

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# OPTIMALIZACE OCELOVÉ PRUTOVÉ KONSTRUKCE

STEEL BEAM STRUCTURE OPTIMIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK LAMOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR FRANTÍK, Ph.D.

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Radek Lamoš
<b>Název</b>	Optimalizace ocelové prutové konstrukce
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Petr Frantík, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2014
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	30. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

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

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

## **Podklady a literatura**

Literatura dle pokynů vedoucího práce.

## **Zásady pro vypracování**

Nastudování potřebných znalostí a zorientování se v problematice. Nalezení a definice optimalizačních kritérií a aplikace vhodných optimalizačních metod pro nalezení řešení.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
Ing. Petr Frantík, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Hlavním tématem práce je nalezení optimálních průřezů pro danou rámovou konstrukci a nabídnout investorovi nejlepší řešení pro realizaci. Cílem je obecně dostat do podvědomí statické chování této konstrukce, zaznamenat průběhy vnitřních sil při měnících se parametrech (zatížení, profil...) a ve výsledku navrhnout ideální řešení pro daný případ. Práce kombinuje statiku s navrhováním ocelových konstrukcí v praxi a mohla by posloužit jako informační zdroj pro praktické navrhování rámových konstrukcí s možností rozšiřování o další vstupní parametry a okrajové podmínky.

## **Klíčová slova**

Deformační metoda, rámová konstrukce, ocelová konstrukce, optimalizace, JAVA, statika rámové konstrukce, styčník, prut, zatížení, statické posouzení, mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti, kritická délka, kritická síla, součinitel vzpěru

## **Abstract**

The main subject of this work is to find ideal solution of the steel frame structure and offer the best solution to investors. The aim is to get know how steel structures works, write down internal forces when parametres are changing. Parameters can be profiles, loads or many others. The output should be perfectly optimized construction. The content combines theory of structural mechanics and designing steel structures. This project could be very useful in practice designing of steel frame structures with the possibility of expansion by other parameters.

## **Keywords**

Direct stiffness method, frame structure, steel structure, optimalization, JAVA, mechanics of frame structures, joint, beam, loads, mechanical report, ultimate limit state, serviceability limit state, critical force, buckling length, factor for buckling

## **Bibliografická citace VŠKP**

Radek Lamoš Optimalizace ocelové prutové konstrukce. Brno, 2015. 51s., 23 s. příl.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební  
mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Frantík, Ph.D.

## **Prohlášení**

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

V Brně dne 29. 3. 2015

.....

podpis autora

Radek Lamoš

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucím mé bakalářské práce Ing. Janu Bedáňovi a Ing. Petrovi Frantíkovi, Ph.D., za ochotu a pomoc při zpracování této práce.

V Brně dne 29. 3. 2015

.....

podpis autora

Radek Lamoš



# OBSAH

Abstrakt .....	1
Klíčová slova .....	1
Abstract .....	2
Keywords.....	2
Bibliografická citace VŠKP.....	3
Prohlášení .....	4
Poděkování.....	5
OBSAH.....	6
SEZNAM ILUSTRACÍ .....	8
SEZNAM TABULEK .....	10
1 ÚVOD.....	11
2 KONSTRUKCE.....	12
2.1 GEOMETRIE .....	12
2.2 VÝPOČTOVÝ MODEL.....	17
2.2.1 STYČNÍKY .....	19
2.2.2 PRUTY .....	19
2.2.3 ZATÍŽENÍ .....	20
2.2.4 MATERIÁL A PRŮŘEZ.....	21
2.3 VÝPOČET A SESTAVENÍ MATICE TUHOSTI .....	21
2.3.1 PODEPŘENÍ KONSTRUKCE.....	22

