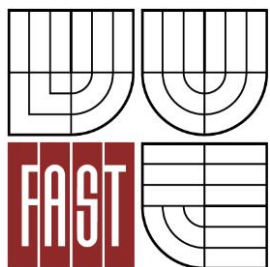




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**STATICKÁ ANALÝZA A MODELOVÁNÍ OCELOVÉ
KONSTRUKCE METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ**
STATIC ANALYSIS AND MODELLING OF STEEL STRUCTURE BY FINITE ELEMENT METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ VOJTEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAKUB KRŠÍK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav stavební mechaniky |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|---|--|
| Student | Jiří Vojtek |
| Název | Statická analýza a modelování ocelové konstrukce metodou konečných prvků |
| Vedoucí bakalářské práce | Ing. Jakub Kršík |
| Datum zadání bakalářské práce | 29. 11. 2013 |
| Datum odevzdání bakalářské práce | 30. 5. 2014 |
| V Brně dne 29. 11. 2013 | |

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Kytýr, J., Kadlčák, J.: Statika stavebních konstrukcí II
- Kolář, V., Němec, I., Kanický, V.: FEM - Principy a praxe metody konečných prvků, Vydavatelství Computer Press, 1997
- Servít, R., Drahoňovský, Z., Šejnoha, J. Kufner, V.: Teorie pružnosti a plasticity II, STNL/ALFA Praha, 1984
- Bittnar, Z., Šejnoha, J.: Numerické metody mechaniky, Vydavatelství ČVUT, 1992
- ČSN EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí
- Nemetschek Scia Engineer manual and theoretical background, release 2012

Zásady pro vypracování

Pro vybranou ocelovou konstrukci vytvořit konečně prvkový model řešení programem Scia Engineer. Na vybraném rámu z konstrukce vyhodnotit vypočtená napětí pro různé varianty s využitím lineárního a nelineárního výpočtu - materiálová nelinearita, geometrická nelinearita, analýza po analýze. Porovnat míru zvýšení únosnosti konstrukce s použitím výše zmíněných nelineárních metod oproti lineární metodě výpočtu.

Předepsané přílohy

.....

Ing. Jakub Kršík
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tvorba konečně prvkového modelu ocelové konstrukce v programu Scia Engineer. Vyhodnocení vypočtených napětí s využitím lineárního a nelineárního výpočtu na vybraném rámu z konstrukce. Porovnání míry zvýšení únosnosti konstrukce použitím nelineárního výpočtu oproti lineárnímu.

Klíčová slova

Scia Engineer, Ocelový rám, Geometrická nelinearita, Analýza po analýze, Metoda konečných prvků.

Abstract

The creation of finite element model of steel structure in Scia Engineer program. The evaluation of calculated stresses between linear and nonlinear calculation on selected construction frame. The comparison of increased bearing capacity with using nonlinear calculation instead of linear calculation.

Keywords

Scia Engineer, Steel frame, Geometric nonlinearity, Analysis after analysis, Finite Element Method.

Bibliografická citace VŠKP

Jiří Vojtek *Statická analýza a modelování ocelové konstrukce metodou konečných prvků*. Brno, 2014. 59 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Jakub Kršík.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2014

.....
podpis autora
Jiří Vojtek

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Kršíkovi z Ústavu stavební mechaniky za ochotu, pomoc a rady při vedení této práce. Dále děkuji Ing. Hronovi z Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí, který mi poskytl konzultace při řešení části této práce.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| 1. ÚVOD | 11 |
| 2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ | 13 |
| 2.1. Základy MKP | 13 |
| 2.1.1. Energie soustavy | 14 |
| 2.1.2. Výpočetní model | 15 |
| 2.1.3. Prutové konstrukce | 17 |
| 2.2. Počítačové programy MKP | 19 |
| 2.2.1. Program Scia Engineer | 20 |
| 3. POPIS KONSTRUKCE | 21 |
| 3.1. Materiálové charakteristiky | 22 |
| 3.2. Použité průřezy a průřezové charakteristiky | 23 |
| 4. ZATĚŽOVACÍ STAVY A VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ SÍLY - LINEÁRNÍ VARIANTA | 24 |
| 4.1. Vlastní tíha rámu a příčlí | 24 |
| 4.2. Ostatní stálé zatížení..... | 24 |
| 4.3. Proměnné zatížení | 25 |
| 4.3.1. Osamělé jednotkové břemeno | 25 |
| 4.3.2. Zatížení sněhem..... | 25 |
| 4.3.3. Zatížení větrem..... | 26 |
| 4.4. Výsledné vnitřní síly | 27 |
| 5. NELINEÁRNÍ VARIANTA | 30 |
| 5.1. Vliv imperfekcí..... | 30 |
| 5.1.2. Vliv geometrických imperfekcí..... | 30 |
| 5.1.3. Imperfekce prutových soustav..... | 32 |
| 5.1.4. Imperfekce pro globální analýzu prutových konstrukcí..... | 33 |
| 5.2. Výpočet s teorií 2. řádu | 35 |
| 5.2.1. Výpočet pro levý sloup..... | 36 |
| 5.2.2. Výpočet pro pravý sloup | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.3. Výsledky vnitřních sil | 38 |
| 5.3. Analýza po analýze | 39 |
| 6. POSOUZENÍ KONSTRUKCE..... | 42 |
| 6.1. Zatřívání průřezu | 42 |
| 6.2. Posouzení na prostý ohyb | 42 |
| 6.2.1. Posouzení sloupu na prostý ohyb..... | 42 |
| 6.2.2. Posouzení příčle na prostý ohyb – konstantní část..... | 43 |
| 6.2.3. Posouzení příčle na prostý ohyb – náběh | 43 |
| 6.3. Posouzení na prostý tlak..... | 43 |
| 6.3.1. Posouzení sloupu na prostý tlak | 43 |
| 6.3.2. Posouzení příčle na prostý tlak – konstantní část..... | 43 |
| 6.3.3. Posouzení příčle na prostý tlak – náběh..... | 44 |
| 6.4. Posouzení kombinace prostého tlaku a prostého ohybu..... | 44 |
| 6.4.1. Posouzení sloupu na kombinaci tlaku a ohybu..... | 44 |
| 6.4.2. Posouzení příčle na kombinaci tlaku a ohybu – konstantní část | 44 |
| 6.4.3. Posouzení příčle na kombinaci tlaku a ohybu – náběh | 44 |
| 6.5. Posouzení na smyk | 44 |
| 6.5.1. Posouzení sloupu na smyk | 44 |
| 6.5.2. Posouzení příčle na smyk – konstantní část..... | 45 |
| 6.5.3. Posouzení příčle na smyk – náběh..... | 45 |
| 6.6. Posouzení sloupu na vzpěrnou únosnost | 46 |
| 6.7. Posouzení sloupu na klopení | 47 |
| 6.8. Posouzení kombinace vzpěru a klopení | 48 |
| 7. NÁVRH ÚSPORNĚJŠÍ KONSTRUKCE..... | 50 |
| 7.1. Vnitřní síly..... | 50 |
| 7.2. Posouzení..... | 50 |
| 7.2.1. Posouzení sloupu na prostý ohyb..... | 50 |
| 7.2.2. Posouzení sloupu na prostý tlak | 51 |
| 7.2.3. Posouzení sloupu na kombinaci tlaku a ohybu..... | 51 |
| 8. ZÁVĚR..... | 52 |

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 54 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ | 56 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 59 |
| PŘÍLOHY | 60 |
| Příloha 1 – Výpočet zatížení větrem | 60 |
| Příloha 2 – Zatřídění průřezu..... | 63 |

1. ÚVOD

Ocelové konstrukce se používají ve stavebnictví převážně na nosné konstrukce halových a výškových budov. V České republice se však používají méně, než ve zbytku západní Evropy. Hlavní příčinou je cena, která oproti ostatním materiálům výrazněji roste.

Mezi hlavní výhody oceli patří:

- vysoká pevnost vzhledem k hmotnosti konstrukce
- vysoká variabilita tvaru konstrukcí
- rychlá montáž a možnost úprav
- recyklovatelnost

Mezi hlavní nevýhody oceli patří:

- vysoká tepelná a akustická vodivost
- nízká odolnost proti ohni
- potřeba údržby vůči korozi
- vzrůstající cena

Pro halové objekty se využívá ocelový skelet, který je:

- **Rámový** – konstrukce složená ze sešroubovaných ráků, podélně zajištěných ztužidly.
- **Příhradový** – na jeho vybudování je potřeba méně materiálu, konstrukce je lehčí, avšak zabírá více místa.

Právě díky vzrůstající ceně oceli je potřeba hledat nové možnosti, jak opět zatraktivnit používání oceli ve vyšší míře. Normy zavádění přísné deklarace kvality pro výrobce, kterým odpovídají ve výpočtech součinitele spolehlivosti materiálu

$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,00$ pro únosnost průřezu kterékoliv třídy a $\gamma_{M2} = 1,25$ pro únosnost oslabených průřezů v tahu. Ocel je brána tedy jako spolehlivý materiál, pokud je kompaktní. Ústupky při posuzování dle normy nejsou možné, ani by nebyly bezpečné.

Jednou z možností by mohlo být nahrazení současně nejpoužívanějšího způsobu posuzování, lineárního, který umožňuje řadu zjednodušení, metodami nelineárními.

Cílem této práce je posouzení rozdílu mezi lineárním a nelineárním výpočtem z hlediska výsledků vnitřních sil a posouzení mezního stavu únosnosti. Za tímto účelem se vytvoří ocelový rám v programu Scia Engineer podle existující předlohy a na něj se vyvodí reálné zatížení.

Poté se provede lineární výpočet, jehož výsledkem budou vnitřní síly na rámu. V dalším kroku se zadá vliv imperfekcí a teorie druhého řádu, provede se nelineární výpočet a zhodnotí změna vnitřních sil.

Nakonec se provede posouzení konstrukce z hlediska pevnosti v ohybu, tlaku, smyku, vzpěru a klopení a posoudí se vliv lineárního a nelineárního výpočtu.

Očekávané výsledky by měli přinést rezervy v posudcích při nelineárním výpočtu, který je zejména náročnější na výpočet, a proto je prováděn v převážné míře softwarem, oproti metodám lineárním.

V této práci by se měl posoudit i vliv materiálové nelinearity. Při výpočtu ocelové konstrukce je v programu Scia Engineer uvažováno s bilineárním pracovním diagramem s konstantní horní větví. Materiálová nelinearita by byla zavedena jako zpevnění materiálu, tedy naklonění horní větve bilineárního pracovního diagramu. Program Scia Engineer však umožňuje změnu pracovního diagramu pouze pro ocelobetonové konstrukce, tudíž není možné do posuzovaného rámu zavést materiálovou nelinearitu.

2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je metoda značně univerzální, lze jí řešit skoro všechny typy konstrukcí. Je to numerická metoda, která simuluje průběhy napětí, deformací a další jevy. Její vznik je snad možno datovat do roku 1943, kdy matematik Courant publikoval práci zabývající se problémem torse a v ní nastínil matematický postup, který byl základem MKP. Bez souvislosti s Courantovou prací byly brzy také publikovány další práce, vycházející z konstrukčního, inženýrského pojetí (Hrenikov, Argyris, Clough), na které pak koncem padesátých a začátkem šedesátých let navázala řada jiných autorů (Turner, Melosh, Zienkiewicz a další, z našich autorů např. Kolář, Kratochvíl, Zlámal a Ženíšek). [1]

MKP je variantou zobecněné Ritzovy metody, kdy jsou náhradní funkce zvoleny po malých částech konstrukce neboli konečných prvcích. V klasické Ritzově metodě je nejobtížnější zvolení vhodných náhradních funkcí, které musí být po celé konstrukci spojitě a musí splňovat okrajové podmínky. Z toho vyplývá, že pro každý tvar konstrukce a různé okrajové podmínky je potřeba zvolit nové náhradní funkce. Ritzova metoda tedy není dostatečně univerzální. Tato nevýhoda odpadá při zvolení náhradních funkcí po částech, tedy konečných prvcích.

2.1. Základy MKP

Hledá se řešení funkce F z podmínky minima funkcionálu. Rozlišujeme tři varianty MKP, podle typu funkcionálu:

- **Deformační** – založená na Lagrangeově principu minima potenciální energie deformace (princip virtuálních deformací), kde funkcí F jsou posuny a funkcionálem potenciální energie soustavy,
- **Silová** – založená na Castigliánově principu minima komplementární energie (princip virtuálních sil), kde funkcí F jsou napětí a funkcionálem komplementární (doplňková) energie soustavy,
- **Smíšená** – funkcí F jsou posuny i napětí a funkcionálem obecný funkcionál

Nejpoužívanější je deformační metoda, založená na Lagrangeově principu minima celkové potenciální energie:

$$\pi_p = \pi_i + \pi_e = \text{minimum} \quad (2.1)$$

Říkající, že ze všech kinematicky přípustných funkcí přemístění, tj. funkcí splňujících dané geometrické okrajové podmínky a neporušující spojitost tělesa, jedině skutečné přemístění dává potenciaální energii soustavy π minimální hodnotu.

2.1.1. Energie soustavy

Pro pochopení energie soustavy, je nejdříve nutné definovat základní neznámé funkce, z nichž se sestavují rovnice teorie pružnosti vyhovující okrajovým podmínkám, které popisují chování tělesa a to:

- **3 funkce posunutí** – u_x, u_y, u_z ; vyjadřující posunutí konstrukce
- **6 funkcí deformací** – $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$; vyjadřující normálové a smykové deformace
- **6 funkcí napětí** – $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$; vyjadřující normálová a smyková napětí

V konstrukci se po zdeformování hromadí energie zvaná jako energie deformace a z ní vyplívající intenzita energie deformace, pro které je potřeba znát hodnoty deformací a napětí.

Intenzita energie deformace se dělí na:

- **Poměrnou potenciální energii W^d** , která se spočte pro lineárně pružný izotropní materiál:

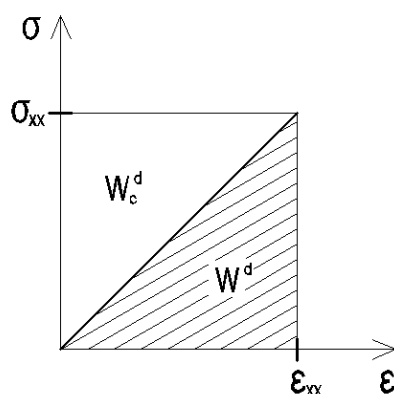
$$W^d = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} \quad (2.2)$$

Při prostorovém namáhání:

$$W^d = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + \sigma_{zx} \varepsilon_{zx}) \quad (2.3)$$

- **Komplementární (doplňkovou) energii deformace W_c^d** , která se vypočte jako plocha nad křivkou napětí-deformace

$$W_c^d = \int_0^{\sigma_{xx}} \varepsilon_{xx} d\sigma_{xx} \quad (2.4)$$



Obr. 2-1: Graf závislosti napětí a deformace

Nyní lze definovat energie soustavy:

a) Potenciální energie soustavy

Nazývá se též celková potenciální energie a vypočte se:

$$\pi_p = U_p + L_p \quad (2.5)$$

kde: U_p – Potenciální energie deformace

$$U_p = \int_V W^d(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \dots, \varepsilon_{zx}) dV \quad (2.6)$$

L_p – Potenciální energie vnějších sil

b) Komplementární (doplňková) energie soustavy

Nazývá se též celková doplňková energie a vypočte se:

$$\pi_c = U_c + L_c \quad (2.7)$$

kde: U_c – Doplňková energie deformace

$$U_c = \int_V W_c^d(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \dots, \sigma_{zx}) dV \quad (2.8)$$

L_c – Doplňková energie vnějších sil [2]

2.1.2. Výpočetní model

Výpočetní model deformační varianty MKP se pak vytvoří tak, že se dané těleso rozdělí na konečný počet podoblastí, tzv. konečných prvků, zvoleného tvaru. Těleso je konečnými prvky spojitě vyplněno tak, že se nikde neprotínají a jsou v těsném kontaktu. Konečné prvky v okolí důležitých hranic přitom mohou být zhuštěny nebo mít jiný tvar. Hledané funkce deformací $F \equiv u$ jsou aproximovány v každém konečném prvku vhodně zvolenými funkcemi, které jsou jednoznačně určeny funkčními hodnotami, derivacemi

nebo lineárními kombinacemi derivací těchto funkcí v uzlech. Funkční hodnoty či derivace aproximačních funkcí v nich nazýváme uzlové parametry. Na hranicích konečných prvků je volbou aproximačních funkcí a algoritmem MKP zajištěna potřebná spojitost.

