětí se pouze lineárně zkrátí nebo prodlouží
- Materiál nosníku se řídí Hookeovým zákonem, [11]

Rozložení normálového napětí při prostém ohybu:

$$\sigma = \frac{M_0}{J_z} y \text{ [MPa]} \quad (11.1)$$



Obrázek 10: Napětí při ohybu

### 3.4.2 Průřezový modul v ohybu

$$w_0 = \frac{J_z}{|e_{max}|} [\text{m}^3] \quad (12.1)$$

$J_z$  – modul setrvačnosti průřezu

$e_{max}$  – poloha neutrální osy průřezu

$$\sigma_{max} = \frac{M_0}{w_0} [\text{MPa}] \quad (13.1)$$

## 3.5 Krut

Pokud nastane případ, kdy vnější síly vyvolávají v jakémkoliv průřezu prutu jen kroutící moment, poté nastává tzv. prosté kroucení. Díky účinkům kroucení se průřezy vzájemně natáčejí kolem osy x a zároveň se směrem vůči této ose zprohýbají tzv. deplanují. Jestliže deplanaci nebráníme vzniká kroucení volné. Vznikají zde jen smyková napětí  $\tau_{xy}$  a  $\tau_{xz}$ , které působí v rovinách průřezů. Tzv. volné kroucení je název pouze teoretický až na minimální výjimky se prakticky nevyskytuje. Volná deplanace je z několika důvodů částečně omezena a díky tomu v průřezech prutu vznikají normálová napětí  $\sigma_x$ . Normálová napětí v masivních průřezích jsou ale oproti napětím smykovým minimální a lze je zanedbat. [11]

### 3.5.1 Napjatost v prutu během kroucení

Deformace prutu je dána pouze jedním zkosem  $\gamma$ , jedná se tedy o prostý smyk. [11]

Platí Hookeův zákon:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} [\text{Pa}] \quad (14.1)$$

$G$  – modul pružnosti ve smyku nebo krutu

$\tau$  - smykové napětí

### 3.5.2 Vztah mezi kroučícím momentem a smykovým napětím

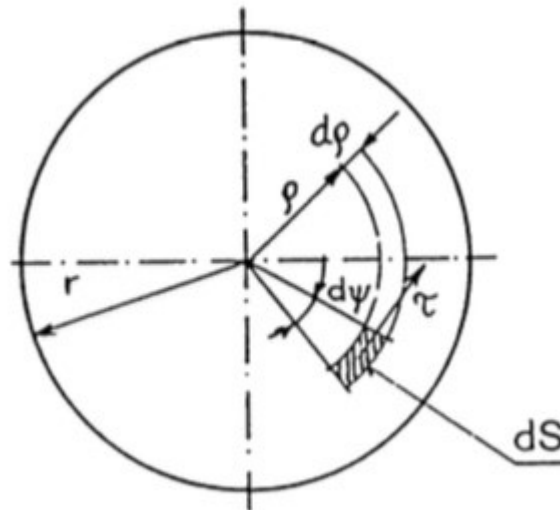
Závislost mezi  $\tau$  a  $M_k$  je možné určit u krutu prutů kruhového průřezu na základě rovnováhy mezi vnějšími dvojicemi sil a vnitřními kroučícími momenty. Z tohoto důvodu můžeme z průřezu prutu vyříznout na poloměru  $\rho$  dvěma válcovými řezy element plochy  $dS$ , na kterém je působící napětí  $\tau(\rho)$  dle vztahu:

$$\tau(\rho) = \frac{M_k}{J_p} \rho \text{ [Pa]} \quad (3.1)$$

$M_k$  – kroučící moment

$J_p$  – polární kvadratický moment

a lze říci, že smykové napětí úměrně roste se vzdáleností  $\rho$  od osy prutu.



Obrázek 11: Příklad kroučícího momentu se smykovým napětím

## 4 SPOJOVÁNÍ

Ocelové konstrukce se nejčastěji spojují pomocí vrtaných spojů (šrouby, nýty, předpjaté šrouby apod.), svařovaných spojů (spoje lepené, zatahovací nýty, závitořezné šrouby apod.). Podle účelu se dělí spoje na nosné (silové), spínací a těsnící. Úkolem nosného spoje je bezpečně přenést vnitřní síly z jedné části spojované konstrukce do druhé. Spínací spoj zabraňuje samovolnému rozvírání spojovací spáry a vzniku koroze. Spoj těsnící musí zajistit vodotěsnost či vzduchotěsnost spoje. [8]

Podle únosnosti dělíme spoje na:

- Spoje s úplnou únosností
- Spoje s částečnou únosností

Podle typu spoje se dělí na:

- Šroubované spoje
- Nýtované spoje
- Svarové spoje

### 4.1 Spoje šroubované a nýtované

Rozdělení šroubových spojů dle typu namáhání:

- Spoje namáhané smykem
  - Spoje namáhané na stříh a na otláčení
  - Třecí spoje odolné proti prokluzu v mezním stavu použitelnosti
  - Třecí spoje odolné proti prokluzu v mezním stavu únosnosti
- Spoje namáhané tahem
  - Nepředeprnuté spoje
  - Spoje s předeprnutými vysokopevnostními šrouby

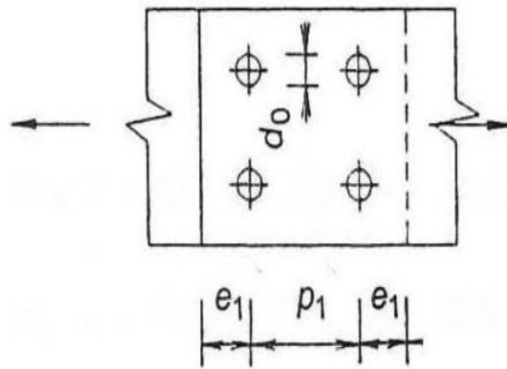
Spojovací prostředky	Popis	Pevnostní třída
Šrouby	Hrubé se šestirannou	4.6
		5.6
	Přesné se šestihřannou	5.6
		8.8
Přesné s větší hlavou	10.9	
	8.8	
	hrubé	10.9
		4
Matice	přesné	5
		8
	Přesné zesílené	10
		10
Podložky	Hrubé	
	Pro třecí spoje	
	Šikmé pro tyče I a U	

Tabulka 3: Spojovací prostředky pro šroubové spoje

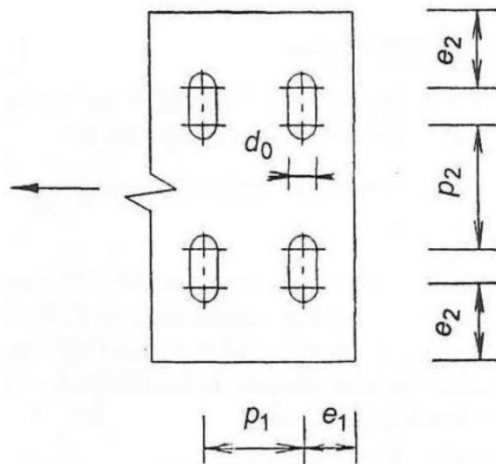
Pevnostní třída šroubu	$f_{yb}$ MPa	$f_{ub}$ MPa
4.6	240	400
5.6	300	500
8.8	640	800
10.9	900	1000

Tabulka 4: Jmenovité hodnoty meze kluzu  $f_{yb}$  a pevnosti v tahu  $f_{ub}$  materiálu šroubů

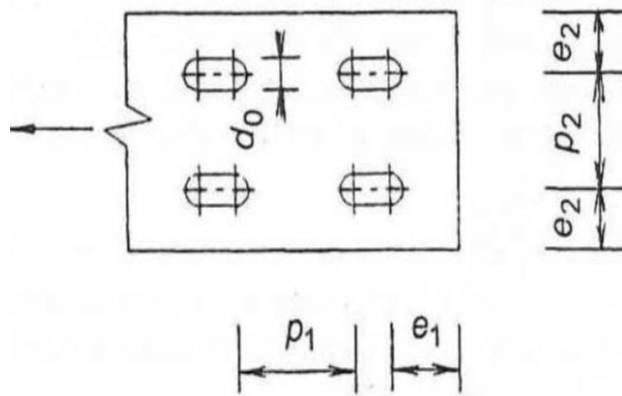
Rozteče děr:



Obrázek 12: Kruhové díry



Obrázek 13: Prodloužené díry s osou kolmou na směr síly



Obrázek 14: Prodloužené díry s osou rovnoběžnou se směrem síly

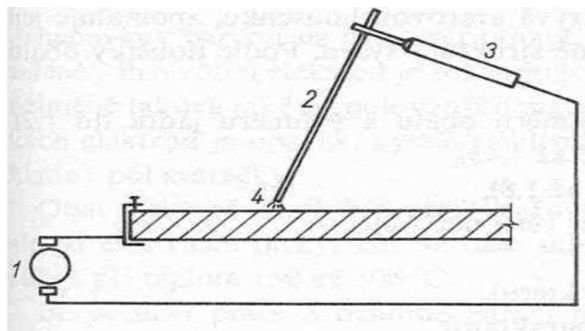
Průměr otvoru – průměr nýtu	11	13	17	21	25
Průměr hrubého šroubu	10	12	16	20	24

Tabulka 5: Nýty a šrouby

## 4.2 Spoje svařované

Základní typy svařování:

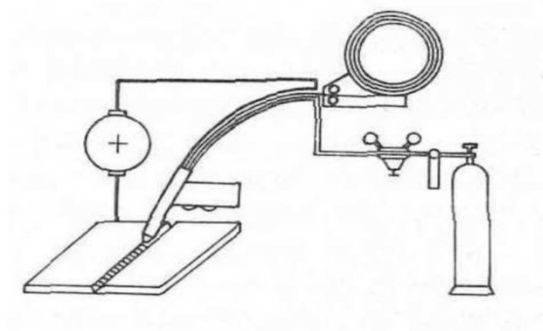
- Tavné (spojují se materiály ve stavu tekutém)
  - Svařování el. obloukem
  - Svařování plamenem
    - Tlakem
    - Svařování el. odporem (přepřátování)
  - Svařování el. obloukem:



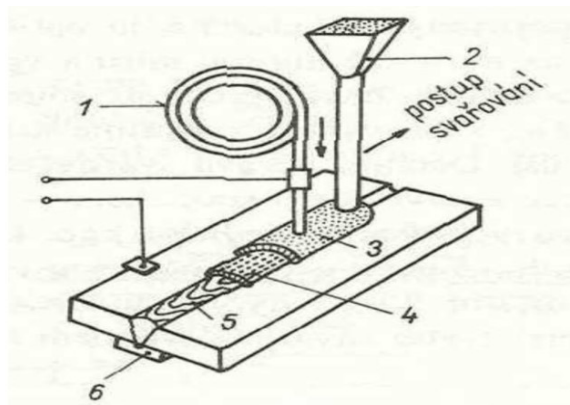
Obrázek 15: Ruční svařování



- 1 – zdroj svařovacího proudu
- 2 – elektroda
- 3 – držák elektrod



Obrázek 16: Svařování v ochranné atmosféře (automatem): - CO<sub>2</sub>

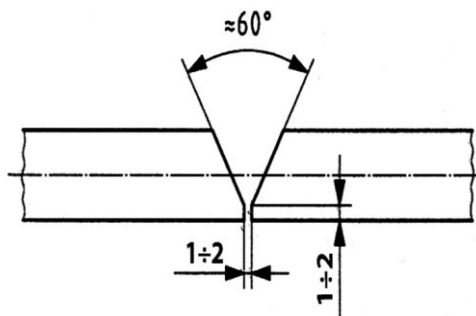


Obrázek 17: Svařování pod tavidlem (automatem)

- 1 – svařovací drát
- 2 – zásobník tavidla
- 3 – tavidlo
- 4 – Struska
- 5 - Hotový svar

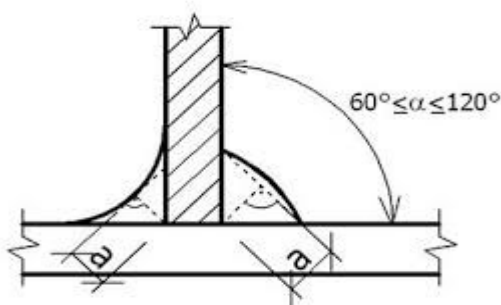
#### 4.2.1 Svarové spoje

- Tupé svarové spoje
  - Patří mezi nejvhodnější druhy spojů, nejčastěji se používají ke svařování strojních součástí a konstrukcí, které jsou namáhané dynamicky. U tohoto typu svarů se zachovává silový tok. Vznikají svařením dvou dílců, které jsou přiložené na tupo k sobě s použitím přídavného materiálu. Kromě svaru ve tvaru I je nutné svarovou plochu vhodně upravit pro svar. [8]



Obrázek 18: Tupý svar

- Koutové svary
  - Používají se nejčastěji u návarových ploch spojovaných prvků, kdy se pro svar nijak zvlášť neupravují. Plochy mohou svírat úhel od  $60^\circ$  do  $120^\circ$ . [8]



Obrázek 19: Koutový svar

## 5 VÝPOČETNÍ METODY

- FEM (metoda konečných prvků)

Používá se k výpočtu parciálních diferenciálních rovnic, FEM je zjednodušená Ritz-Galerkinova variační metoda, která využívá báze funkce s malým kompaktním nosičem, který je úzce spojen s daným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky.