2.3.2	ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE .....	23
2.3.3	LOKÁLNÍ MATICE PRUTU.....	25
2.3.4	ÚHEL PRUTŮ A TRANSFORMAČNÍ MATICE PRUTU.....	26
2.3.5	GLOBÁLNÍ MATICE TUHOSTI PRUTU.....	26
2.3.6	MATICE TUHOSTI KONSTRUKCE .....	27
2.4	VEKTOR ZATÍŽENÍ MODELU .....	28
2.5	KONCOVÉ ÚČINKY .....	29
3	POSOUZENÍ .....	32
3.1	KRITICKÁ SÍLA .....	34
3.2	POSUDKY .....	37
4	VÝSLEDKY.....	38
4.1	OPTIMALIZACE .....	42
5	ZÁVĚR .....	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	47
	PŘÍLOHA A: VYKRESLENÍ VNITŘNÍCH SIL.....	48
	A.1 ZATÍŽENÍ STÁLÉ – N + V + M.....	48
	A.2 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + VÍTR ZLEVA N + V + M .....	49
	A.3 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + VÍTR ZPRAVA N + V + M.....	50
	A.4 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + SNÍH + VÍTR ZPRAVA N + V + M.....	51
	PŘÍLOHA B: KRITICKÉ SÍLY – KLOUB x KLOUB .....	52
	B.1 IPE 80.....	52
	B.2 IPE 120.....	53

B.3 IPE 160.....	54
B.4 IPE 200.....	55
B.5 IPE 240.....	56
B.6 IPE 300.....	57
B.7 IPE 360.....	58
PŘÍLOHA C: POSUDKY .....	59

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 2.1 kotevní plán .....	13
Obr. 2.2 podélný pohled.....	14
Obr. 2.3 příčný řez.....	15
Obr. 2.4 prostorový pohled .....	16
Obr. 2.5 výpočtový model (Scia Engineer).....	17
Obr. 2.6 arrayList stycniky a pruty.....	17
Obr. 2.7 vykreslení modelu .....	18
Obr. 2.8 model generovaný programem se zvýrazněnými styčníky .....	18
Obr. 2.9 proměnné ve třídě Stycnik .....	19
Obr. 2.10 metody get a set .....	19
Obr. 2.11 proměnné ve třídě Prut .....	20
Obr. 2.12 třída Zatizeni .....	20

Obr. 2.13 model zatížení [2].....	21
Obr. 2.14 proměnné ve třídě Profil.....	21
Obr. 2.15 hlavní styčníky + rozdělení prutů.....	22
Obr. 2.16 nastavení pevného kloubu u styčníku 0.....	22
Obr. 2.17 primární vektor [2] .....	23
Obr. 2.18 metoda Zatizeni .....	23
Obr. 2.19 lokální matice prutu .....	25
Obr. 2.20 získání transformačního úhlu .....	26
Obr. 2.21 transformační matice.....	26
Obr. 2.22 maticeTuhostiGlob .....	27
Obr. 2.23 metoda spocitejMaticik .....	27
Obr. 2.24 třída VektorF .....	28
Obr. 2.25 vykreslení N .....	29
Obr. 2.26 vykreslení V .....	29
Obr. 2.27 vykreslení M.....	30
Obr. 2.28 Scia - průběh N.....	30
Obr. 2.29 Scia - průběh V .....	31
Obr. 2.30 Scia - průběh M.....	31
Obr. 3.1 část výpisu nadefinovaných profilů.....	33
Obr. 3.2 objekt Profil .....	33
Obr. 3.3 model v programu fyDiK.....	34
Obr. 3.4 zatěžovací graf.....	34

Obr. 3.5 grafické zjištění inflexního bodu .....	35
Obr. 3.6 tabulkové hodnoty $\beta$ [4].....	36
Obr. 3.7 program Inflex.....	37

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 zatížení - stálé .....	23
Tabulka 2.2 Zatížení sněhem [6].....	24
Tabulka 2.3 zatížení - vítr na stěny[5] .....	24
Tabulka 2.4 zatížení - vítr na střechu [5].....	25
Tabulka 3.1 hodnoty Beta [FyDiK] .....	36
Tabulka 4.1 Posouzení IPE400.....	39
Tabulka 4.2 vetknutí X kloub.....	44
Tabulka 4.3 vetknutí X vetknutí.....	45

# 1 ÚVOD

Po ročním působení jako asistent statika ocelových konstrukcí bylo zvoleno téma optimalizace ocelové rámové konstrukce, které spojuje teoretickou část stavební mechaniky s běžnou praxí. Na základě zkušeností mého vedoucího ve statické kanceláři byla doporučena právě tato tematika. Důvodem zvolení tématu je snaha o hlubší rozbor chování daného rámu při různých vstupních parametrech, na který nezbyvá v praxi mnoho času.