Skrze silové nebo deformační veličiny v uzlech jsou aproximovány okrajové podmínky a zatížení, přitom zatížení a podepření působící mimo uzly se nahrazuje účinky v přilehlých uzlech. To vše se použije při sestavení výrazu pro potenciální energii π a při aplikaci výrazu (2.1).

K volbě aproximačních funkcí dochází při MKP nezávisle na tvaru konstrukce a okrajových podmínkách. Na této volbě se nepodílí ani uživatel programu, ale tvůrce teorie a programu.

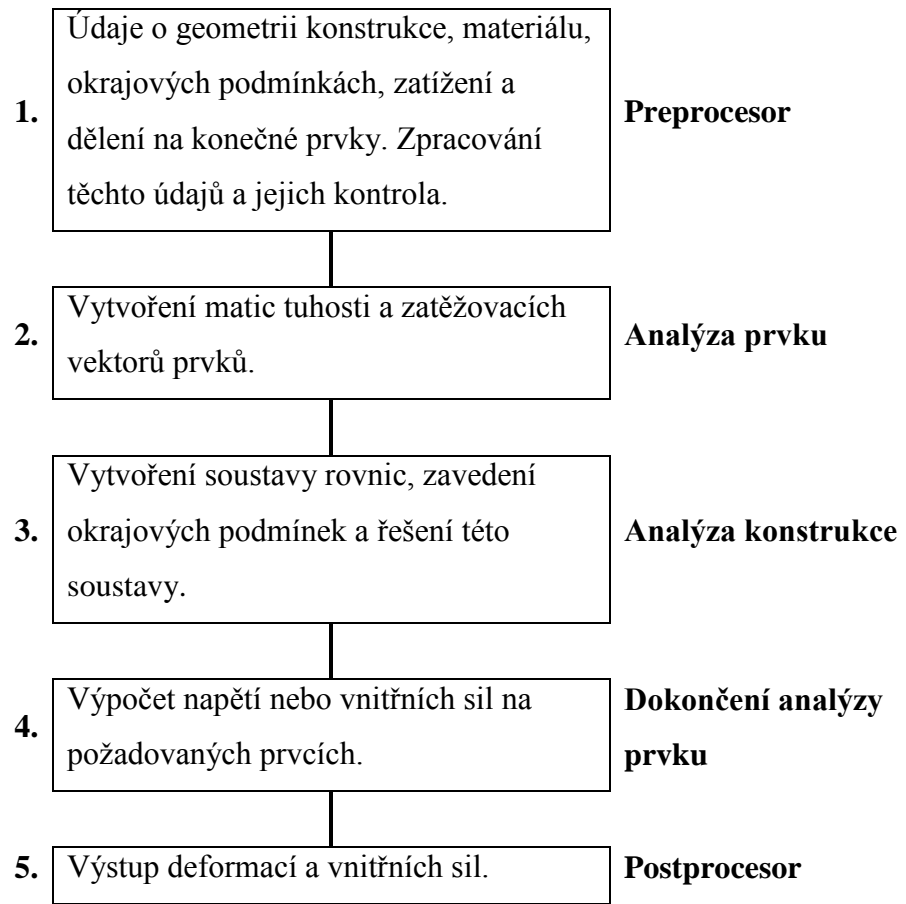
MKP je přibližná, numerická metoda, jejíž stupeň přesnosti lze měnit dle potřeby řešené úlohy volbou tvaru a hustoty sítě konečných prvků.

Postup MKP pak můžeme rozdělit do 3 fází:

- **Analýza prvku** – potenciální energie konstrukce je sestavována z příspěvků potenciálních energií příslušných jednotlivým konečným prvkům, kterými konstrukci nahrazujeme
- **Analýza konstrukce** – sestavení a řešení soustavy rovnic. Jejím výsledkem jsou uzlové deformace r
- **Dokončení analýzy prvku** – možnost ve zvolených bodech jednotlivých prvků vypočítat vnitřní síly

Algoritmus deformační varianty postupu MKP je totožný s algoritmem obecné deformační metody řešení rámců, s vynecháním tzv. primárních účinků.

Celý postup je přehledně zobrazen ve schématu postupu (Obr. 2-2)



Obr. 2-2: Schéma postupu MKP

2.1.3. Prutové konstrukce

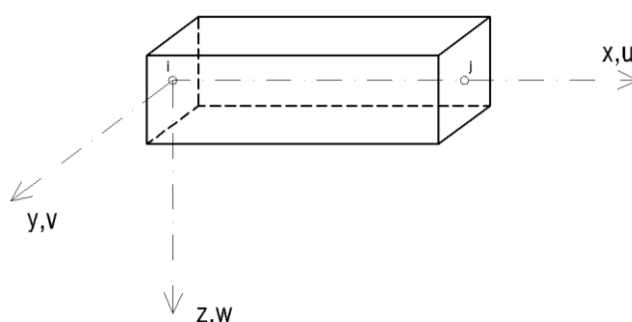
MKP poskytuje možnost řešit konstrukce vytvořené z konstrukčních prvků plošných, prostorových i prutových. V této práci je řešena pouze prutová konstrukce, tak se se zde zmiňuje pouze tato varianta.

Nejobecnější případ namáhání přímého prutu nastane, když v jednotlivých průřezech působí normálová a posouvající síla, ohybové a kroučící momenty – nastává tak tomu u prostorových rámců. Na přímém prutovém prvku namáhaném v koncových uzlech pouze těmito složkami, pak může být průběh posunů u (směr osy x) a pootočení ϑ nejvýše lineární a průhyby v (směr osy y) a w (směr osy z) nejvýše kubické. Jiné funkce pro popis stavu napětí a deformace na prutu nejsou potřeba.

Za náhradní deformační funkce lze pak zvolit:

$$\begin{aligned}
 u(x) &= a_1 + a_2x \\
 v(x) &= a_3 + a_4x + a_5x^2 + a_6x^3 \\
 w(x) &= a_7 + a_8x + a_9x^2 + a_{10}x^3 \\
 \vartheta(x) &= a_{11} + a_{12}x
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Pokud jsou lokální souřadné osy zvoleny tak, že x souhlasí s osou prutu a osy y, z jsou hlavními osami průřezu (obr. 2-3). Počet součinitelů a_i odpovídá skutečnosti, že v obou uzlech i, j je šest stupňů volnosti, tedy 3 posuny a 3 pootočení v každém uzlu. Vektor uzlových parametrů r má 12 členů a matice tuhosti K je řádu 12.



Obr. 2-3: Orientace os

Pro ostatní, jednodušší, typy prutových konstrukcí se potřebné vztahy získají vynecháním příslušných pozic uzlové deformace ve vektoru r a matici tuhosti K , jak je uvedeno v tabulce.

| Typ konstrukce | Uzlové deformace | Řád matice tuhosti K |
|-------------------------|--|------------------------|
| Prostorový rám | $u, v, w, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ | 12 |
| Rovinný rám | u, w, φ_y | 6 |
| Prostorová příhradovina | u, v, w | 6 |
| Rovinná příhradovina | u, w | 4 |
| Rošt | w, φ_x, φ_y | 6 |

Tab. 2-1: Uzlové deformace dle konstrukce

Řešení MKP nám poskytuje pouze sekundární účinky, díky staticky ekvivalentním zatížením v uzlech. Přidáním primárních účinků, účinkům na oboustranně vetknutém zatíženém prutu, dostaneme přesné řešení. Díky volbě funkcí (2.9) je sekundární řešení přesné. V programech MKP jsou primární účinky pro řešení prutových konstrukcí zavedeny. Se zmenšováním délky prvků avšak příspěvek

primárních veličin klesá. Tato operace se u plošných nebo trojrozměrných prvků nevyskytuje, protože není možné obecně získat primární řešení.

2.2. Počítačové programy MKP

Jak je patrné z obr. 2-2, práce v programech MKP musí započít zadáním a zpracováním vstupních údajů. Této úvodní části se říká preprocesor, programový systém MKP je posuzován hlavně podle přehlednosti a výkonnosti preprocesoru a postprocesoru.

Preprocesor slouží k provedení následujících úkolů:

- Zadání požadavků na typ a způsob výpočtu
- Přiřazení materiálových vlastností
- Vytvoření sítě prvků
- Přiřazení okrajových podmínek uzlům
- Zadání zatížení, obvykle zadáno jako:
 - Zatížení uzlů, jako osamělé účinky působící přímo na uzel
 - Zatížení prvků, jako zatížení působící podél stran prvků nebo uvnitř prvků
- Kontrola vstupních údajů a zajištění upozornění na chyby

Po provedení řešení (kroky 2, 3 a 4 na obr. 2-2) následuje práce postprocesoru.

Postprocesor má za úkol zpracování, výstup a uchování výsledků. Při řešení úloh ze statiky a dynamiky se výsledky rozumí pole deformací a napětí. Postprocesor pak poskytuje výsledky jako:

- a) **Deformace** – výpis hodnot složek deformace v uzlech, znázornění deformované sítě prvků
- b) **Vnitřní síly a napětí** – výpis průřezových veličiny (výslednice vnitřních sil), složky napětí, velikosti a směry hlavních napětí. Výpis v uzlech nebo vybraných místech na konstrukci. Grafické znázornění izočár a izoploch. [1]

2.2.1. Program Scia Engineer

Jelikož je práce zpracována v programu Scia Engineer, zmíníme se v krátkosti o něm.

Založení společnosti Scia se datuje do roku 1974. Scia je zkratka z anglických slov Scientific Applications, neboli vědecké aplikace. Tehdy začínala vývojem programu ESA 2D, který sloužil k analýze konstrukcí. Inženýrský software Scia Engineer vznikl postupným vývojem a základ má v programech NEXIS32 a FEAT2000. V roce 2008 nastalo spojení s inženýrskou skupinou Nemetschek Group a přejmenování ze Scia na Nemetschek Scia. [3]

Scia Engineer provádí statické, dynamické, lineární, nelineární a stabilitní výpočty. K výpočtu využívá deformační variantu metody konečných prvků. Nepracuje však přímo s konečnými prvky, ale s prvky konstrukčními a síť konečných prvků potřebnou pro výpočty si generuje na pozadí. Scia Engineer je znám pro své dobré modelovací schopnosti a BIM (Building Information Modeling) neboli informační model budovy. Ten se dělí na dvě části, které dovolují definovat vztah mezi sebou navzájem:

- **Výpočtový model**, který obsahuje pouze veškerá data potřebná pro výpočet.
- **Konstrukční model**, který popisuje tvar jednotlivých prvků konstrukce, jejich polohu, úpravy a vlastnosti, které nejsou jinak obsaženy ve výpočtovém modelu.

Program Scia Engineer umožňuje modelaci nosníků rovných, zakřivených, s náběhy, disponuje obsáhlou knihovnou profilů (HEA, IPE, ...). Rovinné i zakřivené plochy s proměnnou tloušťkou i otvory. Zatížení lze zadávat přímo do uzlů, na pruty, plochy nebo použít generátor zatížení sněhem a větrem, akumulaci vody, zatížení zeminou a další. Ve výpočtu lze zohlednit fáze výstavby, vzpěr konstrukce, nelinearitu materiálu, pohyblivé zatížení a další. Celkové možnosti programu jsou velmi obsáhlé a toto je jen výčet jeho vlastností. Velkou výhodou je kompatibilita se systémy CAD a soubory DWG, DXF.

3. POPIS KONSTRUKCE

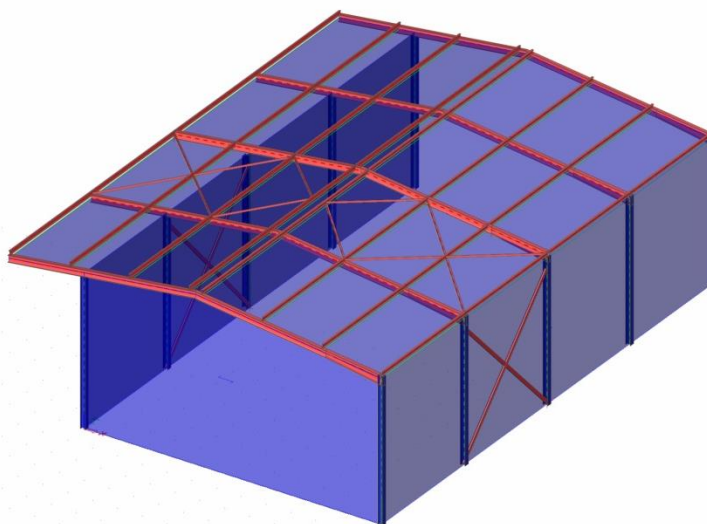
Objekt se nachází v obci Slatiňany na ulici Vítězství na katastrálních parcelách 322/16 a 322/17. Jedná se o ocelovou halu s dvěma částmi:

- a) Montážní a opravárenská část** (obr. 3-1) – ve které probíhají montážní a opravárenské práce na chladicích zařízeních. Drobná zámečnická činnost s použitím ruční mechanizace.

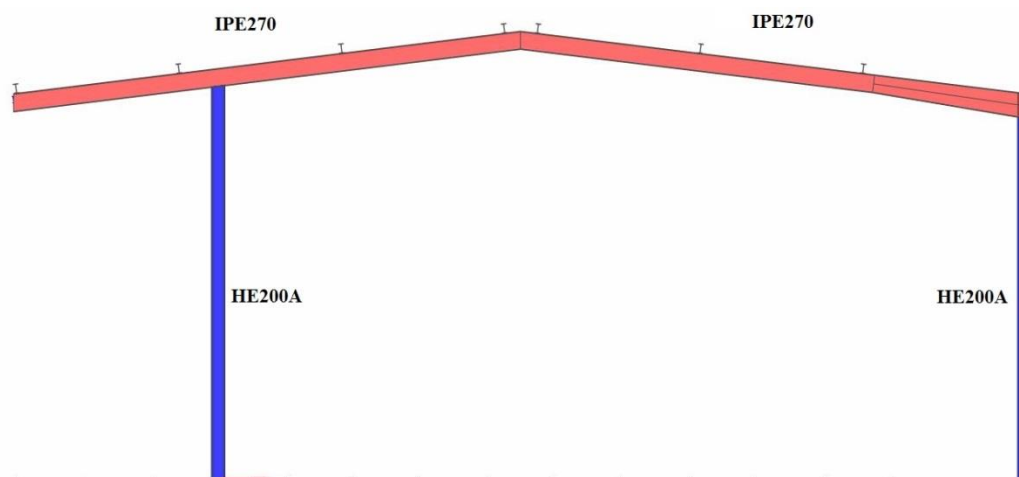
Hala je složená z 5 ocelových rámu v osových vzdálenostech 5 metrů. Pro sloupy je použit profil HE200A, pro příčle profil IPE270 na jedné straně s převisem a na druhé s náběhem, vaznice profilu IPE140. Střešní konstrukce je sedlová s oboustranným sklonem 7°. Konstrukce obsahuje ztužidla. Stěnová ztužidla z profilů UPE120 a střešní ztužidla z profilů L70x6. Ta však do výpočtu zahrnuta nejsou, protože ve výpočtu přenáší tlakové účinky, což má za následek zkreslení námi hledaných údajů.