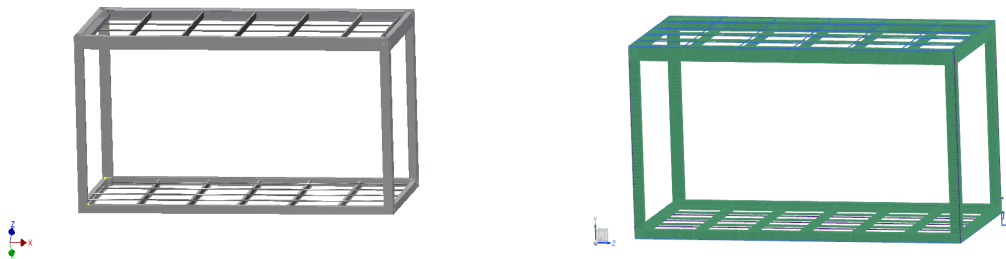
- FEA (konečně-prvková analýza)

Numerická simulace reálných jevů, které využívají FEM

- CAE

Projektování podporované počítačem

Geometrický model x FEM model:



V mechanice pevných těles se FEM využívá hlavně k popisu a řešení „pole posunutí“ u těles, které jsou zatíženy vnějšími silami.

Pokud jsou známy vektory posunutí  $u(x)$  bodů tělesa, lze určit deformační a napětíové pole.

Výpočetními metodami lze řešit:

- Deformace těles, na které působí mechanické či teplotní zatížení
- Tuhost zadané součásti
- Síly, které jsou potřebné k dosažení tvarové změny
- Napětí v daném tělese

## 5.1 Užití FEM systému

Postup při využívání FEM systému:

1. Tvorba modelu
2. Výpočet
3. Zpracování výsledků

V praxi lze říci, že FEM analýza je přibližná metoda, díky které je reálný svět objasňován výpočtářem a modelován vhodnou výpočetní metodou.

Pro správnou představu je nutná:

- Znalost struktury materiálu a jeho následné chování při zatížení
- Znalost vlastností
- Zkušenost s nejvhodnějšími FEM nástroji, které můžeme použít

### 5.1.1 Rozdělení analýzy

FEM analýza pevných těles se dělí na dva základní druhy:

- Statický = vnější a vnitřní síly působící na těleso jsou v rovnováze (nezávislé na čase)

$$\sum F = 0$$

- Dynamický = rychlé děje (exploze, rázy) například šíření vln či vibrace (závislé na čase)

$$\sum F = ma \text{ [N]}$$

m – hmotnost

a – plocha průřezu

### 5.1.2 Oblasti řešení

- Statika
  - Lineární analýza
  - Nelineární analýzy
    - Geometrická nelinearita (velká posunutí a natočení)
    - Materiálová nelinearita (plasticita a hyperelasticita)
- Kmitání (vlastní kmity a frekvence)

- Proudění tekutin
- Teplo

### 5.1.3 Postup při řešení problémů v mechanice pevných těles

- a) Zadání cíle úlohy a potřebných informací
- b) Zadání geometrie modelu
- c) Zadání zatížení modelu
- d) Zadání fyzikálních vlastností
- e) Zadání vztahů, které udávají chování materiálu
- f) Provedení výpočtu
- g) Zpracování výsledků

### 5.1.4 Modely FEM

- Dle materiálových vlastností
  - isotropní
  - anisotropní
- Dle dimenze
  - 2D
  - 3D

### 5.1.5 Geometrické vlastnosti

- Dimenze elementu
  - 1D (nosníky, skořepiny, vazníky)
  - 2D (solid, skořepina)
  - 3D (solid)
- Rozměry (průřez, tloušťka)
- Vrstvy (počet, tloušťky, materiál)

### 5.1.6 Uzel

Body, které tvoří FEM model jsou dány:

- Číslem
- Souřadnicemi

- Stupni volnosti
  - Posunutí
  - Teplota
  - Rotace

### 5.1.7 Elementy

Dělí model na jednotlivé oblasti, jsou dány:

- Číslem
- Přisouzenými uzly
- Geometrií
- Materiálovými vlastnostmi (závislost napětí na deformaci)

Tvarem elementu může být:

- Přímka
- Trojúhelník
- Čtyřúhelník
- Čtyřstěn, šestistěn

Pro beam (nosník) elementy je nutné zadat tvar a orientaci průřezu. Řeší se zde natočení a posunutí bodu (uzlu), můžeme také určit ohybový moment a příčné síly.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

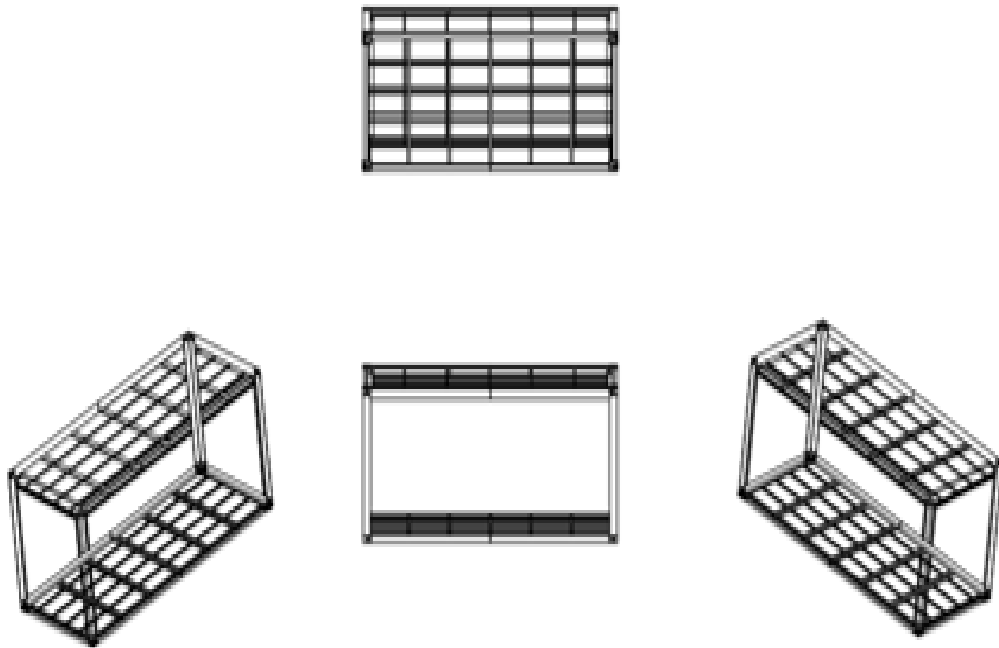
## 6 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem mé bakalářské práce je provést pevnostní analýzu rámu stavebního kontejneru. Po vytvoření konečně prvkového modelu se nadefinují okrajové podmínky a následně se jednotlivé profily zatíží dle určeného namáhání. Poté se spustí pevnostní analýza a vyhodnotí se jednotlivé výpočty.



## 7 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

- Předmětem analýzy je ocelový rám, který je svařen.
- Rozměry rámu jsou: 6058 x 2438 x 2840 mm



Obrázek 20: Ocelový rám

## 7.1 Vlastnosti oceli

V návrhu se používá ocel pevnostní třídy S 235 a S 355.

V následující tabulce jsou její základní vlastnosti:

Pevnostní třída oceli podle ČSN EN 10025	Tloušťka t (mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 100	
	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
S 235	235	360	215	340
S 355	355	510	335	490

1) Tyto jmenovité hodnoty se ve výpočtech považují za hodnoty charakteristické

Tabulka 6: Jmenovité hodnoty pevnostních konstrukčních ocelí

f<sub>y</sub> - mez kluzu

f<sub>u</sub> – pevnost v tahu

Výpočtová pevnost oceli S235 a S355:

$$R_d = \frac{f_y}{\gamma_m} [\text{MPa}]$$

$$R_d = \frac{235}{1,25} = 188 [\text{MPa}]$$

$$R_d = \frac{355}{1,25} = 284 [\text{MPa}]$$

## 7.2 Mechanické vlastnosti oceli:

Ocel je izotropní stejnorodá látka, což znamená, že její vlastnosti jsou v každém směru shodné. Pro izotropní materiály všeobecně platí tato zásada:

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} [\text{MPa}] \quad (15.1)$$

Ve FEM modelu jsou pro oba typy oceli použity následující materiálové konstanty:

- modul pružnosti -  $E = 210\,000$  [MPa]
- modul pružnosti ve smyku –  $G = 81\,000$  [MPa]
- Poissonovo číslo (součinitel příčné deformace) –  $\nu = 0,3$

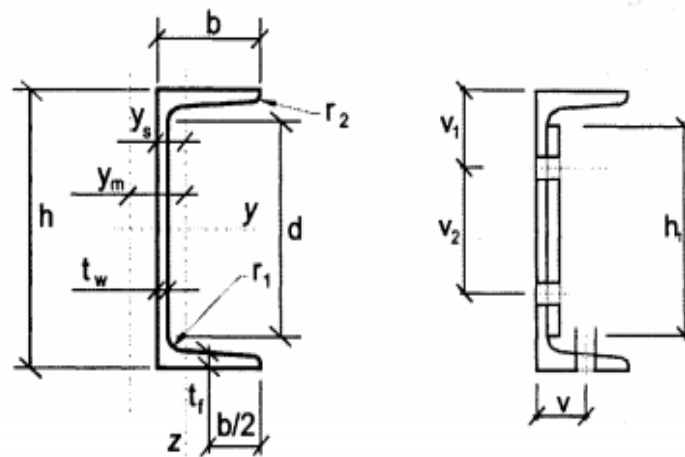
Objemová hustota oceli –  $\rho = 7850$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

## 7.3 Použité ocelové profily

Posuzovaný rám se skládá ze spodního nosníku (z konstrukční oceli S235), který je na kratším rozměru vyztužen L profily. Ke spodnímu nosníku jsou přivařeny I profily, na kterých leží uzavřené obdélníkové profily a poté je na konstrukci pokládána skladba podlahy. Ve čtyřech rozích jsou umístěny sloupy (z konstrukční oceli S355), které slouží také jako svody a odvádějí ze střechy dešťovou vodu. Horní nosník je na delším rozměru (z konstrukční oceli S355) vyztužen L profily, na kratším rozměru (z oceli S235) má nosník přivařené okapy. K hornímu nosníku jsou přivařeny uzavřené obdélníkové profily, na kterých leží U profily a poté je na konstrukci položena skladba stropu. Celá konstrukce je vzájemně svařena, je použito svařování elektrickým obloukem.