Konstrukce nebude řešena pomocí statického softwaru, ale bude vycházet z deformační metody a výpočtového modelu vytvořeného v programovacím jazyce JAVA. Základním předpokladem je důkladné seznámení a pochopení deformační metody a nastudování základů programovacího jazyka JAVA.[1]

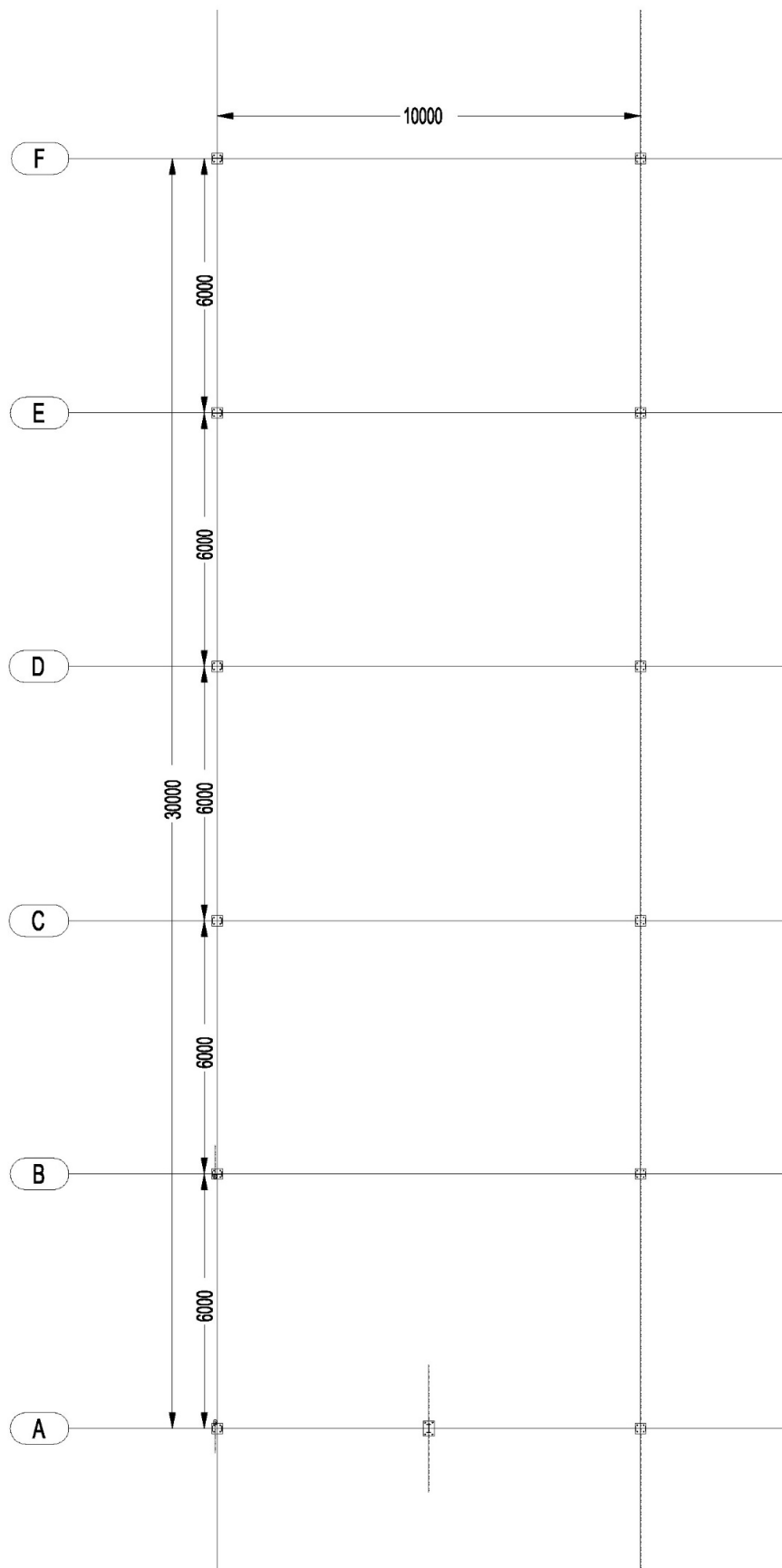
Požadavkem investora je staticky posoudit danou konstrukci dle dodaných podkladů, které udávají geometrii budovy a zatížení konstrukce. Jednotlivé parametry se mohou měnit a to znamená, že program neslouží pouze k optimalizaci jednoho daného případu. Při vyhodnocování výsledků je názorně vidět, jak jednotlivé parametry ovlivňují statický stav rámu, takže při případné změně v podkladech od investora je možné odhadnout, jak velký vliv tato změna bude mít na celkový výpočet.