Opláštění je provedeno ze stěnových panelů KINGSPAN KS1000 TF tloušťky 100 mm a střešních panelů KINGSPAN KS1000 RW tloušťky 100 mm,

- b) Administrativní část** – přilehlá k montážní a opravárenské části ze severní strany. Dvoupodlažní ocelová konstrukce, není v této práci řešena.



Obr. 3-1: Pohled na konstrukci



Obr. 3-2: Příčný řez konstrukcí

3.1. Materiálové charakteristiky

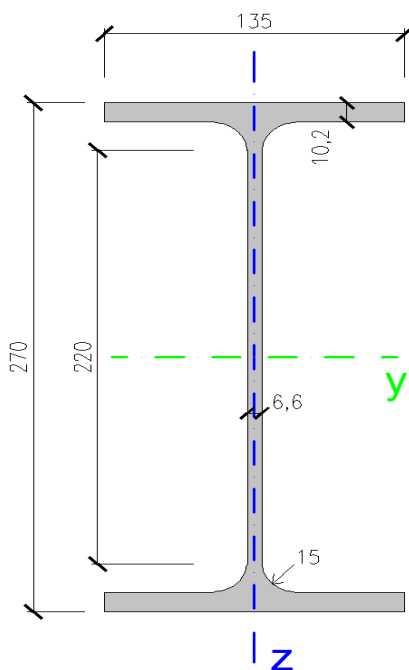
Sloupy HE200A a příčle IPE270 jsou vyrobeny oceli S235, jejíž materiálové charakteristiky jsou dle ČSN EN 1993-1-1 :

| Popis vlastnosti | Značka | Hodnota | Jednotka |
|--|----------|--------------------|-------------------|
| Mez kluzu | f_y | 235 | MPa |
| Mez pevnosti | f_u | 360 | MPa |
| Objemová hmotnost | ρ | 7850 | kg/m ³ |
| Modul pružnosti v tahu a tlaku | E | 210 | GPa |
| Modul pružnosti ve smyku | G | 81 | GPa |
| Součinitel příčné deformace v pružné oblasti | ν | 0,3 | - |
| Součinitel délkové tepelné roztažnosti | α | $12 \cdot 10^{-6}$ | K ⁻¹ |

Tab. 3-1: Materiálové charakteristiky

3.2. Použité průřezy a průřezové charakteristiky

1) **IPE270** - V konstrukci využity jako příčle o délce cca 7,6 m. Na levé straně s přesahem přes svíslou konstrukci 3 m, na pravé straně s náběhem v délce 2,25 m lineárně měnící se do výšky 370 mm.

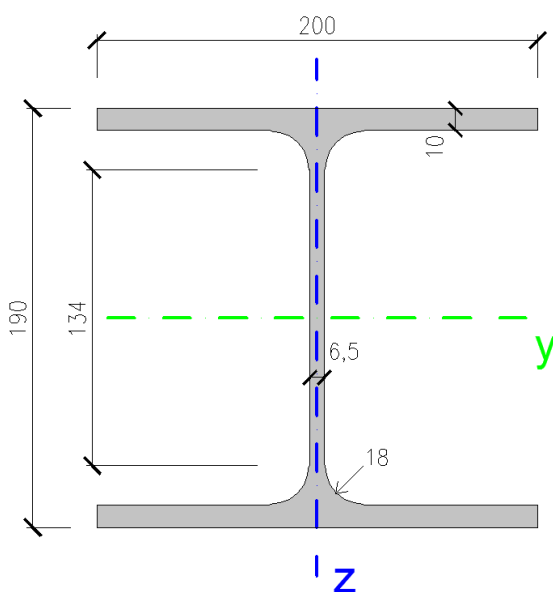


Obr. 3-4: Geometrie průřezu IPE270

| Značka | Hodnota | Jednotka |
|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| m | 36,1 | kg.m ⁻¹ |
| A | 4,59.10 ⁻³ | m ² |
| I_y | 5,79.10 ⁻⁵ | m ⁴ |
| I_z | 4,20.10 ⁻⁶ | m ⁴ |
| I_t | 1,59.10 ⁻⁷ | m ⁴ |
| I_ω | 7,06.10 ⁻⁸ | m ⁶ |
| i_y | 0,112 | m |
| i_z | 0,030 | m |
| W_{el,y} | 4,29.10 ⁻⁴ | m ³ |
| W_{el,z} | 5,22.10 ⁻⁵ | m ³ |
| W_{pl,y} | 4,84.10 ⁻⁴ | m ³ |
| W_{pl,z} | 9,70.10 ⁻⁵ | m ³ |

Tab. 3-2: Geometrické průřezové charakteristiky

2) **HE200A** – V konstrukci využity jako sloupy o délkách 5,6 m a 6 m.



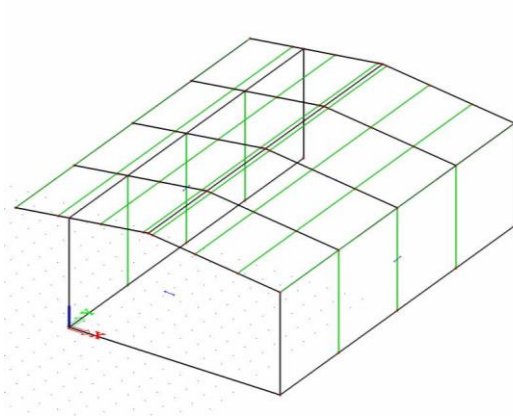
Obr. 3-5: Geometrie průřezu HE200A

| Značka | Hodnota | Jednotka |
|-------------------------|------------------------|--------------------|
| m | 42,3 | kg.m ⁻¹ |
| A | 5,383.10 ⁻³ | m ² |
| I_y | 3,69.10 ⁻⁵ | m ⁴ |
| I_z | 1,34.10 ⁻⁵ | m ⁴ |
| I_t | 2,10.10 ⁻⁷ | m ⁴ |
| I_ω | 1,08.10 ⁻⁷ | m ⁶ |
| i_y | 0,083 | m |
| i_z | 0,050 | m |
| W_{el,y} | 3,89.10 ⁻⁴ | m ³ |
| W_{el,z} | 1,34.10 ⁻⁴ | m ³ |
| W_{pl,y} | 4,30.10 ⁻⁴ | m ³ |
| W_{pl,z} | 2,04.10 ⁻⁴ | m ³ |

Tab. 3-3: Geometrické průřezové charakteristiky

4. ZATĚŽOVACÍ STAVY A VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ SÍLY - LINEÁRNÍ VARIANTA

4.1. Vlastní tíha rámu a příčlí

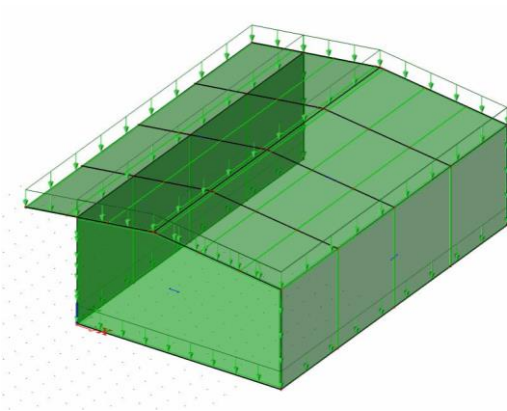


Obr. 4-1: Vlastní tíha

Vlastní tíha je generována automaticky programem Scia Engineer.

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Tíha: Sloupy HE200A | 0,423 kNm ⁻¹ |
| Příčle IPE270 | 0,361 kNm ⁻¹ |
| Vaznice IPE140 | 0,129 kNm ⁻¹ |

4.2. Ostatní stálé zatížení



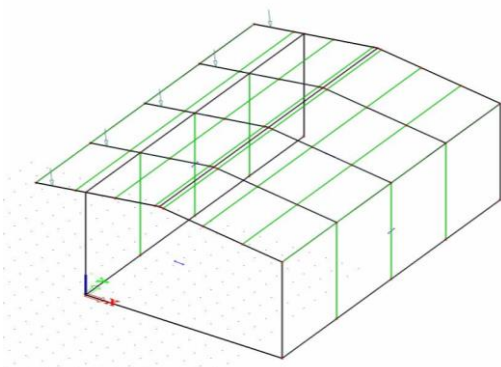
Obr. 4-2: Ostatní stálé

Jako ostatní stálé zatížení je uvažováno opláštění stěnovými a střešními panely KINGSPAN. V programu Scia Engineer je modelováno jako volné plošné zatížení na zatěžovacích panelech.

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| Tíha: Střešní panely | 0,423 kNm ⁻² |
| Stěnové panely | 0,361 kNm ⁻² |

4.3. Proměnné zatížení

4.3.1. Osamělé jednotkové břemeno

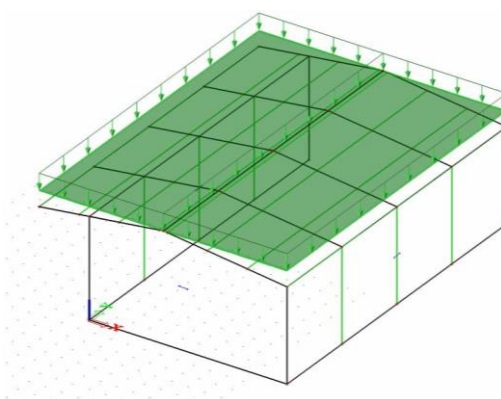


Obr. 4-3: Osamělé jednotkové břemeno

Osamělé jednotkové břemeno lze chápat jako osobu jdoucí po střešní konstrukci. Jednotkové břemeno je namodelováno v programu Scia Engineer jako pohyblivé zatížení, kde jednotlivé dopravní pruhy tvoří osy příčlí.

Tíha: Jednotkové břemeno 1 kN

4.3.2. Zatížení sněhem



Obr. 4-4: Zatížení sněhem

Zatížení sněhem počítáno dle normy ČSN EN 1991-1-3. Konstrukce se nachází ve sněhové oblasti I, tedy charakteristické zatížení sněhem na zemi $s_k = 0,7 \text{ kNm}^{-2}$.

Pro střechy se sklonem $0^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ je použit tvarový součinitel $\mu = 0,8$.

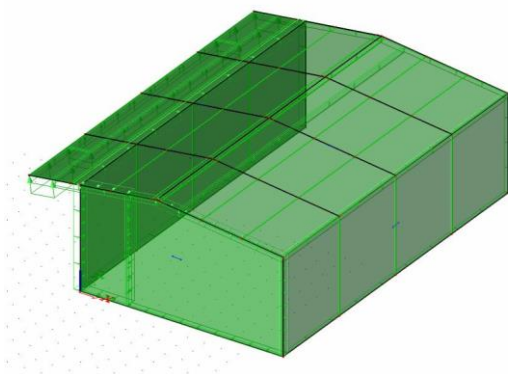
V programu Scia Engineer je modelováno jako volné plošné zatížení na zatěžovacích panelech.

Tíha: Zatížení sněhem na střeše s $0,56 \text{ kNm}^{-2}$

Jsou uvažovány 3 zatěžovací stavy:

- **Případ I** – Zatížení působí po celé ploše střešní konstrukce v plné hodnotě,
- **Případ II** – Vítr navátý zprava. Zatížení působí na levé polovině střešní konstrukce násobené hodnotou 0,5 a na pravé polovině v plné hodnotě,
- **Případ III** – Vítr navátý zleva. Zatížení působí na levé polovině střešní konstrukce v plné hodnotě a na pravé polovině násobené hodnotou 0,5. [4]

4.3.3. Zatížení větrem



Obr. 4-5: Zatížení větrem

Zatížení sněhem počítáno dle normy ČSN EN 1991-1-4. Konstrukce se nachází ve větrové oblasti III, tedy základní rychlost větru $v_b = 27,5 \text{ ms}^{-1}$.

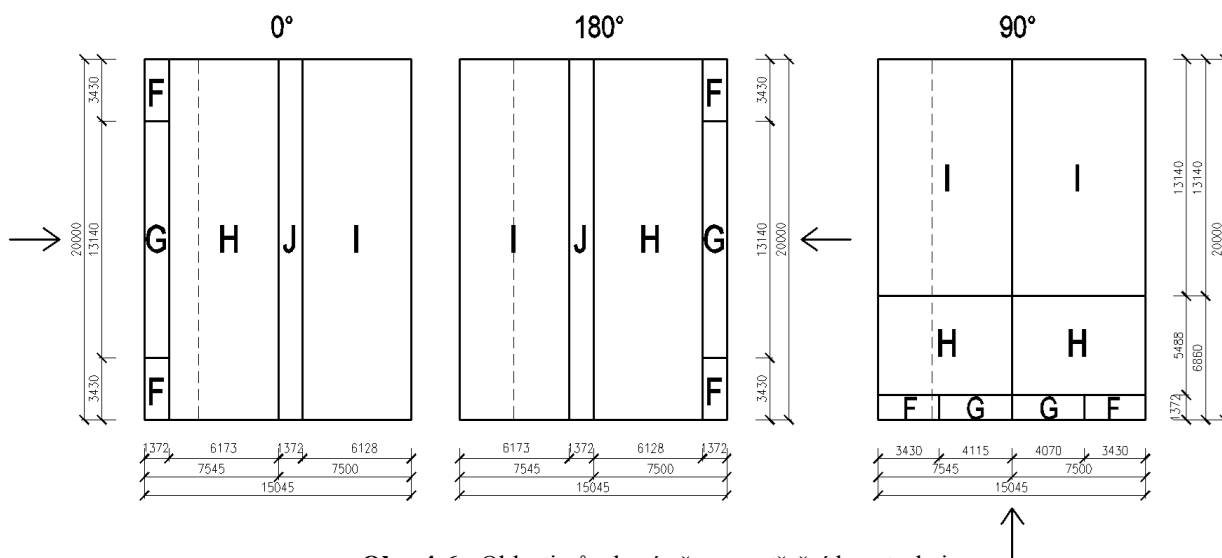
Kategorii terénu uvažují II, oblast s nízkou vegetací, protože se konstrukce nachází na okraji obce.

V programu Scia Engineer je modelováno jako volné plošné zatížení na zatěžovacích panelech.