### 7.3.1 U profil

V rámu jsou použity U profily z oceli konstrukční třídy S355 o rozměru 100 mm



Obrázek 21: U profil

	Hmotnost [kg/m]	Rozměry [mm]								
		h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	d	y <sub>s</sub>	y <sub>m</sub>
U 100	10,6	100	50	6	8,5	8,5	4	64	15,5	29,3

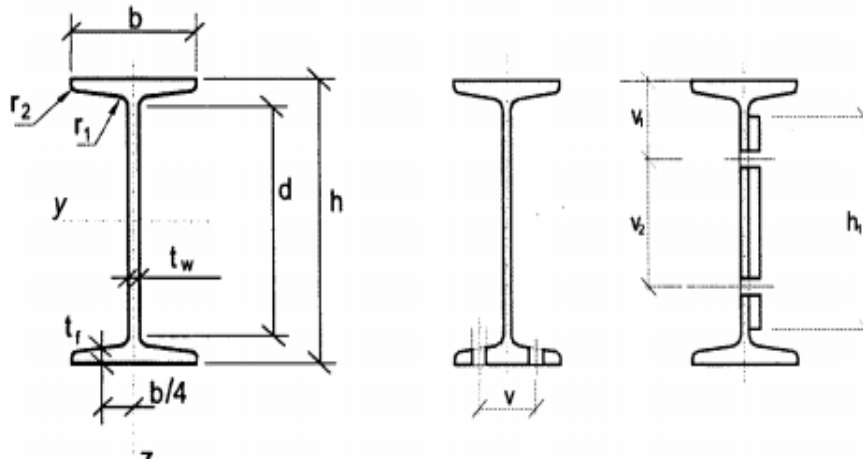
Tabulka 7: Vlastnosti profilu U

	Průřezové veličiny			
	A <sub>vz</sub> [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>z</sub> [mm <sup>4</sup> ]	W <sub>z</sub> [mm <sup>3</sup> ]	i <sub>z</sub> [mm]
U 100	0,646.10 <sup>3</sup>	293.10 <sup>3</sup>	8,49.10 <sup>3</sup>	14,7

Tabulka 8: Průřezové veličiny profilu U

### 7.3.2 I profil

Součástí rámu jsou I profily z oceli konstrukční třídy S235 o rozměru 100 mm.



Obrázek 22: I profil

	Hmotnost [kg/m]	Rozměry [mm]						
		h	b	tw	tf	r1	r2	d
I 100	8,32	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	75,7

Tabulka 9: Vlastnosti I profilů

	Průřezové veličiny			
	$A_{vz}$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	$W_z$ [mm <sup>3</sup> ]	$i_z$ [mm]
I 100	$0,485 \cdot 10^3$	$122 \cdot 10^3$	$4,88 \cdot 10^3$	10,7

Tabulka 10: Průřezové veličiny profilu I

### 7.3.3 L profil

- Jako výztuž jsou v rámu použity L profily z oceli S235 (na spodním celém nosníku) a S355 (na horním celém nosníku) o rozměrech 40 x 25 x 3 mm, 125 x 45 x 3 mm, 45 x 25 x 3 mm.

### 7.3.4 Uzavřený obdélníkový profil

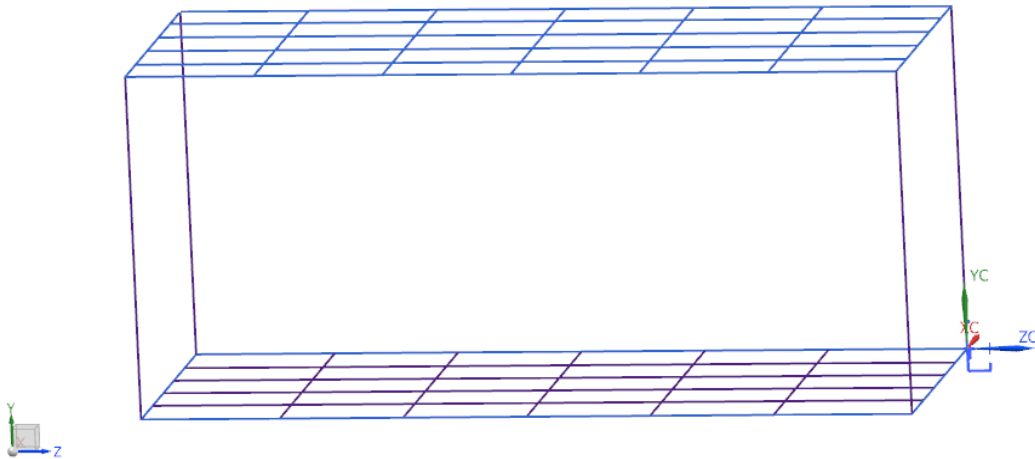
- Součásti konstrukce podlahy a stropu jsou obdélníkové profily z konstrukční oceli třídy S235 o rozměru: 40 x 20 x 3 mm, 30 x 20 x 3 mm.

## 8 3D SOFTWARE

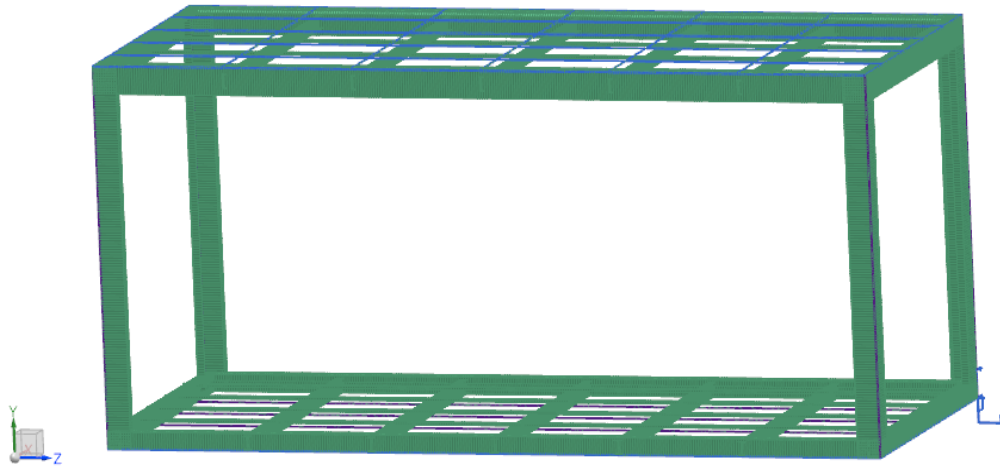
Při volbě vhodného software záleží na typu výrobku a jeho následné produkci. Abychom zvolili správný software, musíme se soustředit i na kvalitní výkresovou část, která bývá často podceňována a opomíjena i přesto, že je podstatnou součástí dokumentace.

### 8.1 Siemens NX

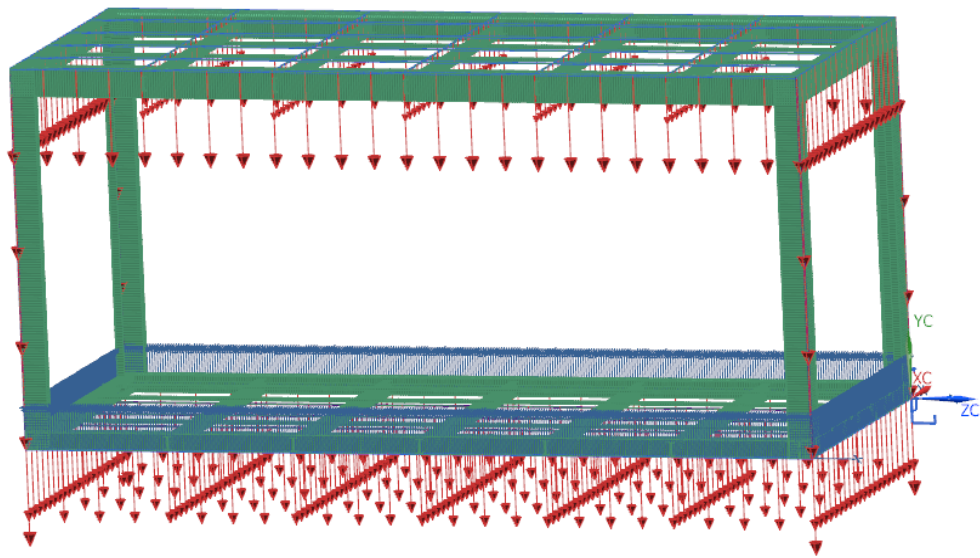
Patří mezi modulární systémy, které se vyznačují asociativitou všech společných modulů. Lze říci, že při rozpracovaném modelu můžeme současně provádět analýzy, simulace a různé pevnostní a kinematické výpočty. Model je základním prvkem, na kterém probíhají veškeré modifikace, které se přenášejí do veškerých rozpracovaných aplikací. Tento systém je schopný provést výpočty, simulace, analýzy, modely jednotlivých dílů i celé sestavy, programování NC obrábění, kontrolu kvality atd.



Obrázek 23: Čárový model



Obrázek 24: Fem model

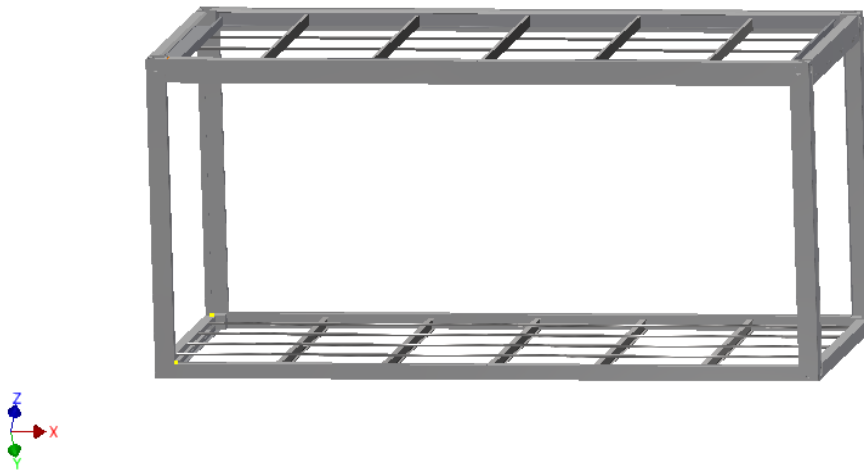


Obrázek 25: Simulace



## 8.2 Autodesk Inventor

Patří mezi 3D software od firmy Autodesk, který se vyznačuje, jako nejprodávanější strojírenský program. Mezi hlavní funkce Inventoru patří 3D navrhování, tvorba výkresové dokumentace, prezentace, vizualizace simulace a animace. Mezi největší výhody systému patří jednoduchost a rychlost při ovládání. K dispozici jsou vždy jen ty ikony, které uživatel zrovna potřebuje. Program umožňuje kdykoliv provést změnu zadané hodnoty, skici či historie modelu. Po každé takové změně je model programem přepočítán a aktualizován. Výkres se vytváří na základě 3D modelu, takže pokud je provedena změna ve 3D, nastane změna i ve výkresu. Program spolupracuje s AutoCadem, tudíž podporuje DWG a následná komunikace s dalšími CAD systémy není problém.