## 2 KONSTRUKCE

Při návrhu konstrukce je nejdůležitějším požadavkem od investora spolehlivost konstrukce a následně její hospodárnost. Tím pádem je kladen největší důraz na co nejmenší hmotnost konstrukce. Toho lze docílit použitím oceli vyšších pevností, což povede ke zmenšení hmotnosti, ale tohle řešení nemusí vést k významnějším úsporám např. v těch případech, kdy dimenze konstrukce závisí především na podmínkách použitelnosti nebo na podmínkách vysokocyklické únavy a lomu či výrazné stabilitní pevnosti.[3] Důležité je tedy správně konstrukci dimenzovat a staticky navrhnout. Konstrukce je posuzována pomocí mezních stavů – mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti.

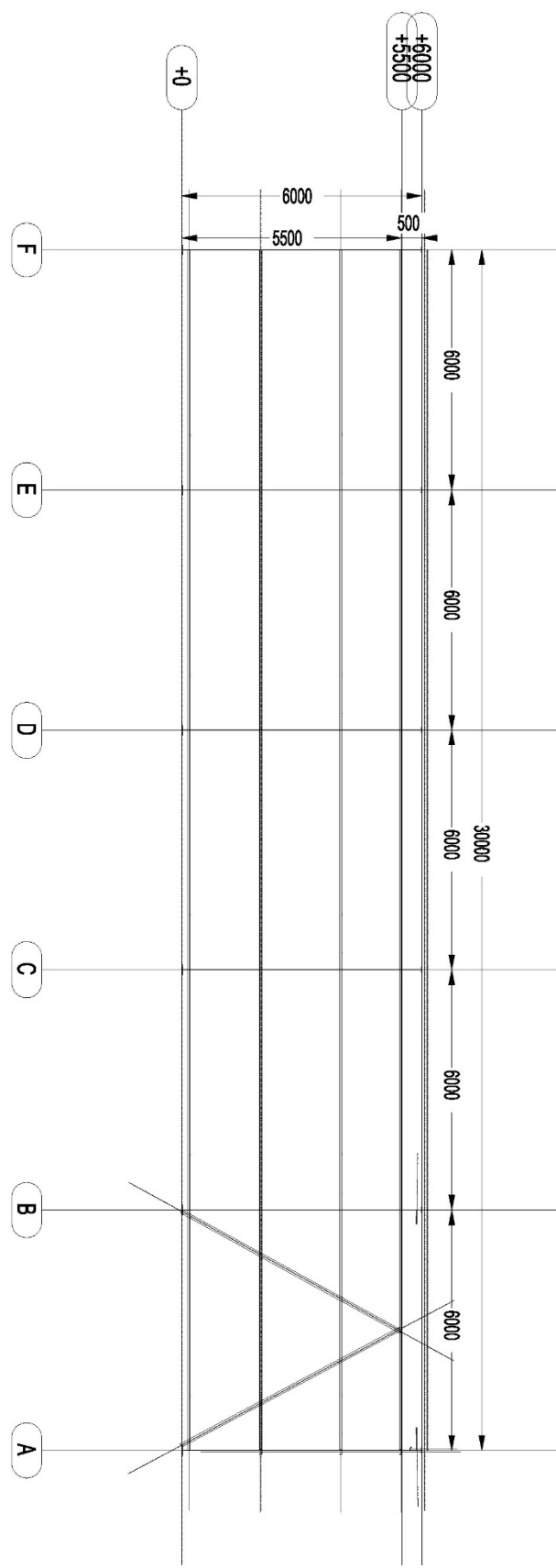
### 2.1 GEOMETRIE

Pro optimalizaci byla vybrána jednolodní hala s půdorysnými rozměry 30 x 10 metrů (viz obr. 2.1). Stavbu bude investor využívat jako skladovací prostor a tak zde nejsou další specifické požadavky na otvory nebo vybavení. Střecha je pultová a rámy jsou rozmístěny po 6 metrech tzn. 5 polí a délka vaznic 6 metrů, které jsou od sebe vzdáleny v příčném směru 1 metr (viz obr. 2.2 a 2.3). Prostorový model je znázorněn na obr. 2.4. Optimalizace je udělána pro tento případ, avšak není problém měnit například rozpětí, výšku či zatížení.