Tíha: viz tab. 4-1

Jsou uvažovány 3 zatěžovací stavy:

- Směr $\theta = 0^\circ$ – Vítr vane zleva, způsobuje na konstrukci tlak i sání,
- Směr $\theta = 90^\circ$ – Vítr vane podél konstrukce, způsobuje pouze sání,
- Směr $\theta = 180^\circ$ – Vítr vane zprava, způsobuje na konstrukci tlak i sání.



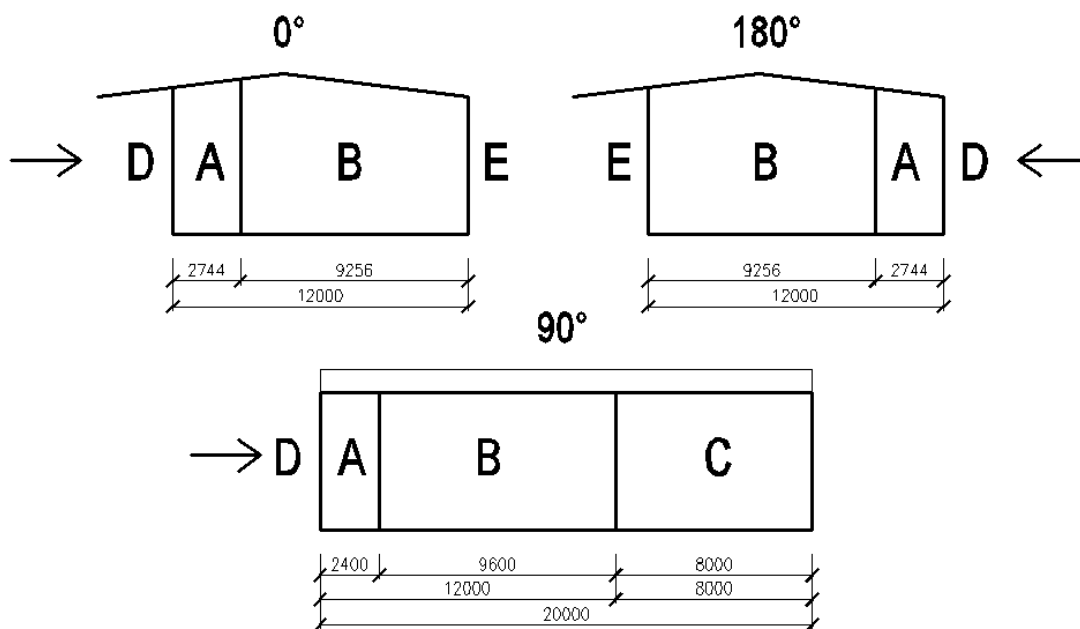
Obr. 4-6: Oblasti působení větru na střešní konstrukci

Směr $\theta = 270^\circ$ neuvažujeme, z důvodu napojení na administrativní budovu, která je vyšší. Pro směry $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 180^\circ$ uvažujeme čtyři případy, ve kterých největší (kladné, tlak) a nejmenší (záporné, sání) hodnoty ze všech oblastí F, G, H jsou kombinovány s největšími a nejmenšími hodnotami oblastí I a J. [5]

Tabulka výsledných silových účinků větru na povrch konstrukce $w_e(z_e)$ [kNm^{-2}]:

| Směr/Oblast | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0° | -1,2 | -0,8 | - | - | -0,39 | -1,82 | -1,12 | -0,54 | -0,56 | -0,68 |
| | - | - | - | +0,74 | - | +0,04 | +0,04 | +0,04 | - | +0,16 |
| 90° | -1,2 | -0,8 | -0,5 | - | - | -1,75 | -1,48 | -0,68 | -0,5 | - |
| | - | - | - | +0,71 | - | - | - | - | - | - |
| 180° | -1,2 | -0,8 | - | - | -0,39 | -1,82 | -1,12 | -0,54 | -0,56 | -0,68 |
| | - | - | - | +0,74 | - | +0,04 | +0,04 | +0,04 | - | +0,16 |

Tab. 4-1: Výsledné silové účinky větru



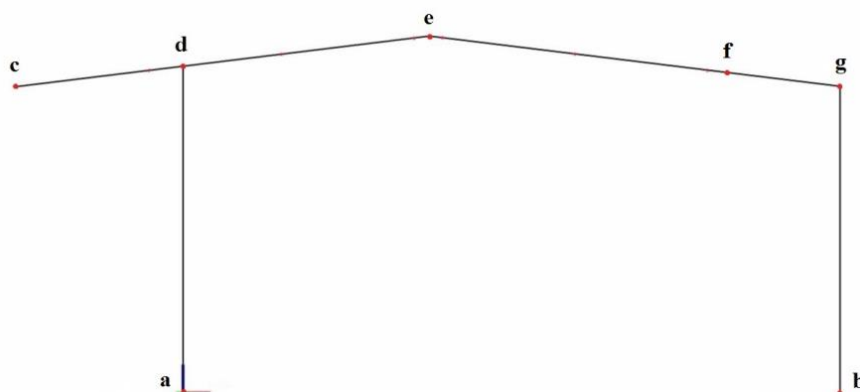
Obr. 4-7: Oblasti působení větru na svislé plochy

4.4. Výsledné vnitřní síly

Vnitřní síly působící uvnitř tělesa, vznikají jako důsledek vnějšího zatížení a reakcí. Vnitřní síly tvoří výslednice napětí na průřezu, idealizované do těžiště průřezu. Mezi vnitřní síly patří:

- **Normálová síla N** – působící ve střednici průřezu, $N = \int_A \sigma dA$
- **Posouvající síla V_z** – působící kolmo na střednici průřezu, $V = \int_A \tau dA$
- **Ohybový moment M_y** – působící na rameni z . $M = \int_A z \sigma dA$

Vnitřní síly jsou počítány programem Scia Engineer. Hodnoty vypsány pro prostřední rám s maximálními průběhy vnitřních sil. Zkoumané pruty jsou mezi místem podpor (a, b), volným koncem (c), styčníky (d, e, g) a začátkem náběhu (f), viz obr. 4-7. Průběhy vypočítány jako obálková kombinace všech zatěžovacích stavů, které mohou vzájemně nastat, a zapsány do tabulky 4-2.



Obr. 4-8: Zkoumané pruty konstrukce

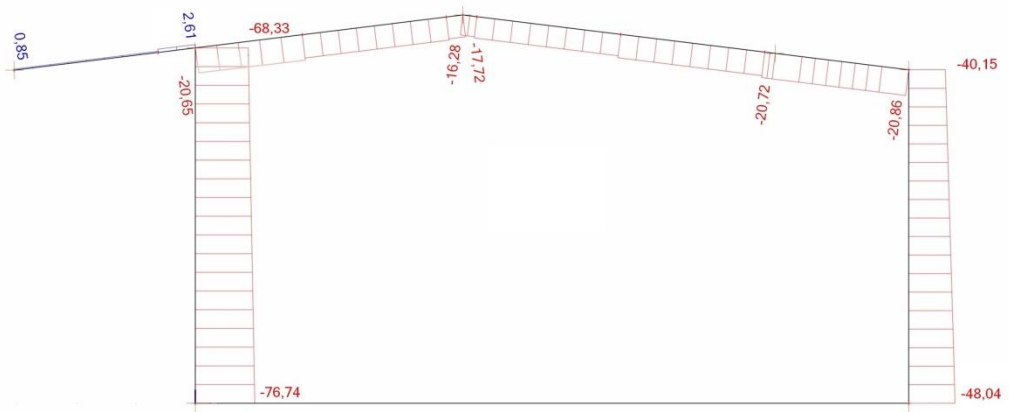
| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|-------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| N [kN] | -76,74 | -48,04 | 2,69 | -20,65 | -20,72 | -20,86 |
| V_z [kN] | 35,10 | -33,92 | 30,29 | 39,23 | 31,13 | 32,66 |
| M_y [kNm] | 76,43 | 72,30 | 50,18 | -95,94 | 57,14 | -70,27 |

Tab. 4-2: Obálkové vnitřní síly

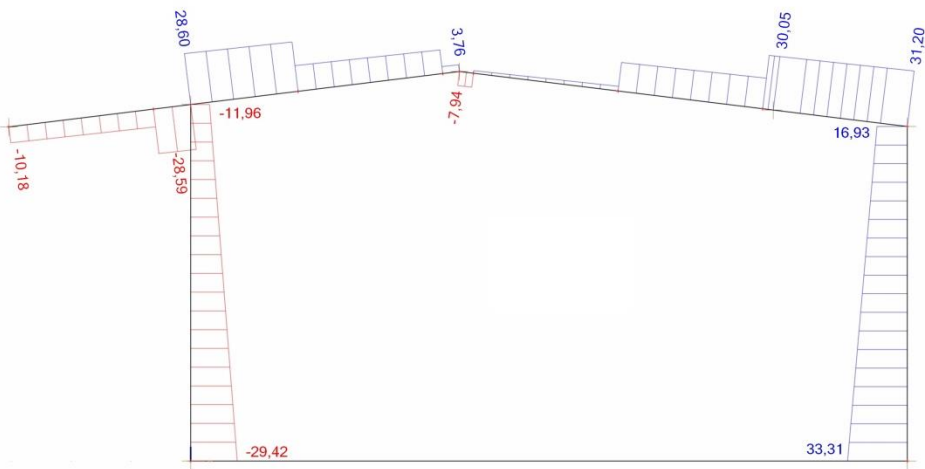
Pro výsledné porovnání a další výpočty však potřebujeme pouze maximální normálové síly tlačných prutů, protože pouze u nich lze aplikovat vliv imperfekcí a teorie 2. řádu. V tab. 4-3 jsou uvedeny maximální tlakové hodnoty normálových sil N , jim odpovídající posouvající síly V_z a ohybové momenty M_y . Pro levý sloup je hlavní jiná kombinace zatížení než pro pravý sloup, na obr. 4-9 až 4-11 jsou uvedeny jejich zkombinované hodnoty N a jim odpovídající hodnoty V_z a M_y .

| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N [kN] | -76,74 | -48,04 | 2,61 | -20,65 | -20,72 | -20,86 |
| V_z [kN] | -29,42 | 33,31 | -28,59 | 28,60 | 30,05 | 31,20 |
| M_y [kNm] | 70,44 | 71,03 | -42,91 | 46,11 | 48,18 | -70,27 |

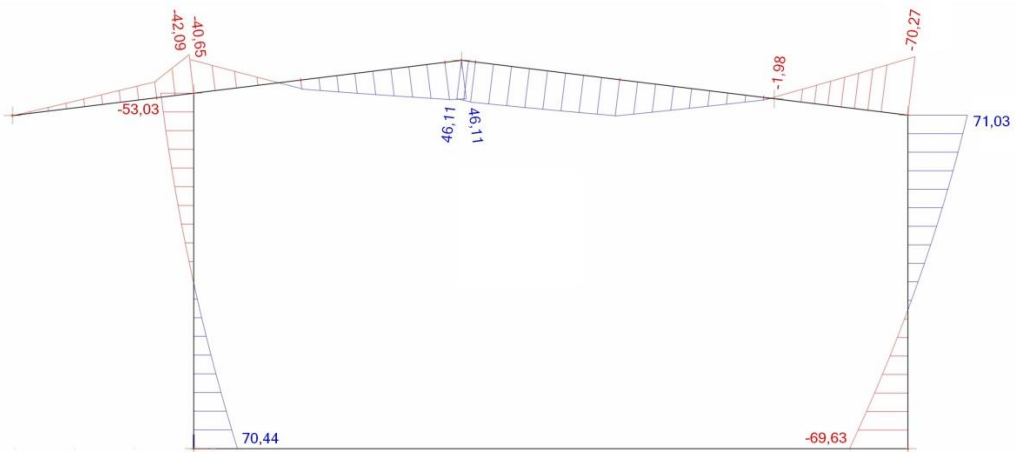
Tab. 4-3: Ekvivalentní vnitřní síly



Obr. 4-9: Normálové síly N



Obr. 4-10: Posouvající síly V_z



Obr. 4-11: Ohybové momenty M_y

5. NELINEÁRNÍ VARIANTA

V další části zahrneme do konstrukce vliv nelinearit, tedy vliv imperfekcí a vliv teorie 2. řádu. To bude mít za následek vznik druhotných momentů a snížení únosnosti konstrukce.

5.1. Vliv imperfekcí

Skutečné pruty vyrobené průmyslově se od prutů ideálních liší řadou výrobních odchylek a nedokonalostí (imperfekcí), které ovlivňují jejich únosnost. Ty lze rozdělit:

- **Geometrické imperfekce** – mezi které lze zařadit nepřesnost tvaru průřezu, odchylka zakřivení osy prutu, excentricita působení zatížení.
- **Strukturální imperfekce** – mezi které patří hlavně vlastní pnutí v nezátíženém prutu, vzniklé při svařování nebo chladnutí.
- **Konstrukční imperfekce** – mezi které patří nedokonale fungující klouby nebo vetknutí konstrukce, čímž se působení konstrukce liší od modelu.

U prutů se mohou vyskytnout všechny zmíněné imperfekce, které snižují únosnost. Všechny imperfekce se pak podle normy ČSN EN 1993-1-1 převádí na jedinou geometrickou imperfekci. Výpočet této imperfekce je důležitým bodem v postupu výpočtu mezního stavu únosnosti, kdy je v jednom místě prutu dosaženo meze kluzu f_y .

5.1.2. Vliv geometrických imperfekcí

Předpokládá se, že byl prut vyroben ve tvaru afinním budoucímu vybočení, s počáteční výchylkou uprostřed rozpětí, značenou e_0 . V libovolném bodě vzdáleném z od podpory pak platí:

$$x_0 = e_0 \sin \frac{\pi z}{L} \quad (5.1)$$

Při zatížení normálovou silou N a zahrnutí okrajových podmínek pak bude poloha kteréhokoliv bodu dána rovnicí:

$$x = \frac{e_0}{\frac{N_{cr}-1}{N}} \sin \frac{\pi z}{L} \quad (5.2)$$

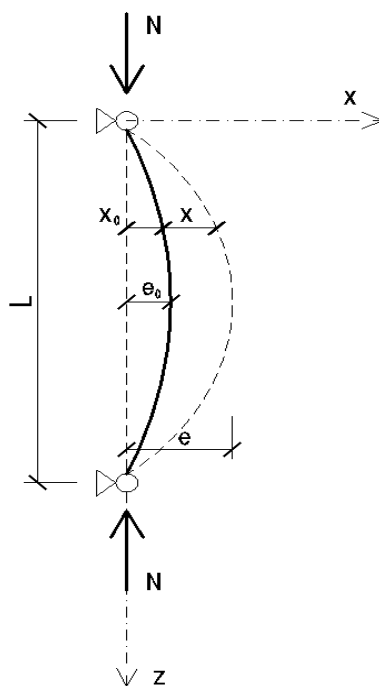
kde N_{cr} je kritická síla ideálního prutu pro vybočení, spočítaná jako:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (5.3)$$

L_{cr} je vzpěrná délka a liší se podle typu uložení. Pro vzdálenost $z = \frac{L}{2}$ je tedy výchylka:

$$e = e_0 + \frac{e_0}{\frac{N_{cr}}{N} - 1} = \frac{e_0}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (5.4)$$

Z rovnice (5.4) vyplývá, že se vzrůstem síly N se excentricita e zvětšuje a pro $N = N_{cr}$ se v limitě rovná nekonečnu.