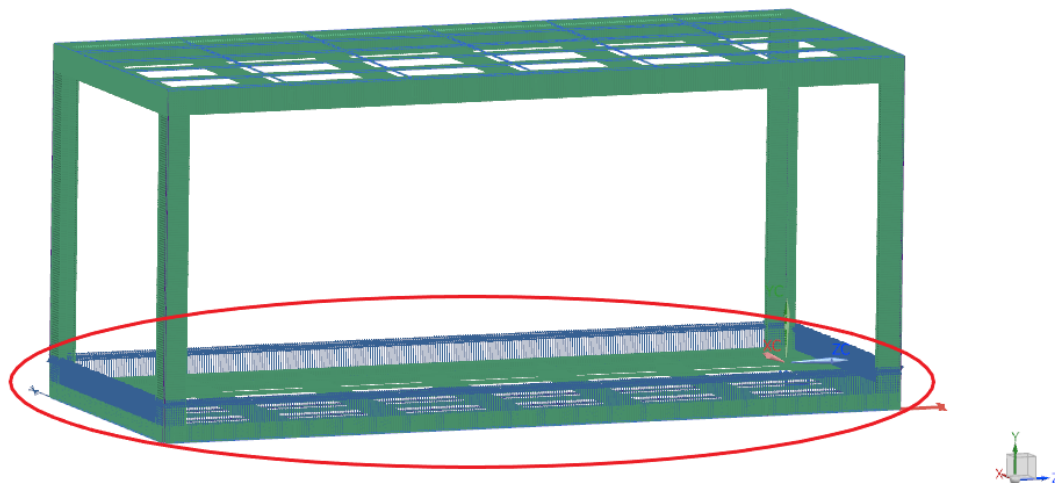
Obrázek 26: 3D model

## 9 PEVNOSTNÍ ANALÝZA

- Pevnostní analýza byla provedena pomocí programu NX 11. Vytvořenému modelu byly definovány i materiálové parametry (E a Poissonova konstanta) (viz. kapitola 6.1) a profily průřezů pro jednotlivé 1D elementy (viz. kapitola 6.2). Dále byly konstrukci přiřazeny příslušné okrajové podmínky (viz. kapitola 8.1) a následně byly jednotlivé prvky zatíženy velikostmi sil, které na rám působí (viz. kapitola 8.2).

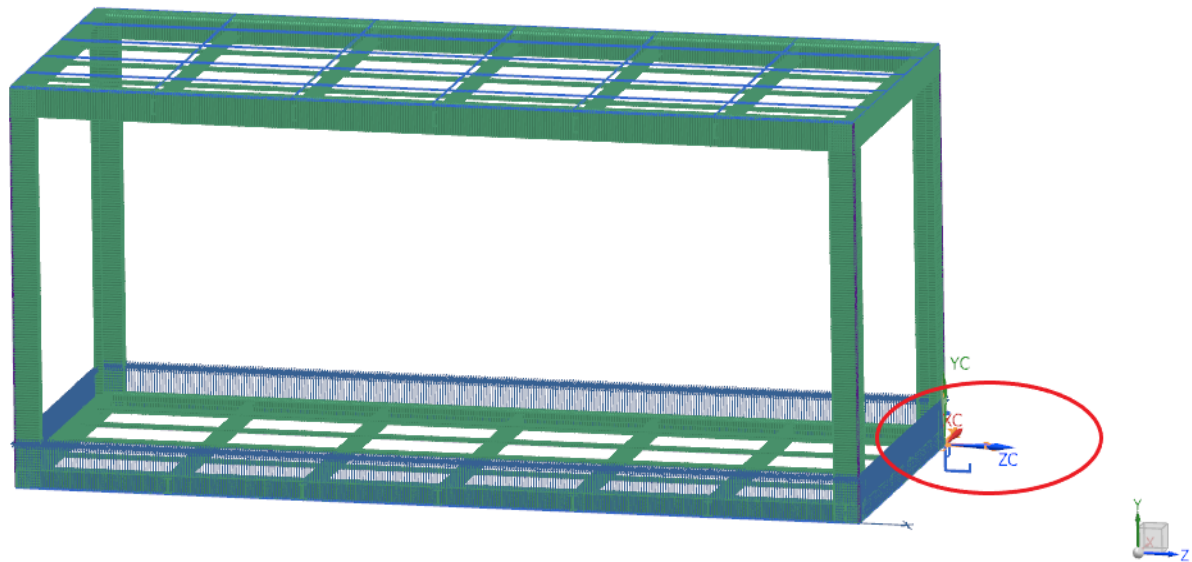
### 9.1 Okrajové podmínky

- Pomocí okrajových podmínek volíme způsob podepření, který bychom měli volit tak, abychom dbali na konstrukční řešení a vždy dokázali zabezpečit odolnost konstrukce proti všem druhům působícího zatížení.
- Okrajové podmínky byly určeny následovně:
  - 1) Vyznačená okrajová podmínka zamezuje celé spodní hraně rámu svislému posunutí v osy Y



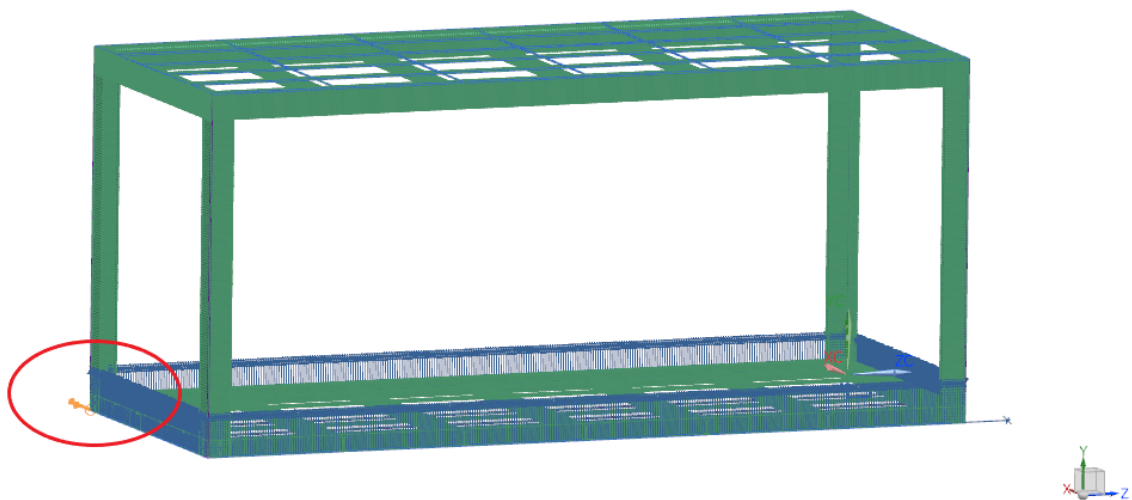
Obrázek 27: Okrajová podmínka pro osu Y

- 2) Vyznačená okrajová podmínka zamezuje posunutí spodního rohu rámu ve směru osy  $X, Y, Z$  – je to tzv. pevný bod



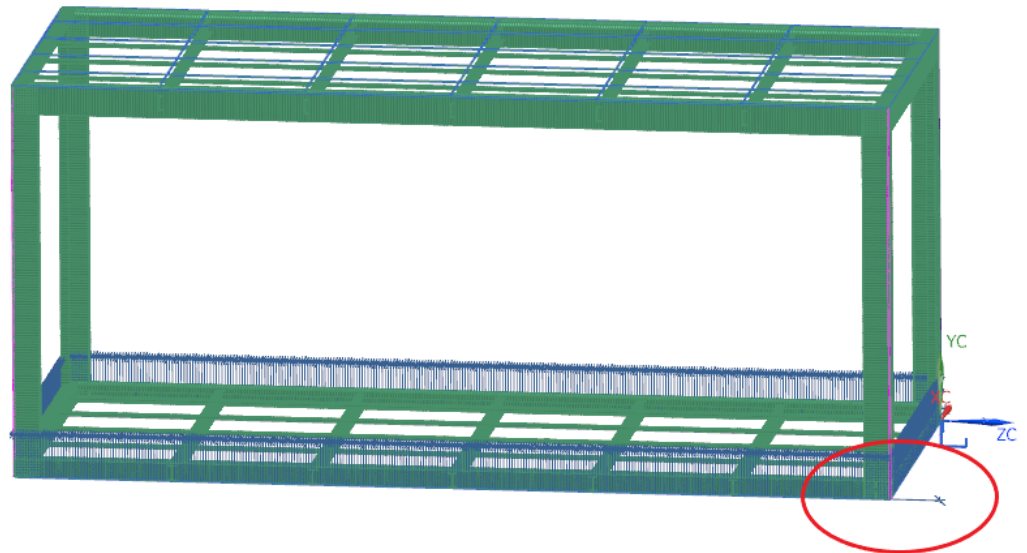
Obrázek 28: Pevný bod krajního rohu

- 3) Vyznačená okrajová podmínka zamezuje posunutí ve spodním rohu rámu ve směru osy  $X$ , aby nedošlo k natočení okolo pevného bodu



Obrázek 29: Okrajová podmínka pro osu  $X$

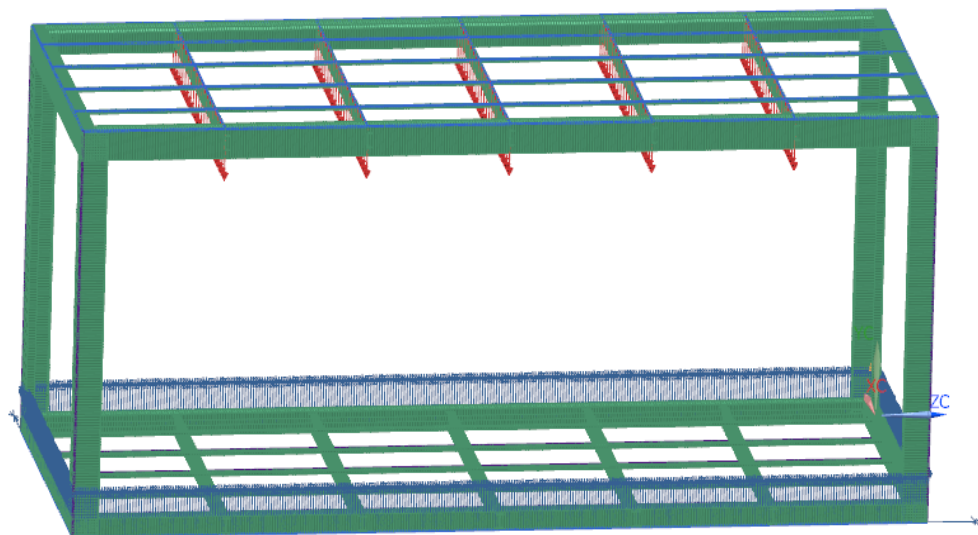
- 4) Vyznačená okrajová podmínka zamezuje posunutí spodnímu rohu rámu ve směru osy Z, aby nedošlo k natočení okolo pevného bodu