Obr. 5-1: Počátečně zakřivený prut

Mezního stavu únosnosti, podobně jako u prutů namáhaných tahem, bude dosaženo, když napětí uprostřed prutu, kde se sečtou napětí od tlaku a od ohybu, bude rovno mezi kluzu:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{N}{A} + \frac{eN}{W} = f_y \quad (5.5)$$

Zavedeme-li poté poměrnou štíhlost:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (5.6)$$

Lze poté vypočítat součinitel vzpěrnosti χ , který vyjadřuje zmenšení únosnosti prutu, jako:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{podmínka: } \chi \leq 1 \quad (5.7)$$

$$\text{kde } \phi = 0,5[1 + \alpha_1(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (5.8)$$

Součinitel imperfekce α nabývá hodnot od 0,21 do 0,76 a je definován čtyřmi křivkami vzpěrnosti pro různé typy průřezů podle velikosti a vlastního pnutí průřezu. Tyto hodnoty jsou ověřeny na základě zkoušek skutečných prutů. Nejnižší vlastní pnutí vykazují kruhové průřezy, největší naopak průřezy s tlustými pásnicemi.

5.1.3. Imperfekce prutových soustav

V předcházející části se řešil vliv imperfekcí pouze na izolovaný prut. Je však potřeba uvažovat při výpočtu rámové konstrukce s globálními a lokálními imperfekcemi. Postupuje se podle normy ČSN EN 1993-1-1 kapitoly 5.2.2 Stabilita prutových konstrukcí, bod (3), kde je řečeno, že podle druhu konstrukce a globální analýzy se mají účinky druhého řádu a imperfekcí stanovit podle jedné z následujících metod:

- a) Obojí pomocí globální analýzy;
- b) Částečně pomocí globální analýzy a částečně pomocí posouzení jednotlivých prutů podle kapitoly 6.3 v normě;
- c) Pro základní případy posouzení jednotlivých ekvivalentních prutů podle kapitoly 6.3 v normě, s použitím vhodných vzpěrných délek, stanovených podle tvaru globálního vybočení konstrukce.

Norma v kapitole 5.2.2, bod (7) též říká, že v souladu s bodem (3) se stabilita jednotlivých prutů má posoudit následovně:

- a) Jestliže byly účinky druhého řádu u jednotlivých prutů a příslušné imperfekce prutů, viz kapitola 5.3.4 v normě, zahrnuty do globální analýzy konstrukce, není individuální posouzení stability těchto prutů potřebné;
- b) Jestliže účinky druhého řádu v jednotlivých prutech nebo určité jednotlivé imperfekce prutů (například imperfekce při rovinném vzpěru a/nebo při klopení, viz kapitola 5.3.4 v normě) nebyly zcela zahrnuty do globální analýzy, má se provést individuální posouzení stability prutů podle příslušných podmínek v kapitole 6.3 v normě pro účinky nezahrnuté do globální analýzy. Při tomto ověření se mají uvažovat koncové momenty

a síly z globální analýzy konstrukce, zahrnující významné globální účinky druhého řádu a globální imperfekce, viz kapitola 5.3.2 v normě, přičemž vzpěrné délky se mohou brát rovné systémovým délkám. [6]

Bod a) říká, že lze řešit imperfektní konstrukci teorií druhého řádu. Pruty se následně posuzují pouze pevnostně, problémy stability se již neposuzují.

5.1.4. Imperfekce pro globální analýzu prutových konstrukcí

Norma říká, že předpokládaný tvar globálních a lokálních imperfekcí se může určit podle tvaru vybočení konstrukce v pružném stavu. Pro konstrukce citlivé na vybočení se má účinek imperfekce vyjádřit pomocí počátečního naklonění konstrukce a prohnutí jednotlivých prutů. Tyto imperfekce se vypočítají:

a) Imperfekce ve tvaru celkového počátečního naklonění konstrukce

Imperfekce vyjádřená natočením ϕ (viz obr. 5-2). Velikost natočení se spočítá podle vztahu:

$$\phi = \phi_0 \alpha_m \alpha_h \quad (5.9)$$

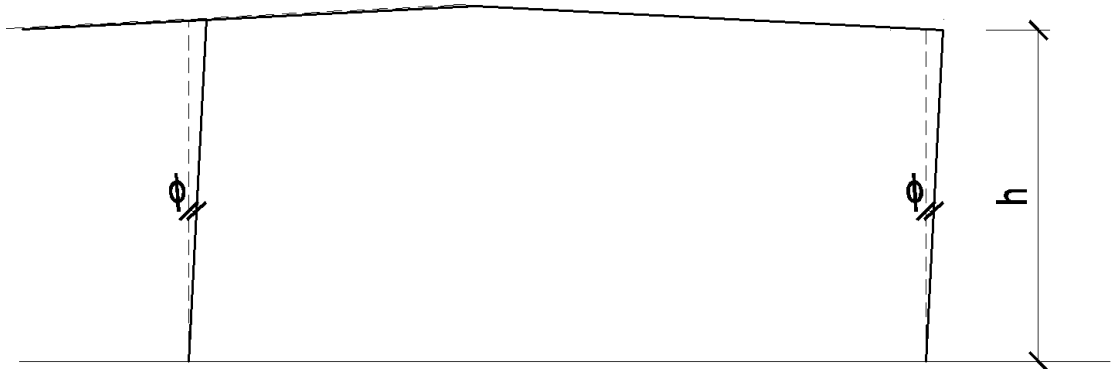
$$\text{kde } \phi_0 = \frac{1}{200} \quad (5.10)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{podmínka: } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (5.11)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad \text{podmínka: } \alpha_m \leq 1 \quad (5.12)$$

Jako α_h je označen redukční součinitel v závislosti na výšce sloupů. V našem případě jsou výšky sloupů $h_l = 6$ m a $h_p = 5,6$ m. Součinitel α_m vyjadřuje redukci pro počet sloupů v řadě, kde m je počet sloupů v řadě, u nichž není svislé zatížení N_{Ed} menší než 50 % průměrného zatížení sloupů v rovině. V našem případě $m = 2$, poté vychází součinitel $\alpha_m = 0,866$.

Tyto účinky se mohou pro prutové konstrukce pozemních staveb zanedbat, jestliže $H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}$, což konstrukce splňuje. Avšak je s těmito imperfekcemi potřeba počítat při výpočtu účinků druhého řádu.



Obr. 5-2: Imperfekce ve tvaru počátečního naklonění soustavy

b) Imperfekce ve tvaru počátečního místního prohnutí prutu

Vyjadřuje zakřivený prutu s maximální excentricitou, poměrem e_0 / L (viz obr. 5-1), hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 5-1:

| Křivka vzpěrné pevnosti | Pružnostní analýza | Plasticitní analýza |
|-------------------------|--------------------|---------------------|
| | e_0 / L | |
| a₀ | 1/350 | 1/300 |
| a | 1/300 | 1/250 |
| b | 1/250 | 1/200 |
| c | 1/200 | 1/150 |
| d | 1/150 | 1/100 |

Tab. 5-1: Hodnoty počátečního místního prohnutí prutu

Je vhodné podotknout, že v případech, kdy je to pro výpočet vhodné (například pro ruční výpočet) lze nahradit celkové počáteční naklonění a počáteční místní prohnutí působením ekvivalentních vodorovných sil na původní soustavě.

Norma říká, že jako alternativu k předchozím krokům, kdy zadáme imperfekce od počátečního naklonění konstrukce a od počátečního místního prohnutí prutu, je možné jako jednu společnou globální a lokální imperfekci použít kritický tvar vybočení konstrukce v pružném stavu η_{cr} . Amplitudu této imperfekce je možné stanovit z výrazu:

$$\eta_{init} = e_0 \frac{N_{cr}}{EI|\eta_{cr}|_{max}} \eta_{cr} = \frac{e_0}{\bar{\lambda}^2} \frac{N_{Rk}}{EI|\eta_{cr}|_{max}} \eta_{cr} \quad (5.13)$$

$$\text{kde } e_0 = \alpha_1 (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2}{1 - \chi \bar{\lambda}^2} \quad \text{podmínka: } \bar{\lambda} \geq 0,2 \quad (5.14)$$

| | |
|---|---|
| $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}$ | je poměrná štíhlost konstrukce |
| α_l | je imperfekce pro příslušnou křivku vzpěrné pevnosti; |
| χ | součinitel vzpěrnosti pro příslušnou křivku vzpěrné pevnosti; |
| $\alpha_{ult,k}$ | nejmenší násobitel soustavy osových sil N_{Ed} v prutech pro dosažení charakteristické únosnosti N_{Rk} v nejvíce osově namáhaném průřezu bez uvážení vzpěru; |
| α_{cr} | nejmenší násobitel soustavy osových sil N_{Ed} v prutech pro dosažení kritického vybočení v pružném stavu; |
| M_{Rk} | charakteristická únosnost rozhodujícího průřezu v ohybu, například $M_{el,Rk}$ nebo $M_{pl,Rk}$; |
| N_{Rk} | charakteristická únosnost rozhodujícího průřezu při působení osově síly $N_{pl,Rk}$; |
| $EI \eta'' _{max}$ | je ohybový moment vyvolaný imperfekcí η_{cr} v rozhodujícím průřezu; |
| η_{cr} | tvar kritického vybočení konstrukce v pružném stavu. |

5.2. Výpočet s teorií 2. řádu

Výpočty tlačných prvků s použitím vzpěrných délek umožňují, aby se jednotlivé prvky posuzovaly samostatně. To ale může vézt vzhledem u složitějších konstrukcí k výrazným nepřesnostem. Tyto nepřesnosti lze odstranit výpočtem podle teorie 2. řádu, kde se posuzuje konstrukce jako celek se započtením vlivu deformací způsobených od zatížení. Pruty se posuzují z pevnostního hlediska, ale musí se posuzovat konstrukce se všemi imperfekcemi, což výpočet komplikuje. [7]

Protože konstrukce není symetrická, provedou se dva nezávislé výpočty pro levý sloup (ve výpočtech bude značen malým indexem l) a pro pravý sloup (ve výpočtech bude značen malým indexem p). Pro každý sloup vyvozuje maximální normálové síly N_{Ed} a jím odpovídající ohybové momenty M_{Ed} jiná kombinace zatížení, neplatí princip superpozice jako u lineárního výpočtu. Po výpočtu obou variant budou vybrány maximální hodnoty.

5.2.1. Výpočet pro levý sloup

Nejdříve určíme imperfekce ve tvaru celkového počátečního naklonění. Výška slouhu $h_l = 5,6$ m, $\alpha_m = 0,866$ jak jsme vypočítali již v předešlých krocích.

$$\phi_l = \phi_0 \alpha_m \alpha_{h,l} = \frac{1}{200} * 0,866 * 0,845 = \frac{1}{273}$$

$$\alpha_{h,l} = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{5,6}} = 0,845$$

Do výpočtu v programu Scia Engineer je zavedeno do nelineární kombinace jako celková imperfekce – jednoduchý náklon. Poměr 1/273 je potřeba převést na hodnotu posunu na běžný metr, tedy 3,66 mm/m.

Nyní určíme imperfekce ve tvaru počátečního místního prohnutí prutu e_0 / L podle křivky vzpěrné pevnosti. Pro profil HE200A je rozhodující křivka b, tedy poměr $e_0 / L = 1/250$. Do výpočtu v programu Scia Engineer zavedeno do nelineární kombinace jako imperfekce prutu – jednoduché zakřivení.

Dále se provedl stabilitní výpočet, který určil vlastní tvar vybočení a součinitel kritického zatížení k_{crit} , v našem případě vyšel $k_{crit,l} = 3,67$ pro 1. vlastní tvar konstrukce.

V programu Scia Engineer lze při vytváření nelineární kombinace zadat libovolný počet zatěžovacích stavů, které představují jednotlivé případy zdeformované konstrukce z tvarů získaných stabilitním výpočtem. V obou případech tedy kombinace zatěžovacích stavů vyvolující maximální normálovou sílu N . Výpočet hodnoty počáteční deformace konstrukce e_0 je potřeba vypočítat ručně.

Sloup HE200A:

$$N_{Ed,l} = 76,74 \text{ kN}$$

$$N_{Rk,l} = A f_y = 5380.235 = 1264,3 \text{ kN}$$

$$M_{Rk,l} = W_{pl,y} f_y = 429,5.235 = 100933 \text{ Nm} = 100,9 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{ult,k,l} = \frac{N_{Rk,l}}{N_{Ed,l}} = \frac{1264,3}{76,74} = 16,48$$

Příčel IPE270:

$$N_{Ed,l} = 20,65 \text{ kN}$$

$$N_{Rk,l} = A f_y = 4590.235 = 1078,7 \text{ kN}$$

$$M_{Rk,l} = W_{pl,y} f_y = 484.235 = 113740 \text{ Nm} = 113,7 \text{ kNm}$$

$$\alpha_{ult,k,l} = \frac{N_{Rk,l}}{N_{Ed,l}} = \frac{1078,7}{20,65} = 52,24 \quad \dots \text{ Nerozhoduje}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k,l}}{k_{crit,l}}} = \sqrt{\frac{16,48}{3,67}} = 2,12$$

$$e_0 = \alpha_1 (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2}{1 - \chi \bar{\lambda}^2} = 0,34(2,12 - 0,2) \frac{100,9 \cdot 10^6}{1264,3 \cdot 10^3} = \underline{52,10 \text{ mm}}$$

5.2.2. Výpočet pro pravý sloup

Výpočet obdobný jako v bodu 5.2.2. Nejdříve určíme imperfekce ve tvaru celkového počátečního naklonění. Výška slouhu $h_p = 6 \text{ m}$, $\alpha_m = 0,866$.

$$\phi_p = \phi_0 \alpha_m \alpha_{h,p} = \frac{1}{200} * 0,866 * 0,816 = \frac{1}{283}$$

$$\alpha_{h,p} = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{6}} = 0,816$$

Jednoduchý náklon je vyjádřen poměrem 1/283, tedy 3,53 mm/m.

Imperfekce ve tvaru počátečního místního prohnutí prutu $e_0 / L = 1/250$, zavedeno opět jako jednoduché zakřivení.

Opět se provedl stabilitní výpočet, který určil vlastní tvar vybočení a součinitel kritického zatížení $k_{crit,p} = 6,05$.