Obrázek 30: Okrajová podmínka pro osu Z

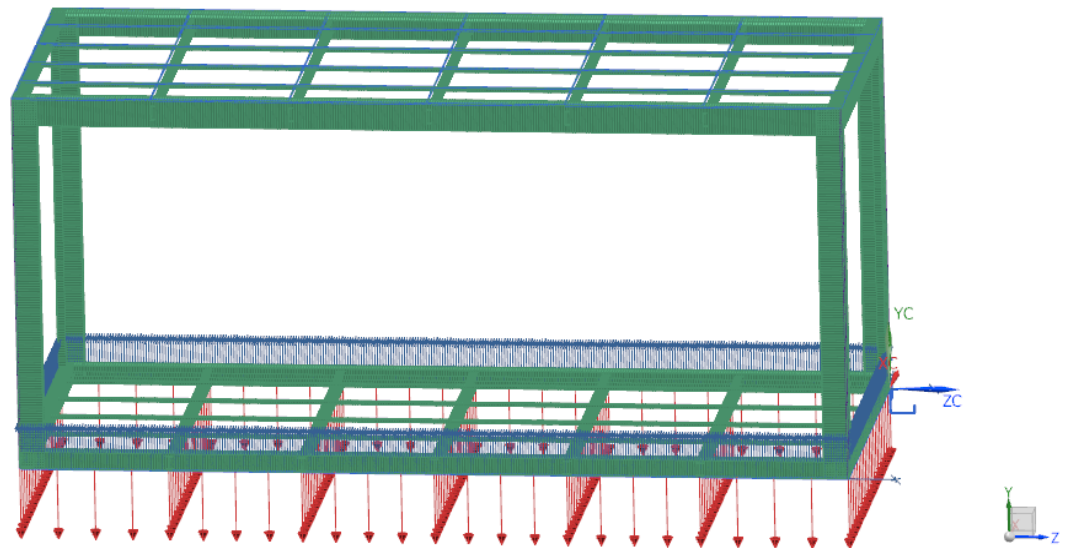
## 9.2 Zatížení rámu

- Druhy namáhání, které působí na rám:
  - Vlastní tíha
  - Ostatní stálé zatížení (vlastní tíha kompletačních konstrukcí)
  - Užité zatížení (sníh)
  
- Rám byl zatížen následovně:
  - 1) „U“ profily o rozměrech 30 x 30 x 100 mm, které jsou osově uloženy po 1010 mm, byly zatíženy skladbou stropu o celkové velikosti 5908 N.
    - Skladba stropu se skládá z:
      - a) Pozinkovaného plechu
      - b) Tepelné izolace
      - c) Parotěsné zábrany
      - d) Dřevěného roštu
      - e) Překližky



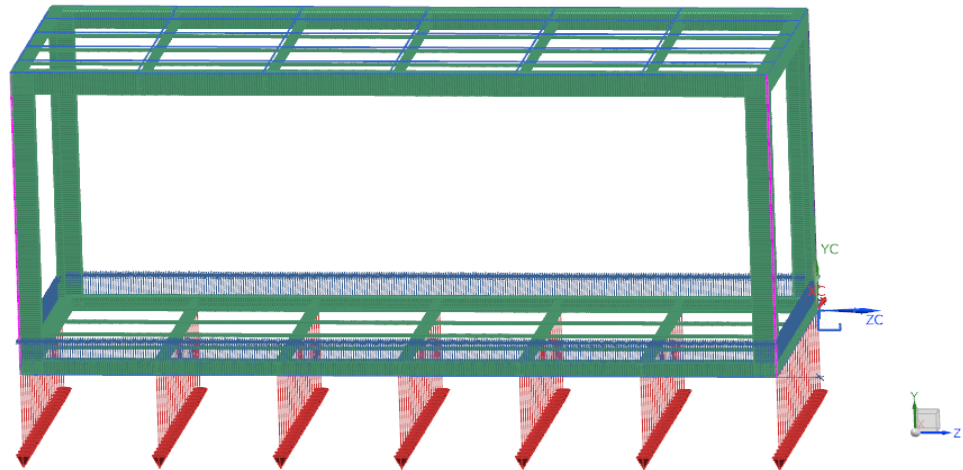
Obrázek 31: Zatížení U profilů

- 2) Spodní nosník a I profily, které jsou osově uloženy po 970 mm byly zatíženy skladbou podlahy o velikosti 7385 N.
- Skladba podlahy se skládá z:
    - a) PVC podlaha
    - b) Dřevotřísková deska
    - c) Parotěsná zábrana
    - d) Dřevěný rošt
    - e) Tepelná izolace
    - f) Pozinkovaný plech



Obrázek 32: Zatížení I profilů a spodního nosníku

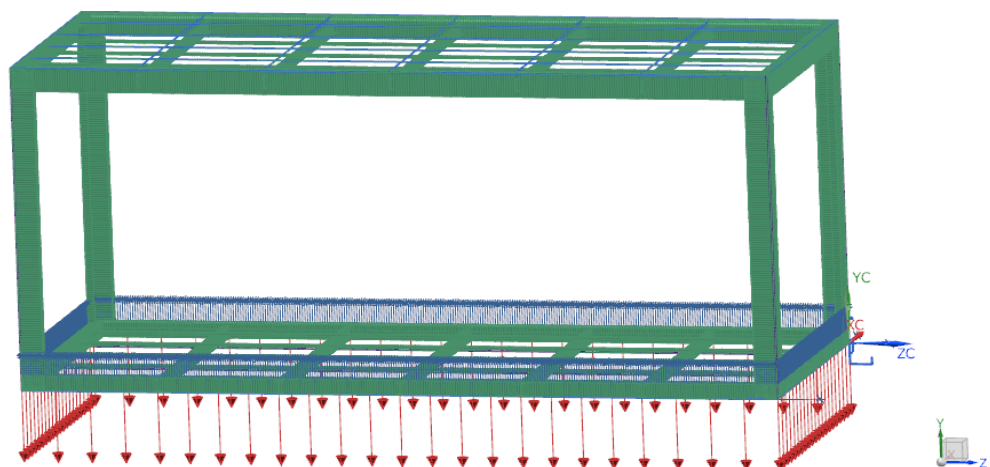
- 3) Část spodního nosníku, a I profily byly zatíženy užitným zatížením o velikosti 36923 N. Užité zatížení je standardně počítáno jako 250 kg/m<sup>2</sup>.



Obrázek 33: Zatížení části spodního nosníku a I profilů

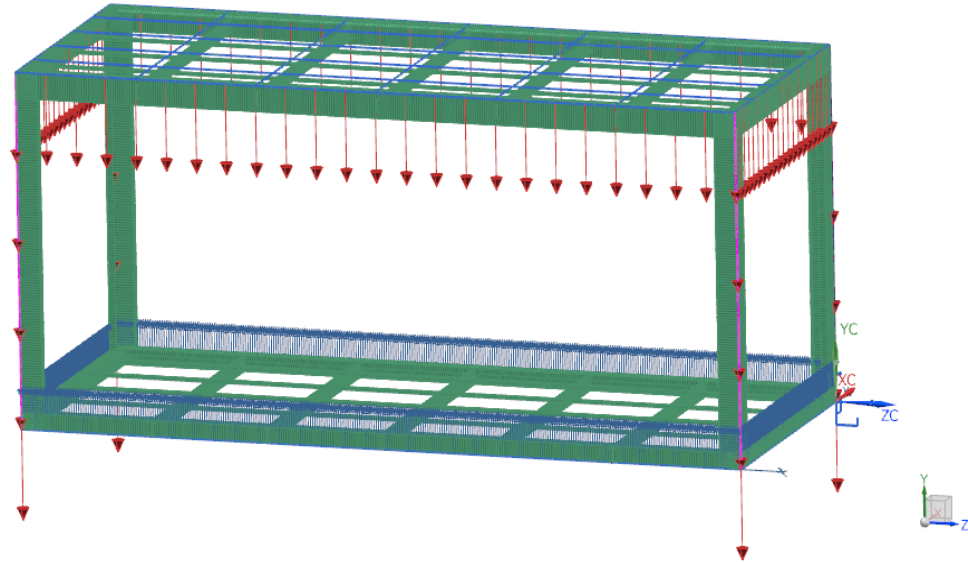
- 4) Spodní nosník zatížený tíhou stěn o velikosti 11815 N

- Skladba stěn
  - a) Pozinkovaný plech
  - b) Dřevěný rošt
  - c) Tepelná izolace
  - d) Sádrokarton



Obrázek 34: Zatížení spodního nosníku

- 5) Horní nosník a sloupce byly zatíženy vlastní tíhou rámu o velikosti 30000 N. Je zde započítáno i standardní zatížení sněhem  $125 \text{ kg/m}^2$ , které působí na střechu.



Obrázek 35: Zatížení horního nosníku a sloupů

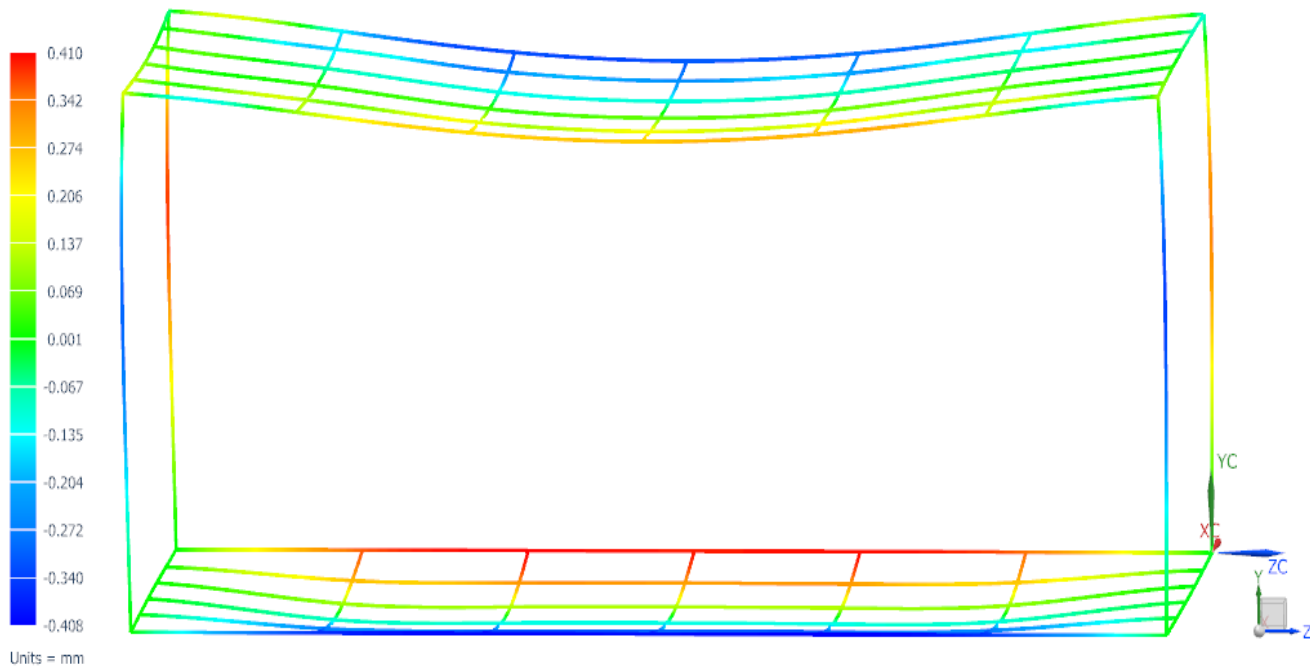


## 9.3 Výsledky analýzy

### 1. Posunutí

- Výsledky maximálního posunutí:
  - **X** – max.0,41 mm
  - **Y** – max. 13,17, mm
  - **Z** – max. 1,141 mm
  
- Hodnoty posunutí ve směru osy X jsou velmi malé, maximální posunutí se projeví především na spodní hraně rámu, lze říci, že posunutí o půl milimetru můžeme považovat za zanedbatelné