Sloup HE200A:

$$N_{Ed,p} = 48,04 \text{ kN}$$

Hodnoty $N_{Rk,p}$ a $M_{Rk,p}$ jsou stejné jako v bodě 5.2.1. pro levý sloup.

$$\alpha_{ult,k,p} = \frac{N_{Rk,p}}{N_{Ed,p}} = \frac{1264,3}{48,04} = 26,32$$

Příčel IPE270:

Příčel na pravé straně obsahuje náběh, který však zvětšuje N_{Rk} a M_{Rk} , proto se uvažuje pouze s konstantní částí příčle.

$$N_{Ed,p} = 20,72 \text{ kN}$$

Hodnoty $N_{Rk,p}$ a $M_{Rk,p}$ jsou stejné jako v bodě 5.2.1. pro levou příčel.

$$\alpha_{ult,k,p} = \frac{N_{Rk,l}}{N_{Ed,l}} = \frac{1078,7}{20,72} = 52,06 \quad \dots \text{ Nerozhoduje}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k,l}}{k_{crit,l}}} = \sqrt{\frac{26,32}{6,05}} = 2,09$$

$$e_0 = \alpha_1 (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2}{1 - \chi \bar{\lambda}^2} = 0,34(2,09 - 0,2) \frac{100,9 \cdot 10^6}{1264,3 \cdot 10^3} = \underline{51,28 \text{ mm}}$$

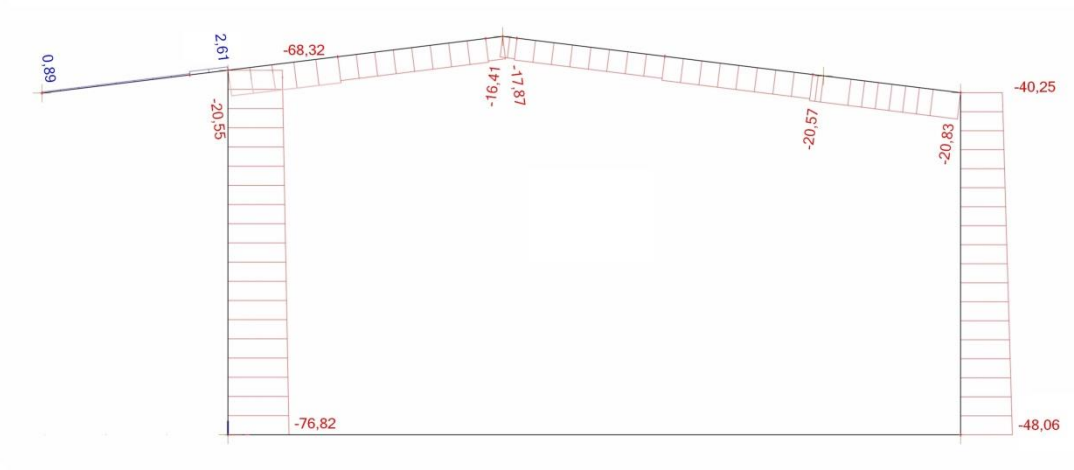
5.2.3. Výsledky vnitřních sil

Nyní se provedl výpočet druhým řádem, ze kterého se získaly vnitřní síly na konstrukci s uvážením imperfekcí. V programu Scia Engineer se v nelineární kombinaci celková imperfekce zadala tvarem vybočení, k tomu se nastavila odpovídající kombinace ze stabilitního výpočtu a jako maximální deformace se zadala vypočtená hodnota deformace konstrukce e_0 .

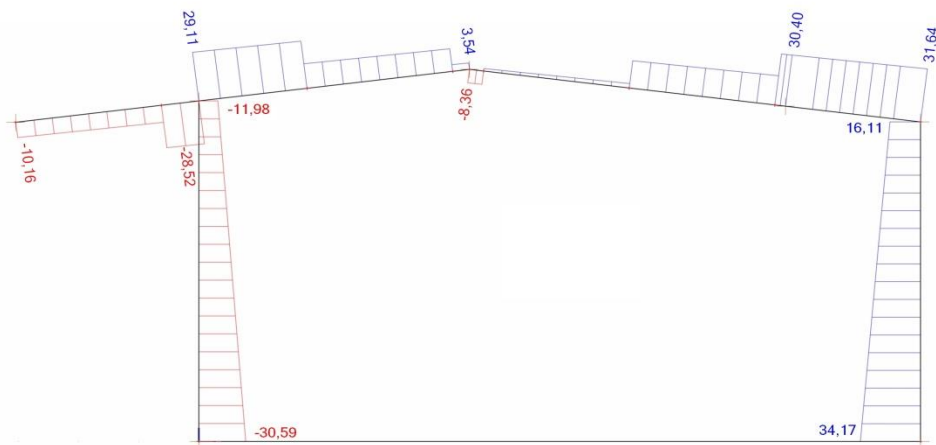
| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N [kN] | -76,82 | -48,06 | 2,61 | -20,55 | -20,57 | -20,83 |
| V_z [kN] | -30,59 | 34,17 | -28,52 | 29,11 | 30,40 | 31,64 |
| M_y [kNm] | 73,31 | 71,51 | -42,85 | 46,39 | 48,55 | -70,79 |

Tab. 5-2: Vnitřní síly s vlivem účinků 2. řádu

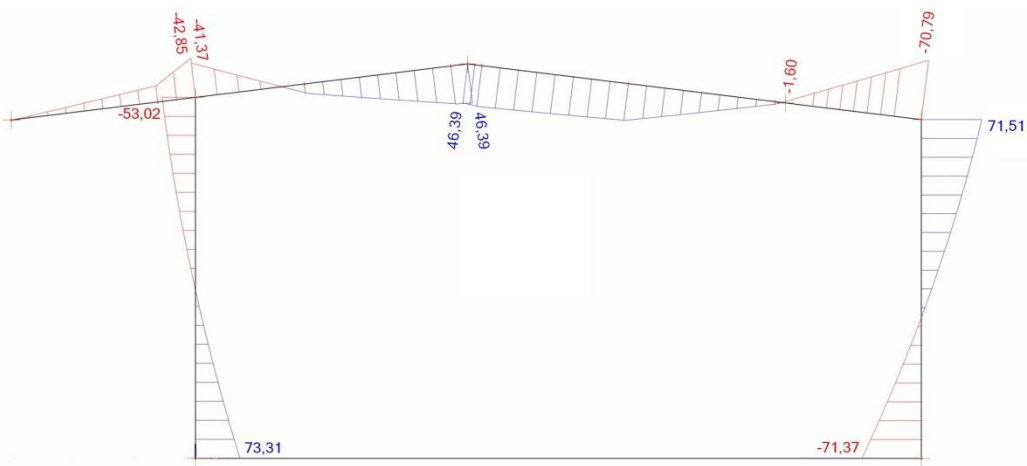
Stejně jako v případě lineárního výpočtu vnitřních sil platí, že jsou v tab. 5-2 uvedeny k normálovým silám N odpovídající posouvající síly V_z a ohybové momenty M_y . Na obr. 5-3 až 5-5 jsou poté tyto průběhy znázorněny graficky.



Obr. 5-3: Normálové síly N s účinkem 2. řádu



Obr. 5-4: Posouvající síly V_z s účinkem 2. řádu



Obr. 5-5: Ohybové momenty M_y s účinkem 2. Řádu

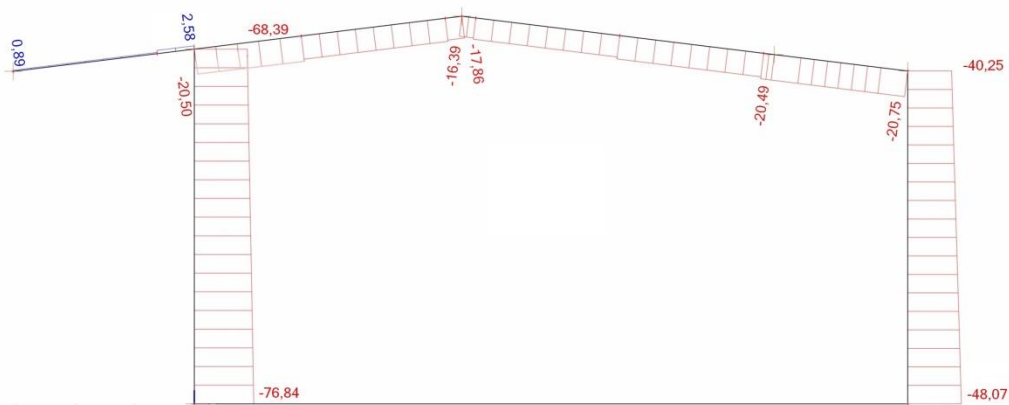
5.3. Analýza po analýze

Princip metody spočívá v tom, že konstrukci necháme zdeformovat stálým zatížením, v našem případě vlastní tíhou konstrukce. Na takto zdeformovanou konstrukci poté necháme působit zatížení vyvolující maximální normálové síly, jako v předešlých výpočtech.

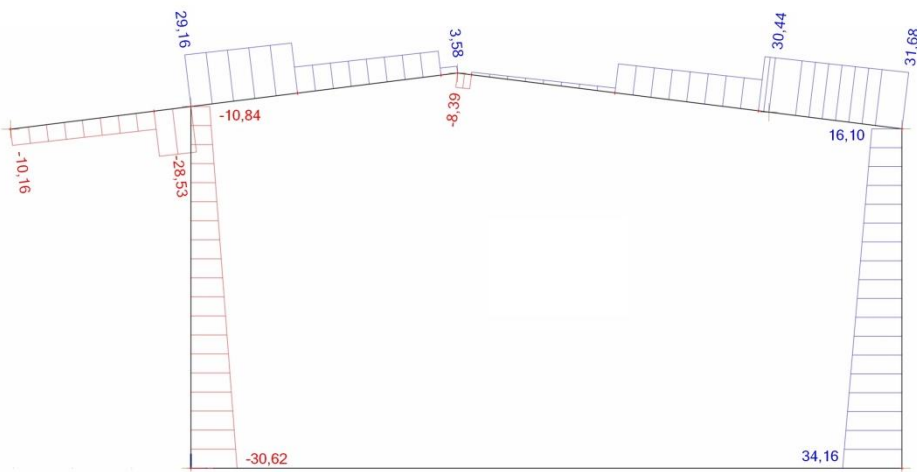
Výsledné hodnoty vnitřních sil jsou uvedeny v tab. 5-3 a průběhy znázorněny na obr. 5-6 až 5-8.

| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N [kN] | -76,84 | -48,07 | 2,58 | -20,50 | -20,49 | -20,75 |
| V _z [kN] | -30,62 | 34,16 | -28,53 | 29,16 | 30,44 | 31,68 |
| M _y [kNm] | 73,43 | 71,55 | -42,85 | 46,49 | 48,65 | -70,85 |

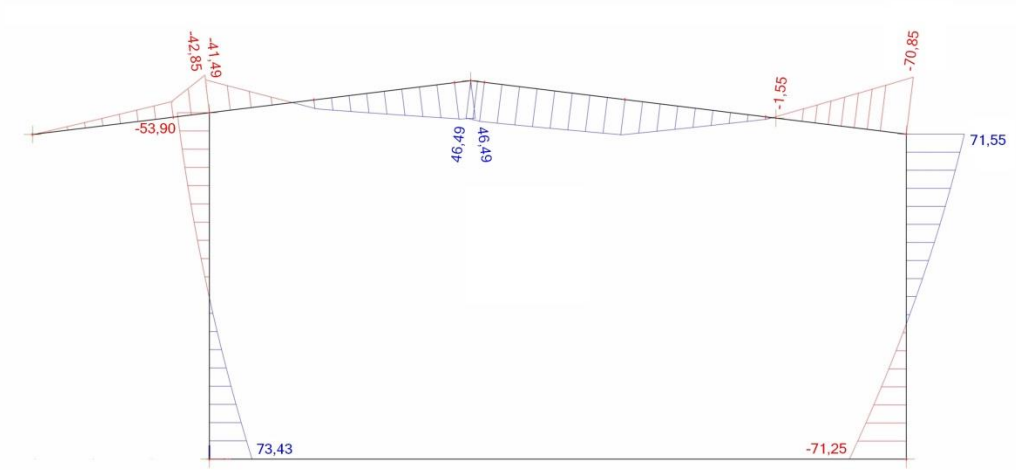
Tab. 5-3: Vnitřní síly z analýzy po analýze



Obr. 5-6: Normálové síly N z analýzy po analýze



Obr. 5-7: Posouvající síly V z analýzy po analýze



Obr. 5-5: Ohybové momenty M_y z analýzy po analýze

6. POSOUZENÍ KONSTRUKCE

Jak bylo napsáno v kapitole 5.1.3., norma ČSN EN 1993-1-1 říká, že při zahrnutí imperfekcí soustavy není potřeba posuzovat jednotlivé pruty z hlediska stabilitního, ale pouze z hlediska pevnostního. Dle této normy se i následně posuzuje.

Nejnepříznivější výsledné vnitřní síly vyvodila metoda analýzy po analýze, posouzení se provede tedy pro vnitřní síly vyvození touto metodou. Posuzuje se levý sloup, na který je vyvozován větší ohybový moment a normálová síla než na sloup pravý. Přičel se posoudí pravá ve dvou řezech, na délce konstantního průřezu a v místě náběhu.

6.1. Zatřívání průřezu

Profil HE200A spadá do první třídy průřezu pro výpočty ohybu, tlaku, kombinace tlaku a ohybu. Profil IPE270 spadá do první třídy průřezu pro výpočty ohybu, kombinace tlaku a ohybu, do druhé třídy průřezu pro výpočty tlaku.

První i druhá třída průřezu umožňují plastický výpočet, tedy počítání s hodnotami plastického modulu průřezu $W_{pl,y}$ a $W_{pl,z}$.

6.2. Posouzení na prostý ohyb

6.2.1. Posouzení sloupu na prostý ohyb

$$M_{Ed} = 73,43 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rk} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 101050 \text{ Nm} = 101,05 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \tag{6.1}$$

$$\frac{73,73}{101,05} = \underline{0,727} \leq 1,0 \quad \underline{\text{Splňuje}}$$

6.2.2. Posouzení příčle na prostý ohyb – konstantní část

$$M_{Ed} = 48,65 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rk} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,84 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 113740 \text{ Nm} = 113,74 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.2)$$

$$\frac{48,65}{113,74} = \underline{0,428} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.2.3. Posouzení příčle naprostý ohyb – náběh

$$M_{Ed} = 70,85 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rk} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7,31 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 171785 \text{ Nm} = 171,79 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.3)$$

$$\frac{70,85}{171,79} = \underline{0,412} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.3. Posouzení na prostý tlak

6.3.1. Posouzení sloupu na prostý tlak

$$N_{Ed} = 76,84 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5,38 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 1264300 \text{ N} = 1264,30 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.4)$$

$$\frac{76,84}{1264,30} = \underline{0,061} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.3.2. Posouzení příčle naprostý tlak – konstantní část

$$N_{Ed} = 20,49 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,59 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 1078650 \text{ N} = 1078,65 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

$$\frac{20,49}{1078,65} = \underline{0,019} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.3.3. Posouzení příčle naprostý tlak – náběh

$$N_{Ed} = 20,75 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5,26 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 1236100 \text{ N} = 1236,10 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.6)$$

$$\frac{20,75}{1236,10} = \underline{0,017} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.4. Posouzení kombinace prostého tlaku a prostého ohybu

6.4.1. Posouzení sloupu na kombinaci tlaku a ohybu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.7)$$

$$\frac{76,84}{1264,30} + \frac{73,43}{101,05} = \underline{0,788} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.4.2. Posouzení příčle na kombinaci tlaku a ohybu – konstantní část

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.8)$$

$$\frac{20,49}{1078,65} + \frac{48,65}{113,74} = \underline{0,447} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.4.3. Posouzení příčle na kombinaci tlaku a ohybu – náběh

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.9)$$

$$\frac{20,75}{1236,10} + \frac{70,85}{171,79} = \underline{0,429} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.5. Posouzení na smyk

6.5.1. Posouzení sloupu na smyk

$$V_{Ed} = 30,62 \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{1,805 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 244897 \text{ N} = 244,90 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
A_v &= A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f = \\
&= 5,38 \cdot 10^{-3} - 2,0 \cdot 2,0,01 + (0,0065 + 2,0,018)0,01 = 1,805 \cdot 10^{-3} \\
\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} &\leq 1,0 \tag{6.10} \\
\frac{30,62}{244,90} &= \underline{0,125} \leq 1,0 \quad \underline{\text{Splňuje}}
\end{aligned}$$

6.5.2. Posouzení příčle na smyk – konstantní část

$$\begin{aligned}
V_{Ed} &= 30,44 \text{ kN} \\
V_{c,Rd} &= V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2,21 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 299847 \text{ N} = 299,85 \text{ kN} \\
A_v &= A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f = \\
&= 4,59 \cdot 10^{-3} - 2,0,135 \cdot 0,0102 + (0,0066 + 2,0,015)0,0102 = 2,21 \cdot 10^{-3} \\
\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} &\leq 1,0 \tag{6.11} \\
\frac{30,44}{299,85} &= \underline{0,102} \leq 1,0 \quad \underline{\text{Splňuje}}
\end{aligned}$$

6.5.3. Posouzení příčle na smyk – náběh

$$\begin{aligned}
V_{Ed} &= 31,68 \text{ kN} \\
V_{c,Rd} &= V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{2,88 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 390751 \text{ N} = 390,75 \text{ kN} \\
A_v &= A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f = \\
&= 5,26 \cdot 10^{-3} - 2,0,135 \cdot 0,0102 + (0,0066 + 2,0,015)0,0102 = 2,88 \cdot 10^{-3} \\
\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} &\leq 1,0 \tag{6.12} \\
\frac{31,68}{390,75} &= \underline{0,081} \leq 1,0 \quad \underline{\text{Splňuje}}
\end{aligned}$$

Konstrukce vyhovuje na všechny pevnostní posudky pro výsledné vnitřní síly z nelineárního výpočtu. Norma říká, že pokud je únosnost ve smyku $V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$, nemusí se uvažovat kombinace smyku a ohybu.