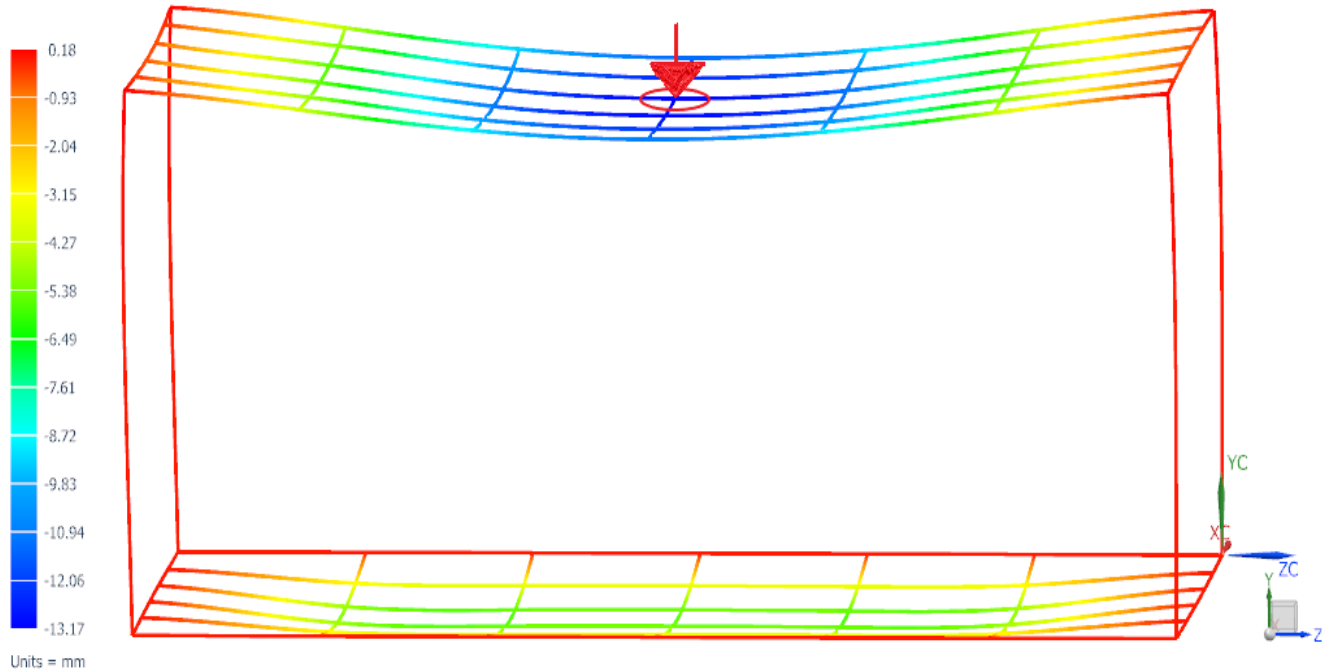
Čáry rozdělené : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, X  
Min : -0.408, Max : 0.410, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 36: Hodnoty posunutí ve směru osy X

- Hodnoty pro posunutí ve směru osy Y odpovídají stejným hodnotám, jako posunutí výslednice, která se tedy uprostřed horního rámu posune ve směru osy Y o 13,17 mm.

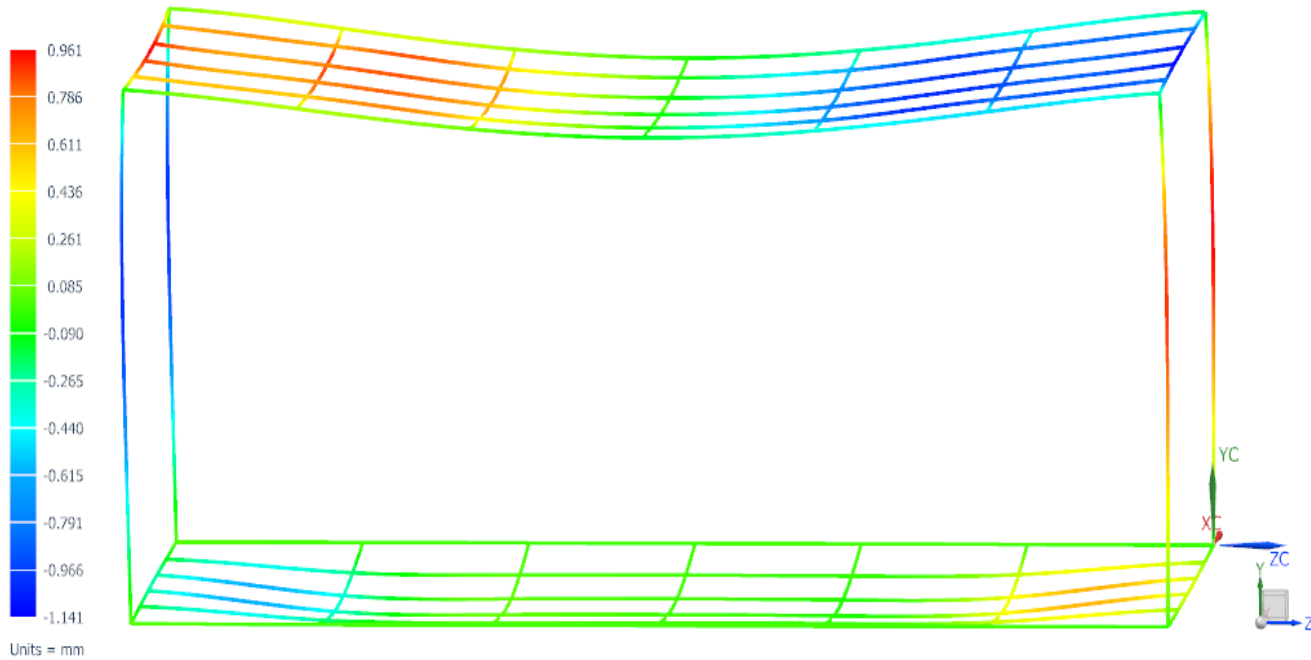
čáry rozdělené : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Y  
Min : -13.17, Max : 0.18, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 37: Hodnoty posunutí výslednice ve směru osy Y [mm]

- Hodnoty posunutí ve směru osy Z jsou velmi malé, maximální posunutí odpovídá necelému milimetru, lze tyto hodnoty považovat za zanedbatelné

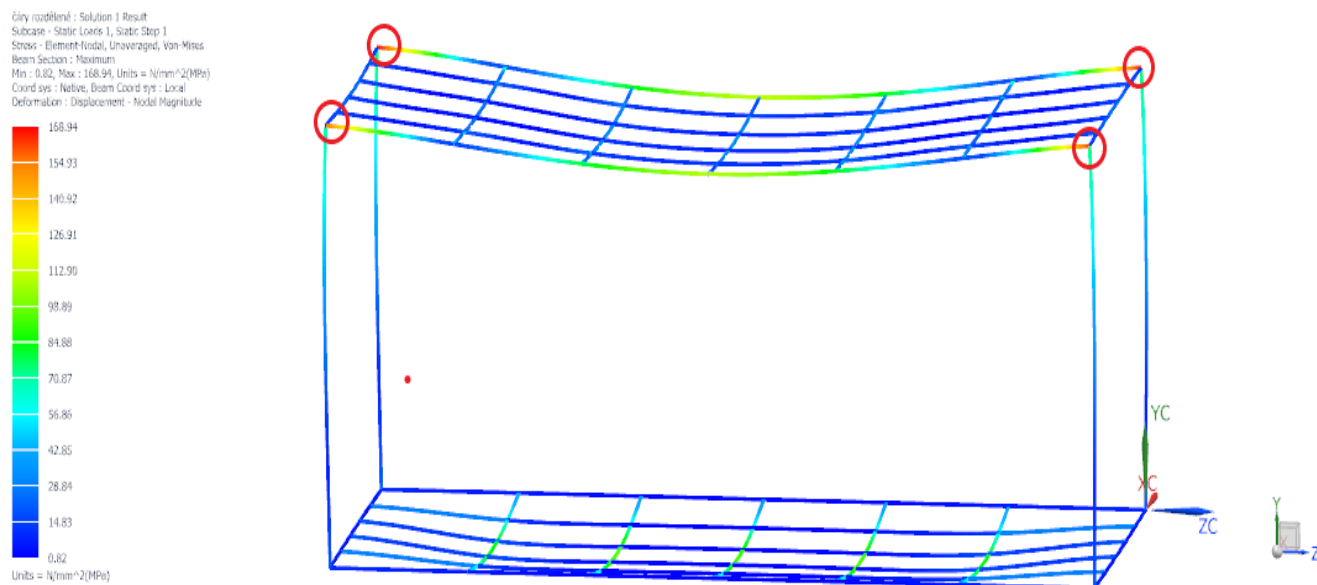
Čáry rozdělené : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, Z  
Min : -1.141, Max : 0.961, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



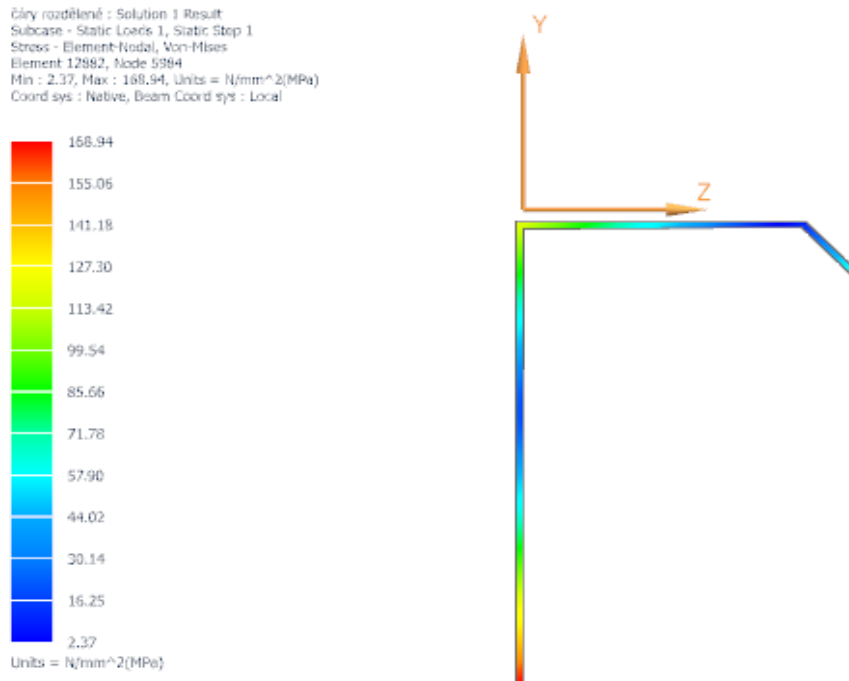
Obrázek 38: Hodnoty posunutí ve směru osy Z [mm]

## 2. Napětí

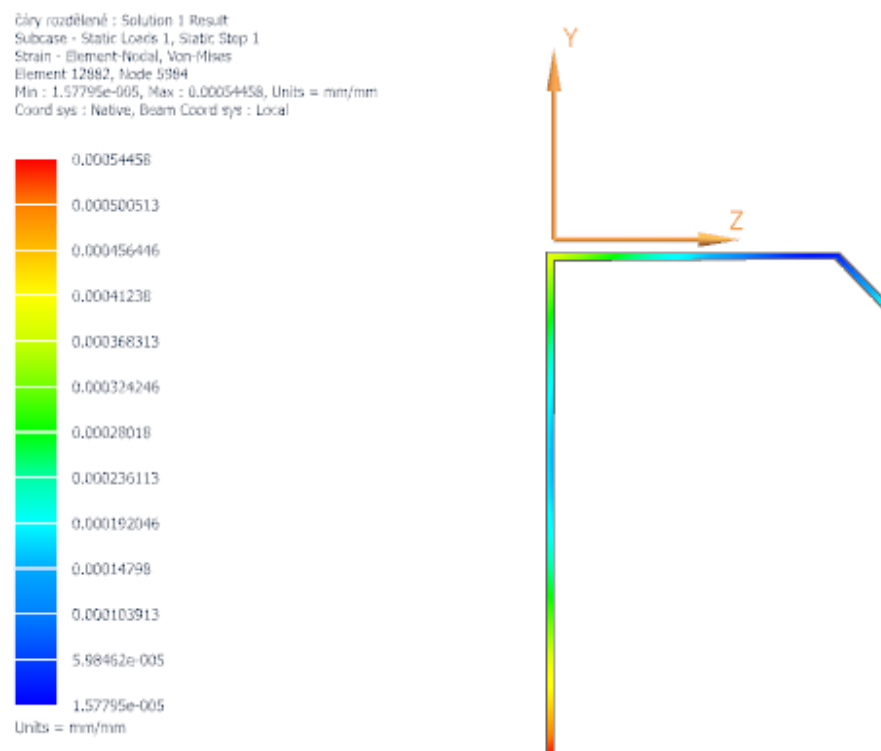
- Výsledky pro maximální napětí:
  - **Von Mises** - Max.168,94 N/mm<sup>2</sup> (MPa)
- Ve vyznačených rozích se nachází maximální napětí, které na rám působí