6.6. Posouzení sloupu na vzpěrnou únosnost

Pro účely porovnání lineárního a nelineárního výpočtu, posoudíme konstrukci ještě stabilně s vnitřními silami z lineárního výpočtu. Smyk nebudeme uvažovat, protože není rozhodující. Pro posouzení vybereme pouze levý sloup, který vzhledem k celé konstrukci vykazuje nejnepříznivější účinky.

Kritické vzpěrné délky pro vybočení sloupu jsme zjistili z programu Scia Engineer jako rovné systémovým délkám, tedy:

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 6 \text{ m}$$

Pro profil HE200A k ose y je křivka vzpěrnosti b, k ose z je křivka vzpěrnosti c.

Je důležité upozornit, že v následujícím postupu nejsou zahrnuta ztužidla, i když je reálná konstrukce obsahuje. Vliv by na zkoumané konstrukci měly na vzpěrné délky na příčli, kterou však neposuzujeme. Na sloupech ztužidla vzpěrnou délku v našem případě nezkracují.

$$N_{Ed} = 76,74 \text{ kN}$$

Kolmo k ose y:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{\pi i_y} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{6}{\pi \cdot 0,083} \sqrt{\frac{235 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9}} = 0,770$$

$$\phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_1 (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 [1 + 0,34(0,770 - 0,2) + 0,770^2] = 0,893$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,893 + \sqrt{0,893^2 - 0,770^2}} = 0,743$$

Kolmo k ose z:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{\pi i_z} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{6}{\pi \cdot 0,05} \sqrt{\frac{235 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9}} = 1,278$$

$$\phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_1 (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 [1 + 0,49(1,278 - 0,2) + 1,278^2] = 1,581$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,581 + \sqrt{1,581^2 - 1,278^2}} = 0,398$$

Rozhodující je vybočení kolmo k ose z, avšak pro výpočet interakce vzpěru a klopení je potřeba posoudit i vybočení k ose y.

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0,398 \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 503472 \text{ N} = 503,47 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.13)$$

$$\frac{76,74}{503,47} = \underline{0,152} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

6.7. Posouzení sloupu na klopení

Průřez spadá do 1. třídy, uvažuje se tedy ve výpočtech klopení s plastickými hodnotami průřezu. Součinitel vzpěrné délky k_z lze uvažovat jako L_{cr} / L , v našem případě $k_z = 1$. Vzhledem k symetrickému průřezu, parametr nesymetrie průřezu $\zeta_j = 0$.

$$M_{Ed} = 70,44 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{plfy}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{284897}} = 0,596$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} = 2,487 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 1,34 \cdot 10^{-5} \cdot 81 \cdot 10^9 \cdot 2,10 \cdot 10^{-7}}}{6} = 284897 \text{ Nm} =$$

$$= 284,90 \text{ kNm}$$

$$\text{Kde: } \mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \chi_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] =$$

$$= \frac{2,73}{1} \left[\sqrt{1 + 0,605^2 + (0,46 \cdot 0,64 - 0)^2} - (0,46 \cdot 0,64 - 0) \right] = 2,487$$

$$\zeta_g = \frac{\pi z_g}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0,095}{1,6} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 1,34 \cdot 10^{-5}}{81 \cdot 10^9 \cdot 2,10 \cdot 10^{-7}}} = 0,640$$

$$\zeta_j = \frac{\pi z_j}{k_z L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = 0$$

$$\chi_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,6} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 1,08 \cdot 10^{-7}}{81 \cdot 10^9 \cdot 2,10 \cdot 10^{-7}}} = 0,605$$

Součinitel C_1 vyjadřuje vliv tvaru ohybového momentu a je určen lineární interpolací podle tabulky NB 3.1. uvedené v příloze normy 1993-1-1, v závislosti na součiniteli χ_{wt} . Součinitel zatížení C_2 je uvažován podle tabulky NB 3.2. pro spojitě zatížení od větru jako 0,46.

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$= 0,5 [1 + 0,21(0,596 - 0,2) + 0,596^2] = 0,719$$

Součinitel α_{LT} lze pro válcované profily uvažovat podle křivky vzpěrnosti a .

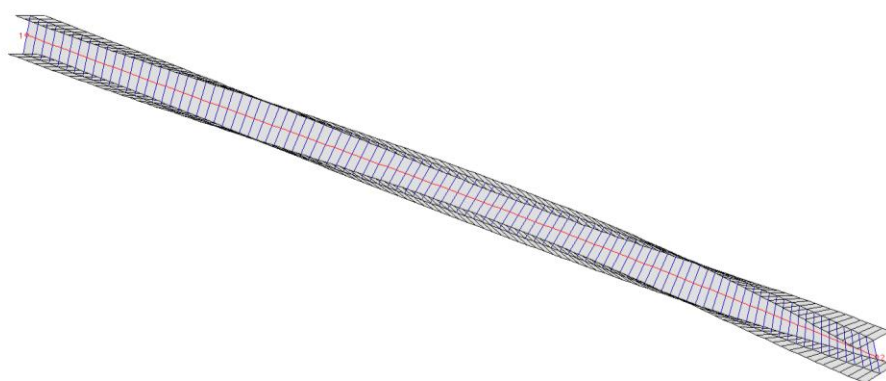
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,719 + \sqrt{0,719^2 - 0,596^2}} = 0,892$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{ply} f_y}{\gamma_{M1}} = 0,892 \frac{4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 90137 \text{ Nm} = 90,14 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \tag{6.14}$$

$$\frac{70,44}{90,14} = \underline{0,781} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

Výpočet kritického momentu M_{cr} byl ověřen pomocí programu LTBeam. Při jeho výpočtu vyšel kritický moment $M_{cr} = 285,30 \text{ kNm}$, tedy zanedbatelný rozdíl 0,4 kNm. Součástí výstupu z tohoto programu je i znázornění klopení nosníku (obr. 6.1).



Obr. 6-1: Klopení nosníku

6.8. Posouzení kombinace vzpěru a klopení

Po úpravě vzorců z normy 1993-1-1 pro výpočet kombinace vzpěru a klopení, kdy zanedbáme vliv účinků průřezu 4. třídy a ohybu z roviny rámu, dostaneme výrazy 6.17 a 6.18.

K posouzení je potřeba provést výpočet součinitelů interakce k_{yy} a k_{zy} podle tabulek B.1 a B.2 v příloze normy 1993-1-1, pro průřez náchylný ke kroucení.

$$k_{yy} = c_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \leq c_{my} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \tag{6.15}$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(c_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \tag{6.16}$$

Součinitele c_{my} a c_{mLT} jsou určeny podle tabulky B.3 v příloze normy 1993-1-1, podle průběhu momentu rovny 0,925.

$$\begin{aligned}
k_{yy} &= 0,925 \left[1 + (0,770 - 0,2) \frac{76,74}{0,743 \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \right] = \underline{0,968} \\
&\leq 0,925 \left[1 + 0,8 \frac{76,74}{0,743 \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \right] = 0,985 \\
k_{zy} &= \left[1 - \frac{0,1 \cdot 1,278}{(0,925 - 0,25) \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(0,925 - 0,25) \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \right] \\
k_{zy} &= 0,971 \geq \underline{0,977}
\end{aligned}$$

S vyčíslenými součiniteli interakce lze přistoupit k poslednímu kroku, posouzení kombinace vzpěru a klopení. Posuzuje se samostatně ke každé ose vybočení.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

$$\frac{76,74}{0,743 \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} + 0,968 \frac{70,44}{0,890 \frac{4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \leq 1,0$$

$$0,082 + 0,968 \cdot 0,781 \leq 1,0$$

$$\underline{0,838} \leq 1,0$$

Splňuje

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (6.18)$$

$$\frac{76,74}{0,398 \frac{5,383 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} + 0,977 \frac{70,44}{0,890 \frac{4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0}} \leq 1,0$$

$$0,152 + 0,977 \cdot 0,781 \leq 1,0$$

$$\underline{0,915} \leq 1,0$$

Splňuje

7. NÁVRH ÚSPORNĚJŠÍ KONSTRUKCE

Nelineární výpočet přináší úsporu při posouzení průřezu, kterou lze využít na navrhnutí úspornějšího profilu.

V případě námi posuzovaného rámu lze změnit pouze průřez sloupů HE200A na HE180A. Jak je vidět v tab. 4-2, na příčli v místě levého rámového rohu vzniká ohybový moment $M_y = 95,94$ kNm, který neumožňuje navrhnutí úspornějšího profilu z důvodu nesplnění posouzení na prostý ohyb.

7.1. Vnitřní síly

Po změně profilu sloupů na HE180A dochází k změně vlastní tíhy a přerozdělení průběhu vnitřních sil. Výpočet byl zopakován pro metodu analýzy po analýze, která v předchozím postupu dala nejnepříznivější účinky z nelineárních metod. Výsledné účinky jsou vypsány v tab. 7-1.

| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N [kN] | -76,77 | -47,64 | 2,48 | -19,13 | -19,10 | -19,33 |
| V _z [kN] | -29,45 | 32,80 | -28,41 | 29,47 | 30,88 | 32,13 |
| M _y [kNm] | 68,88 | 68,23 | -42,65 | 53,17 | 55,29 | -66,89 |

Tab. 7-1: Vnitřní síly z analýzy po analýze

7.2. Posouzení

Posouzení se provede jako v přechozí kapitole pouze pro levý sloup, který je rozhodující na namáhání. Příčel zůstává nezměněna, její vyhovění na mezní stav únosnosti bylo dokázáno v předchozí kapitole.

7.2.1. Posouzení sloupu na prostý ohyb

$$M_{Ed} = 68,88 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rk} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3,25 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 76375 \text{ Nm} = 76,38 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.1)$$

$$\frac{68,88}{76,38} = \underline{0,902} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

7.2.2. Posouzení sloupu na prostý tlak

$$N_{Ed} = 76,77 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{4,53 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1,0} = 1064550 \text{ N} = 1064,55 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.2)$$

$$\frac{76,77}{1064,55} = \underline{0,072} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

7.2.3. Posouzení sloupu na kombinaci tlaku a ohybu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.3)$$

$$\frac{76,77}{1064,55} + \frac{68,88}{76,38} = \underline{0,974} \leq 1,0 \quad \text{Splňuje}$$

Celková délka sloupů je 58 m. Cena původního profilu HE200A je přibližně 1018 Kč/m. Cena všech původních sloupů dohromady činí 59044 Kč. Cena nově navrženého profilu HE180A je 835 Kč/m. Celková cena nově navržených sloupů dohromady činí 48430 Kč. Rozdíl pouze na sloupech tedy činí 10614 Kč, což je úspora 18 % po zaokrouhlení. [8]

Při rozsáhlejších konstrukcích by taková úspora materiálu mohla činit významnou položku při vytváření rozpočtu.

8. ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo vytvořit model rámové konstrukce z konečných prvků, ten zatížit reálným zatížením, vyhodnotit vnitřní síly a únosnost konstrukce pro lineární a nelineární výpočet.

V programu Scia Engineer je vytvoření ocelové konstrukce jednoduché, díky obsáhlé knihovně profilů, stejně tak i vytvoření zatížení díky možnostem programu. V tab. 8-1 jsou vypsané všechny hodnoty vnitřních sil z výpočtů, které jsme provedli. Přírůstek vnitřních sil je značen kladně a pokles záporně. Jako základ jsou brány výsledky z lineárního výpočtu. Na námi posuzované konstrukci, při nelineárním výpočtu, kdy bylo počítáno s vlivem imperfekcí a deformace konstrukce, vznikl přírůstek posouvajících sil V_z a ohybových momentů M_y přibližně 4 %. Nejnepříznivější účinky jsou vyvozovány na levém sloupu, značeném v tabulce a-d.

| Prut | a-d | b-g | c-d | d-e | e-f | f-g |
|--|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lineární výpočet | | | | | | |
| N [kN] | -76,74 | -48,04 | 2,61 | -20,65 | -20,72 | -20,86 |
| V_z [kN] | -29,42 | 33,31 | -28,59 | 28,6 | 30,05 | 31,2 |
| M_y [kNm] | 70,44 | 71,03 | -42,91 | 46,11 | 48,18 | -70,27 |
| Výpočet imperfekcemi a teorií 2. řádu | | | | | | |
| N [kN] | -76,82 | -48,06 | 2,61 | -20,55 | -20,57 | -20,83 |
| Přírůstek N [%] | +0,10 | +0,04 | 0,00 | -0,48 | -0,72 | -0,14 |
| V_z [kN] | -30,59 | 34,17 | -28,52 | 29,11 | 30,4 | 31,64 |
| Přírůstek V_z [%] | +3,98 | +2,58 | -0,24 | +1,78 | +1,16 | +1,41 |
| M_y [kNm] | 73,31 | 71,51 | -42,85 | 46,39 | 48,55 | -70,79 |
| Přírůstek M_y [%] | +4,07 | +0,68 | -0,14 | +0,61 | +0,77 | +0,74 |
| Výpočet metodou analýzy po analýze | | | | | | |
| N [kN] | -76,84 | -48,07 | 2,58 | -20,5 | -20,49 | -20,75 |
| Přírůstek N [%] | +0,13 | +0,06 | -1,15 | -0,73 | -1,11 | -0,53 |
| V_z [kN] | -30,62 | 34,16 | -28,53 | 29,16 | 30,44 | 31,68 |
| Přírůstek V_z [%] | +4,08 | +2,55 | -0,21 | +1,96 | +1,30 | +1,54 |
| M_y [kNm] | 73,43 | 71,55 | -42,85 | 46,49 | 48,65 | -70,85 |
| Přírůstek M_y [%] | +4,24 | +0,73 | -0,14 | +0,82 | +0,98 | +0,83 |

Tab. 8-1: Přehled vnitřních sil

Dalším důležitým faktorem pro porovnání lineárního a nelineárního výpočtu je výsledné posouzení jednotlivých prutů z hlediska pevnostního v případě nelineárního výpočtu a jemu ekvivalentního výpočtu stabilitnímu z lineárního výpočtu.

| | N | M_y | N + M_y |
|----------------------|----------|----------------------|--------------------------|
| Nelineárně | 0,061 | 0,727 | 0,788 |
| Lineárně | 0,152 | 0,781 | 0,915 |
| Přírůstek [%] | +149,18 | +7,43 | +16,12 |

Tab. 8-2: Přehled výsledků posudků

Z tab. 7-2 je patrné, že při lineárním výpočtu jsme dostali oproti nelineárnímu výpočtu rozdíl při nejdůležitějším posudku, kombinaci vzpěru a klopení, přibližně 16 %. Přírůstek 149 % na normálové síle lze redukovat zavedením ztužidel, tím snížením vzpěrných délek a snížením redukčního součinitele χ . Avšak tato možnost má za následek další spotřebu materiálu na ztužidla.

Jak již bylo řečeno, norma ČSN EN 1993-1-1 umožňuje výpočet nelineárně s vlivem imperfekcí a teorie druhého řádu nebo lineárně s výpočtem stability prutů. Nelineární výpočet na námi posuzované konstrukci sice zvýšil vnitřní síly o 4 %, avšak oproti lineární metodě ušetřil až 16 % na únosnosti prvků konstrukce. Z toho vyplývá, že lineární výpočet je bezpečnější z hlediska posouzení, nelineární výpočet ale oproti tomu vyvozuje příznivou rezervu v únosnosti, která může být využita na úspore materiálu tím, že se navrhne menší profily.

Důležité je poznamenat, že s rostoucím počtem podlaží vzrůstá normálová síla a tím i přírůstek ohybového momentu. Nelze tedy říci, že přírůstek by procentuálně činil stále stejně. Vhodné by bylo, zopakovat výpočty teoreticky pro různé varianty zatížení s různým počtem podlaží, případně tvarů konstrukce, aby se určila výhodnost pro jednotlivé druhy konstrukcí a namáhání.

Tyto výpočty by bylo vhodné též doplnit o reálné zkoušky na modelech, aby bylo zřejmé, zda nelineárně vypočtené hodnoty odpovídají skutečnému chování. V případě potvrzení těchto hodnot by úspora 16 % na materiálu zefektivnila konstrukci a činila velkou finanční úsporu, která na naší konstrukci činila na sloupech 18 %.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TEPLÝ, Břetislav a Svatopluk ŠMIRÁK. *Pružnost a plasticita II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2000. ISBN 80-214-1622-X.
- [2] SALAJKA, Vlastislav. *CD03: Pružnost a plasticita*. Brno, ©2010
- [3] *Základní školení* [online]. 2013[cit. 2014-05-25]. Dostupné z:
<http://nemetschek-scia.com/cs/support/downloads/scia-engineer-2013-manuals>
- [4] HOLICKÝ, M., J. MARKOVÁ a M. SÝKORA. *Zatížení stavebních konstrukcí: Příručka k ČSN EN 1991*. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-87093-89-4.
- [5] KRÁL, Jaromír. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem: Příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-87438-05-3.
- [6] ČSN EN 1993-1-1 (731401). *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2006.
- [7] STUDNÍČKA, Jiří. *Ocelové konstrukce*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03473-9.
- [8] *Ocelové nosníky HEA* [online]. [2013] [cit. 2014-05-25]. Dostupné z:
<http://www.kondor.cz/ocelove-nosice-hea/c-1637/>
- [9] KOLÁŘ, V., I. NĚMEC a V. KANICKÝ. *Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.

- [10] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. *Statika stavebních konstrukcí II*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3428-8.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | |
|----------------------|---|
| A | Plocha průřezu |
| A_v | Smyková plocha |
| b | Šířka pásnice |
| C_1, C_2, C_3 | Součinitele vystihující tvar momentového obrazce |
| c_{mLT} | Součinitel ekvivalentního momentu |
| c_{my} | Momentový součinitel |
| e | Celkové vybočení |
| E | Modul pružnosti v tahu a tlaku |
| e_0 | Počáteční výchylka vybočení |
| F | Funkce deformací |
| f_u | Mez pevnosti oceli |
| f_y | Mez kluzu oceli |
| G | Modul pružnosti ve smyku |
| I_t | Moment setrvačnosti v prostém kroucení |
| I_y, I_z | Moment setrvačnosti průřezu k ose y, z |
| i_y, i_z | Poloměr setrvačnosti k ose y, z |
| I_ω | Výsečový moment setrvačnosti |
| k_{crit} | Součinitel kritického zatížení |
| k_{yy}, k_{zy} | Součinitele interakce vzpěru a klopení |
| k_z | Součinitel vzpěrné délky |
| L | Délka prutu |
| \underline{L}_c | Doplňková energie vnějších sil |
| $L_{cr,y}, L_{cr,z}$ | Kritická vzpěrná délka pro vybočení sloupu kolmo k ose y, z |
| L_p | Potenciální energie vnějších sil |
| m | Hmotnost na 1 běžný metr |
| $M_{b,Rd}$ | Návrhová hodnota únosnosti v ohybu při klopení |
| $M_{c,Rd}$ | Návrhová hodnota únosnosti v ohybu |
| M_{cr} | Pružný kritický moment při klopení |
| M_{Ed} | Návrhová hodnota ohybového momentu |
| MKP | Metoda konečných prvků |

| | |
|----------------------|---|
| M_{Rk} | Charakteristická únosnost průřezu v ohybu |
| M_y | Ohybový moment kolem osy y |
| N | Normálová síla |
| $N_{b,Rd}$ | Návrhová hodnota vzpěrné únosnosti normálové síly v tlaku |
| $N_{c,Rd}$ | Návrhová hodnota únosnosti normálové síly v tlaku |
| N_{cr} | Kritická síla pro vybočení prutu |
| N_{Ed} | Návrhová hodnota normálové síly |
| N_{Rk} | Charakteristická únosnost průřezu při působení osové síly |
| r | Poloměr zaoblení styku stojiny a pásnice |
| s_k | Charakteristické zatížení sněhem na zemi |
| t_f | Tloušťka pásnice |
| t_w | Tloušťka stojiny |
| u, v, w | Posun ve směru osy x, y, z |
| U_c | Doplňková energie deformace |
| U_p | Potenciální energie deformace |
| u_x, u_y, \dots | Posun konstrukce ve směru osy x, y, ... |
| v_b | Základní rychlost větru |
| $V_{c,Rd}$ | Návrhová hodnota únosnosti posouvající síly |
| V_{Ed} | Návrhová hodnota posouvající síly |
| V_z | Posouvající síla ve směru osy z |
| W_c^d | Komplementární (doplňková) energie deformace |
| W^d | Poměrná potencionální energie |
| $w_e(z_e)$ | Tlak větru na vnější povrch konstrukce |
| $W_{el,y}, W_{el,z}$ | Elastický průřezový modul k ose y, z |
| $W_{pl,y}, W_{pl,z}$ | Plastický průřezový modul k ose y, z |
| α | Součinitel délkové tepelné roztažnosti |
| α_1 | Součinitel imperfekce |
| α_{cr} | Násobitel soustavy osových sil pro kritické vybočení |
| α_h | Redukční součinitel pro výšku sloupu |
| α_{LT} | Součinitel imperfekce při klopení |
| α_m | Redukční součinitel pro počet sloupů v řadě |
| $\alpha_{ult,k}$ | Násobitel soustavy osových sil bez uvážení vzpěru |

| | |
|---------------------------------------|--|
| γ_{M0} | Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu průřezu kterékoliv třídy |
| γ_{M1} | Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu průřezu při posouzení stability |
| γ_{M2} | Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu oslabeného průřezu v tahu |
| $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \dots$ | Normálové deformace ve směru osy x, y, ... |
| $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \dots$ | Smykové deformace ve směru os xy, yz, ... |
| ζ_g | Parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku |
| ζ_j | Parametr nesymetrie průřezu |
| η_{cr} | Tvar kritického vybočení konstrukce v pružném stavu |
| λ | Kritická štíhlost prutu |
| $\bar{\lambda}$ | Poměrná štíhlost prutu |
| λ_1 | Srovnávací štíhlosti prutu |
| $\bar{\lambda}_{LT}$ | Poměrná štíhlost při klopení |
| μ_{cr} | Kritický moment při klopení |
| π | Ludolfovo číslo, $\pi = 3,141592$ |
| π_c | Celková doplňková energie |
| π_e | Potencionální energie vnějších sil |
| π_i | Potencionální energie vnitřních sil |
| π_p | Celková potencionální energie |
| ρ | Objemová hmotnost |
| $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \dots$ | Normálová napětí ve směru osy x, y, ... |
| $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \dots$ | Smyková napětí ve směru os xy, yz, ... |
| ν | Součinitel příčné deformace v pružné oblasti |
| ϕ | Natočení prutu |
| ϕ_0 | Počáteční natočení prutu |
| $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ | Pootočení kolem osy x, y, z |
| χ | Součinitel vzpěrnosti |
| χ_{LT} | Součinitel klopení |
| χ_{wt} | Parametr kroucení |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výpočet zatížení větrem

Příloha 2 – Zatřídění průřezů

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Výpočet zatížení větrem

$$v_{b0} = 27,500 \text{ m.s}^{-1}$$

$$z_e = 6,860 \text{ m}$$

kategorie terénu II

Základní rychlost větru

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 1.1 \cdot 27,500 = 27,5 \text{ m.s}^{-1}$$

Střední rychlost větru

$$v_m(z_e) = v_b \cdot c_0(z_e) \cdot c_r(z_e) = 27,5 \cdot 1,0 \cdot 0,935 = 25,7 \text{ m.s}^{-1}$$

$$c_r(z_e) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{6,86}{0,05}\right) = 0,935$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19$$

Turbulence větru

$$I_v(z_e) = \frac{k_1}{c_0(z_e) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{6,86}{0,05}\right)} = 0,203$$

Maximální dynamický tlak

$$\begin{aligned} q_p(z_e) &= [1 + 7 \cdot I_v(z_e)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z_e) = [1 + 7 \cdot 0,203] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 25,7^2 = \\ &= 1000,5 \text{ N.m}^{-2} = 1 \text{ kN.m}^{-2} \end{aligned}$$

Vítr zleva $\theta = 0^\circ$, vítr zprava $\theta = 180^\circ$

$$b = 20 \text{ m}$$

$$h = 6,86 \text{ m}$$

$$d = 12 \text{ m}$$

$$\underline{e = 2h = 13,72 \text{ m}}$$

$$\frac{h}{d} = \frac{6,86}{12} = 0,572$$

$$A: \quad c_{pe, 10} = -1,2$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,2) = -1,2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$B: \quad c_{pe, 10} = -0,8$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,8) = -0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$D: \quad c_{pe, 10} = 0,74$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot 0,74 = 0,74 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$E: \quad c_{pe, 10} = -0,39$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,39) = -0,39 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$F: \quad c_{pe, 4,71} = -1,82$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,82) = -1,82 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$G: \quad c_{pe, 10} = -1,12$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,12) = -1,12 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$c_{pe, 10} = 0,04$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot 0,04 = 0,04 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H: \quad c_{pe, 10} = -0,54$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,54) = -0,54 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$c_{pe, 10} = 0,04$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot 0,04 = 0,04 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$I: \quad c_{pe, 10} = -0,56$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,56) = -0,56 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$J: \quad c_{pe, 10} = -0,68$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,68) = -0,68 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$c_{pe, 10} = 0,16$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot 0,16 = 0,16 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

Vítr kolmý $\theta = 90^\circ$

$$b = 15,045 \text{ m}$$

$$h = 6,86 \text{ m}$$

$$d = 20 \text{ m}$$

$$\underline{e = 2h = 13,72 \text{ m}}$$

$$\frac{h}{d} = \frac{6,86}{20} = 0,343$$

$$A: \quad c_{pe, 10} = -1,2$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,2) = -1,2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$B: \quad c_{pe, 10} = -0,8$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,8) = -0,8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$C: \quad c_{pe, 10} = -0,5$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,5) = -0,5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$D: \quad c_{pe, 10} = 0,71$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot 0,71 = 0,71 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$F: \quad c_{pe, 4,71} = -1,75$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,75) = -1,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$G: \quad c_{pe, 5,61} = -1,48$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-1,48) = -1,48 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H: \quad c_{pe, 10} = -0,68$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,68) = -0,68 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$I: \quad c_{pe, 10} = -0,5$$

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 1 \cdot (-0,5) = -0,5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

Příloha 2 – Zatřídění průřezu

Profil HE200A

Stojina: $c = 134 \text{ mm}$

$t = 6,5 \text{ mm}$

Ohyb: $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$

$$\frac{134}{6,5} \leq 72,1$$

$$20,62 \leq 72$$

1. třída průřezu

Tlak: $\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$

$$\frac{134}{6,5} \leq 33,1$$

$$20,62 \leq 33$$

1. třída průřezu

Tlak a ohyb:

$$z = \frac{N_{Ed}}{t \cdot f_y} = \frac{76,84 \cdot 10^3}{6,5 \cdot 235} = 50,30 \text{ mm}$$

$$\alpha_c = \frac{c+z}{2} = \frac{134+50,30}{2} = 92,15 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_c}{c} = \frac{92,15}{134} = 0,688 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} \leq \frac{369\varepsilon}{13 \cdot \alpha \cdot 1}$$

$$\frac{134}{6,5} \leq \frac{369,1}{13 \cdot 0,688 \cdot 1}$$

$$20,62 \leq 49,85$$

1. třída průřezu

Pásnice: $c = 78,75 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

Tlak: $\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$

$$\frac{78,75}{10} \leq 9,1$$

$$7,88 \leq 9$$

1. třída průřezu

Profil IPE270

Stojina: $c = 220 \text{ mm}$

$t = 6,6 \text{ mm}$

Ohyb: $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$

$$\frac{220}{6,6} \leq 72,1$$

$$33,33 \leq 72$$

1. třída průřezu

Tlak: $\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$

$$\frac{220}{6,6} \leq 38,1$$

$$33,33 \leq 38$$

2. třída průřezu

Tlak a ohyb:

$$z = \frac{N_{Ed}}{t \cdot f_y} = \frac{20,75 \cdot 10^3}{6,6 \cdot 235} = 13,38 \text{ mm}$$

$$\alpha_c = \frac{c+z}{2} = \frac{220+13,38}{2} = 116,69 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_c}{c} = \frac{116,69}{220} = 0,530 > 0,5$$

$$\frac{c}{t} \leq \frac{369\varepsilon}{13 \cdot \alpha \cdot 1}$$

$$\frac{220}{6,6} \leq \frac{369,1}{13 \cdot 0,530 \cdot 1}$$

$$33,33 \leq 62,65$$

1. třída průřezu

Pásnice: $c = 49,2 \text{ mm}$

$t = 10,2 \text{ mm}$

Tlak: $\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$

$$\frac{49,2}{10,2} \leq 9,1$$

$$4,82 \leq 9$$

1. třída průřezu