Obrázek 39: Napětí dle Von Misesse [MPa]



Obrázek 40: Napětí v průřezu dle Von Misesse [MPa]



Obrázek 41: Poměrná deformace průřezu dle Von Misesse [m/m]

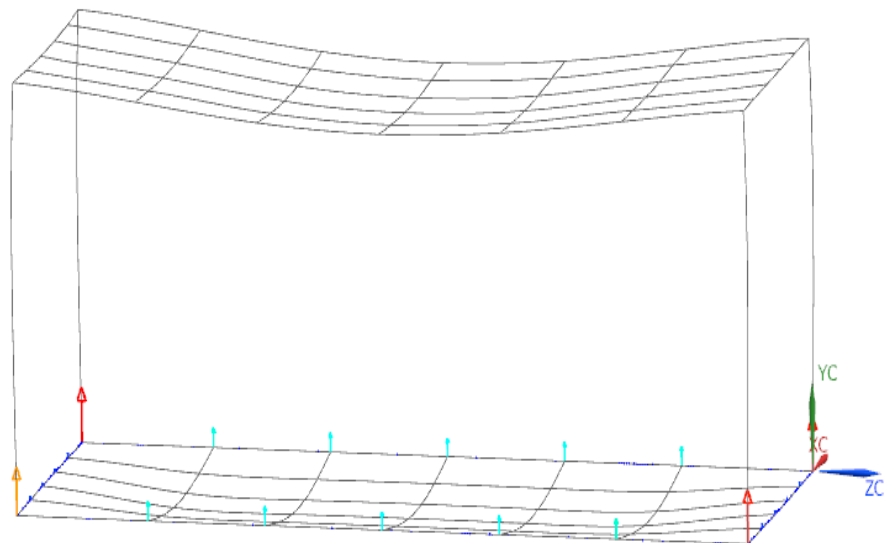
### 3. Reakční síla

– Výsledek reakční síly:

- **Y** – max. 8440,87 N

– Maximální hodnota reakční síly 8440,87 N v ose Y odpovídá také reakční síle výslednice

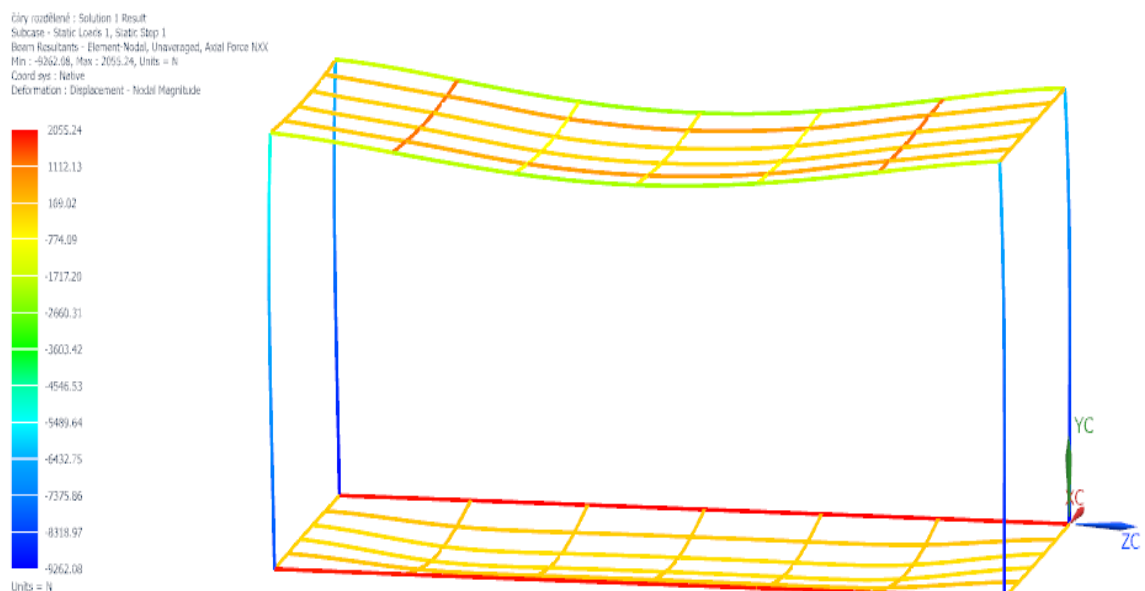
Círy rozdělení : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Reaction Force - Nodal, Y  
Min : 0.00, Max : 8440.87, Units = N  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 42: Hodnoty reakčních sil výslednice ve směru osy Y [N]

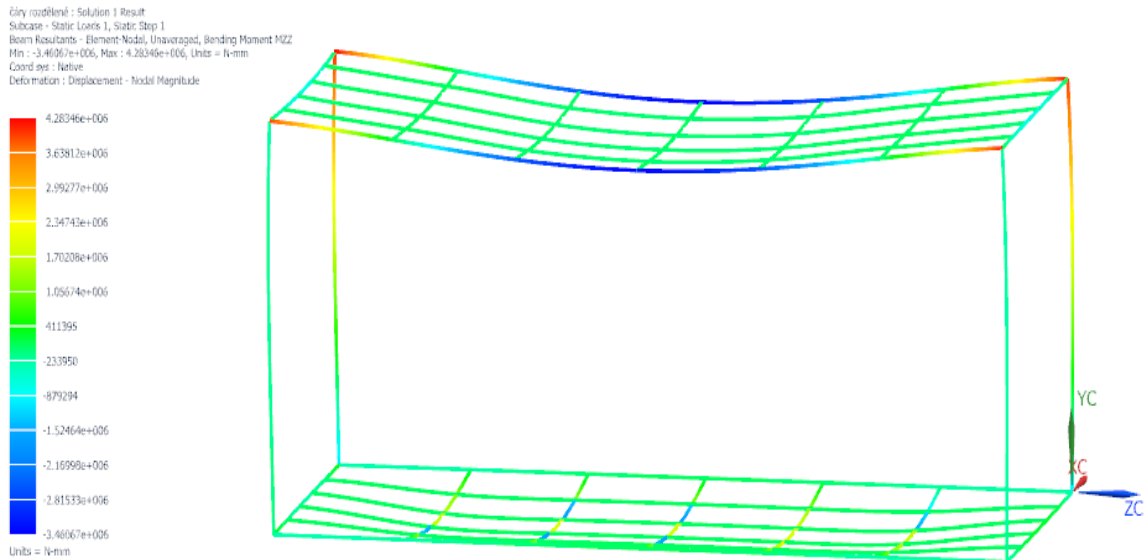
#### 4. Vnitřní účinky v profilech

- Výsledky normálových zatížení:
  - **Osová síla** – max. 9262,08 N
  - **Ohybový moment** – max. 4,28e+006 N-mm
  - **Kroutící moment** – max. 16778,6 N-mm
  - **Posouvající síla** – max. 4859,9 N
  
- Maximální hodnota osově síly 9262,08 N působí ve sloupech rámu



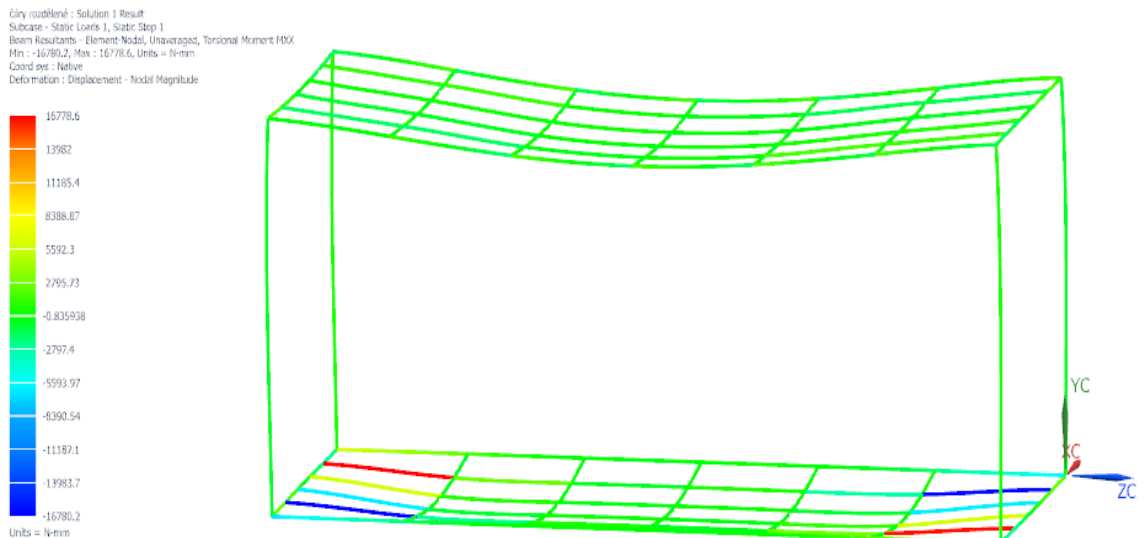
Obrázek 43: Hodnoty osově síly [N]

- Největší ohybový moment působí v koncích horního nosníku, což je současně místo, kde působí maximální napětí.



Obrázek 44: Hodnoty ohybového momentu [N.mm]

- Maximální krutící moment 16778,6 N-mm se nejvíce projeví na spodním uzavřeném obdélníkovém průřezu

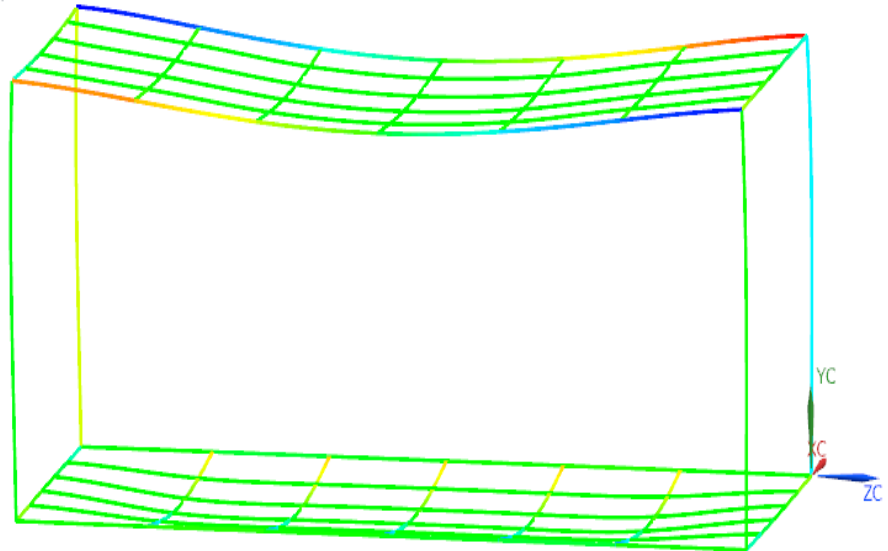


Obrázek 45: Hodnoty krutícího momentu [N.mm]



- Maximální hodnota pro posouvající sílu 4838,17 N působí v krajích horního nosníku

Číslo výsledku : Solution 1 Result  
Subcase - Static Load 1, Static Step 1  
Beam Resultants - Element-Nodal, Unaveraged, Shear Force Q/Y  
Min : -4859.90, Max : 4838.17, Units = N  
Coord sys : Native  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 46: Hodnoty posouvající síly [N]

## 10 KALKULACE KOMPLETNÍHO KONTEJNERU

Celková cena za standardní kontejner o rozměrech 6058 x 2438 x 2840 mm se skládá z:

- Materiálových nákladů
- Montážních nákladů
- Dopravy
- Zisku

### 1. Mezi materiálové náklady patří:

- Kovové dílce
- Plasty
- Izolace
- DTD
- Dveře včetně kování
- Okno s rolem
- Barvy
- Montážní materiálu
- Šrouby a nýty
- Elektromateriál

### 2. Montážní náklady:

- Práce montážníků

### 3. Doprava

### 4. Zisk

Název	Cena [Kč] bez DPH
<b>Rám</b>	33 130
<b>Kovové dílce</b>	18 114
<b>Plasty</b>	3 514
<b>Izolace</b>	3 547
<b>DTD</b>	7 974
<b>Dveře vč. Kování</b>	3 272
<b>Barva</b>	2 702
<b>Montážní nátěry</b>	660
<b>Okno s rolem</b>	6 682
<b>Šrouby a nýty</b>	828
<b>Elektromateriál</b>	5 699
<b>Celková cena za materiál:</b>	<b>86 118 Kč bez DPH</b>

Tabulka 11: Materiálové náklady

Název	Cena bez DPH
<b>Materiálové náklady</b>	86 118 Kč
<b>Montážní náklady</b>	16 253 Kč
<b>Doprava</b>	13 Kč/km
<b>Zisk 5 % z CN</b>	5 388 Kč
<b>Celková cena za kontejner:</b>	<b>113 147 Kč</b>

Tabulka 12: Cena za standardní kontejner

- Cena konstrukce rámu se odvíjí od hmotnosti. Navrhovaný rám váží 923 kg a cena vychází na 33 130 Kč bez DPH → 35,89 Kč/kg bez DPH.

## ZÁVĚR

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo ověření návrhu ocelového rámu z hlediska dodržení pevnostních zásad. Rám byl navržen o rozměrech: 6058 x 2438 x 2840 mm z oceli pevnostní třídy S235 a S355.

Konstrukce ocelového rámu byla vymodelována v programu Autodesk Inventor a poté byl rám překreslen do programu NX 11 jako drátěný model. Jednotlivým čarám byla přiřazena síť z 1D elementů.

Dále byly nadefinovány okrajové podmínky, aby bylo zabráněno následnému posunutí a natočení rámu během zatěžování. Jednotlivé profily byly zatíženy vnějšími silami, které na rám působí. Mezi hlavní druhy namáhání zde patří: vlastní tíha rámu, užité zatížení a ostatní stálé zatížení.

Následně byla provedena pevnostní analýza, z níž byly dílčí výsledky použity pro vyhodnocení. Vypočítané hodnoty byly posouzeny dle dovolených mezních namáhání. V žádném případě nebylo dovolené namáhání překročeno. Vypočítané maximální napětí, které se nejvíce projeví v horním rámu, je 168 MPa < 284 MPa což je hodnota odpovídající maximální výpočtové pevnosti oceli třídy S355, maximální napětí 168 MPa < 188 MPa což je hodnota, která odpovídá maximální pevnosti oceli třídy S235, která je použita v dalších profilech. Ukázalo se tedy, že nikde v rámu nebyla pevnost překročena. Kladným výsledkem celkového vyhodnocení je, že byl rám vhodně navržen a je dvakrát stohovatelný, tzn. že na sobě unese jeden další kontejner. V praxi byl tento návrh realizován a vyhovuje.

Vzhledem k rezervě u výpočtové pevnosti oceli by bylo možné v dalším kroku optimalizovat velikosti profilů, výsledkem by bylo snížení hmotnosti celého rámu, tudíž by klesla i celková cena.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MARDER, Abram. *Kov v architektúre*. 1. vydání Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00127-4
- [2] KOUT, Jiří. *I KOMA Module: historie vzniku a současné tendence modulární architektury*. 1. vydání Praha: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05110-8.
- [3] MACHÁČEK, Josef. *Navrhování ocelových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8; Navrhování hliníkových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1999-1*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Technická knihovna (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-86-3
- [4] ŠEJNOHA, Jiří a Jitka BITTNAROVÁ. *Pružnost a pevnost 10*. 2. vydání Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02742-2.
- [5] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. 2. vydání Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006. ISBN 80-7318-440-0
- [6] VYBÍRAL, Bohumil. *Základy teoretické mechaniky*. 2. díl.1. vydání Hradec Králové: Gaudeamus, 1992. ISBN 80-7041-456-1
- [7] PECHAR, Jiří, Karel VRBA a Jiří STUDNIČKA. *Prvky kovových konstrukcí*. 1. vydání Praha: SNTL, 1985. Technický průvodce.
- [8] STUDNIČKA, Jiří. *Navrhování nosných konstrukcí*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001054901
- [9] STUDNIČKA, Jiří a Milan HOLICKÝ. *Ocelové konstrukce 20: zatížení staveb podle Eurokódu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 8001027511
- [10] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4
- [11] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001042243
- [12] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí-Část 2-2: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

A	Plocha
$A_{vz}$	Plocha stěny ve smyku ve směru osy z
b	Šířka
CAD	Computer aided design (počítačová podpora konstrukce)
CAE	Computer aided engineering (počítačová podpora ve strojírenství)
$C_e$	Součinitel expozice
$C_t$	Tepelný součinitel
d	Průměr
DPH	Daň z přidané hodnoty
dS	Element plochy
DWG	Formát souboru AutoCad
E	Youngův model pružnosti
$e_{max}$	Poloha neutrální osy
F	Síla
FEA	Finite element analysis (konečně prvková analýza)
FEM	Finite element method (metoda konečných prvků)
$F_m$	Max. síla pevnosti
$f_{ub}$	Mez pevnosti
$f_{yb}$	Mez kluzu
G	Modul pružnosti ve smyku
h	Výška
$i_y, i_z$	Poloměr setrvačnosti k ose y, z
$I_y, I_z$	Moment setrvačnosti k ose y, z
$J_p$	Polární kvadratický moment

---

$J_z$	Modul setrvačnosti průřezu
kg	Kilogram
l	Délka
$l_0$	Počáteční délka
m	Hmotnost
m	Metr
mm	Milimetr
M	Ohybový moment
$M_k$	Kroutící moment
$M_0$	Nulový moment
N	Normálová síla
N	Newton
NC	Numerical Control
Pa	Pascal
Q	Posouvající síla
r	Poloměr
$R_d$	Výpočtová pevnost
$R_m$	Pevnost v tahu
$R_y$	Normová pevnost
$S_k$	Hodnota charakteristická pro zatížení sněhem na zemi
$S_0$	Průřezová plocha
T	Posouvající síla
$t_f$	Rozměry I profilu
$t_w$	Rozměry I profilu
$W_0$	Průřezový modul
$W_y, W_z$	Pružný průřezový modul k ose y, z

---

$x$	Osa x
$y$	Osa y
$y_m$	Rozměry U profilu
$y_s$	Rozměry U profilu
1D	Jednorozměrný
2D	Dvojměrný
3D	Trojměrný
$\gamma$	Zkos
$\Delta l$	Prodloužení tělesa
$\varepsilon$	Relativní prodloužení
$\mu_i$	Tvarový součinitel zatížení sněhem
$\nu$	Součinitel příčné deformace
$\rho$	Objemová hustota
$\sigma$	Normálové napětí
$\tau$	Smykové napětí
$\tau_{xy}$	Smykové napětí vůči ose y
$\tau_{xz}$	Smykové napětí vůči ose z
$\Upsilon_m$	Součinitel spolehlivosti materiálu



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Mapa sněhových oblastí na území České Republiky.....	17
Obrázek 2: Deformace v tahu .....	20
Obrázek 3: Chování materiálu při namáhání tahem/tlakem .....	21
Obrázek 4: Průběh hookova zákona .....	21
Obrázek 5: Prodloužení tělesa při zatížení tahem.....	22
Obrázek 6: Napětí při prostém tahu .....	23
Obrázek 7: Prostý ohyb.....	24
Obrázek 8: Ohybový moment $M_0$ .....	24
Obrázek 9: Typy uložení.....	25
Obrázek 10: Napětí při ohybu.....	26
Obrázek 11: Příklad kroutícího momentu se smykovým napětím.....	28
Obrázek 12: Kruhové díry .....	31
Obrázek 13: Prodloužené díry s osou kolmou na směr síly.....	31
Obrázek 14: Prodloužené díry s osou rovnoběžnou se směrem síly.....	32
Obrázek 15: Ruční svařování.....	32
Obrázek 16: Svařování v ochranné atmosféře (automatem): - $CO_2$ .....	33
Obrázek 17: Svařování pod tavidlem (automatem) .....	33
Obrázek 18: Tupý svar.....	34
Obrázek 19: Koutový svar .....	34
Obrázek 20: Ocelový rám .....	41
Obrázek 21: U profil .....	44
Obrázek 22: I profil.....	45
Obrázek 23: Čárový model .....	47
Obrázek 24: Fem model.....	48
Obrázek 25: Simulace .....	48
Obrázek 26: 3D model.....	49
Obrázek 27: Okrajová podmínka pro osu Y .....	50
Obrázek 28: Pevný bod krajního rohu .....	51
Obrázek 29: Okrajová podmínka pro osu X .....	51
Obrázek 30: Okrajová podmínka pro osu Z.....	52
Obrázek 31: Zatížení U profilů .....	53
Obrázek 32: Zatížení I profilů a spodního nosníku .....	54

---

Obrázek 33: Zatížení části spodního nosníku a I profilů .....	55
Obrázek 34: Zatížení spodního nosníku .....	55
Obrázek 35: Zatížení horního nosníku a sloupů .....	56
Obrázek 36: Hodnoty posunutí ve směru osy X .....	57
Obrázek 37: Hodnoty posunutí výslednice ve směru osy Y [mm] .....	58
Obrázek 38: Hodnoty posunutí ve směru osy Z [mm].....	59
Obrázek 39: Napětí dle Von Mises [MPa].....	60
Obrázek 40: Napětí v průřezu dle Von Misesse [MPa].....	61
Obrázek 41: Poměrná deformace průřezu dle Von Misesse [m/m] .....	61
Obrázek 42: Hodnoty reakčních sil výslednice ve směru osy Y [N].....	62
Obrázek 43: Hodnoty osově síly [N] .....	63
Obrázek 44: Hodnoty ohybového momentu [N.mm] .....	64
Obrázek 45: Hodnoty krouticího momentu [N.mm] .....	64
Obrázek 46: Hodnoty posouvající síly [N] .....	65

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Objemová tíha sněhu .....	18
Tabulka 2: Tvarový součinitel $\mu_i$ .....	18
Tabulka 3: Spojovací prostředky pro šroubové spoje.....	30
Tabulka 4: Jmenovité hodnoty meze kluzu $f_{yb}$ a pevnosti v tahu $f_{ub}$ materiálu šroubů .....	30
Tabulka 5: Nýty a šrouby.....	32
Tabulka 6: Jmenovité hodnoty pevnostních konstrukčních ocelí.....	42
Tabulka 7: Vlastnosti profilu U .....	44
Tabulka 8: Průřezové veličiny profilu U .....	44
Tabulka 9: Vlastnosti I profilů.....	45
Tabulka 10: Průřezové veličiny profilu I.....	45
Tabulka 11: Materiálové náklady .....	67
Tabulka 12: Cena za standardní kontejner.....	67