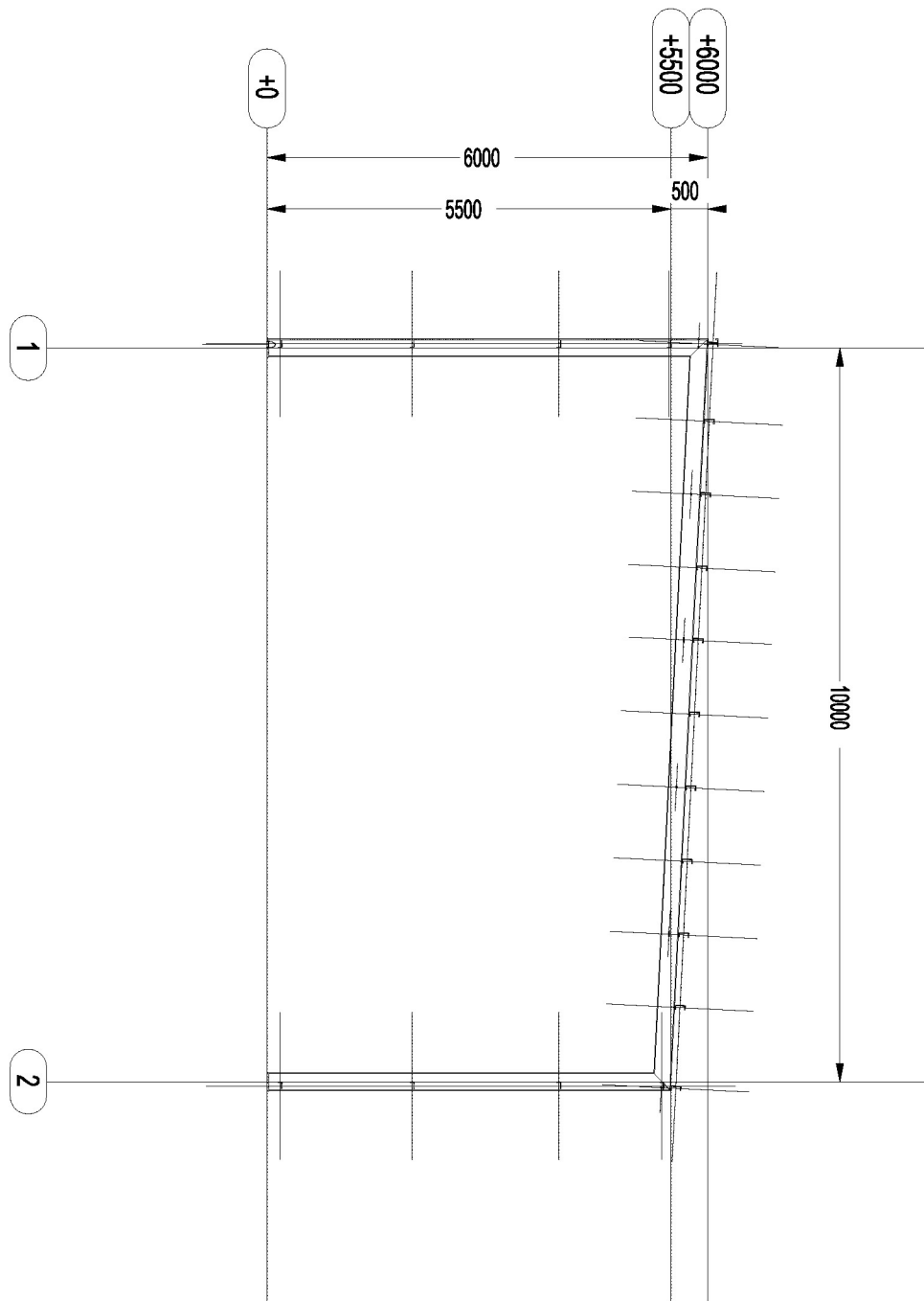


Obr. 2.1 kotevní plán

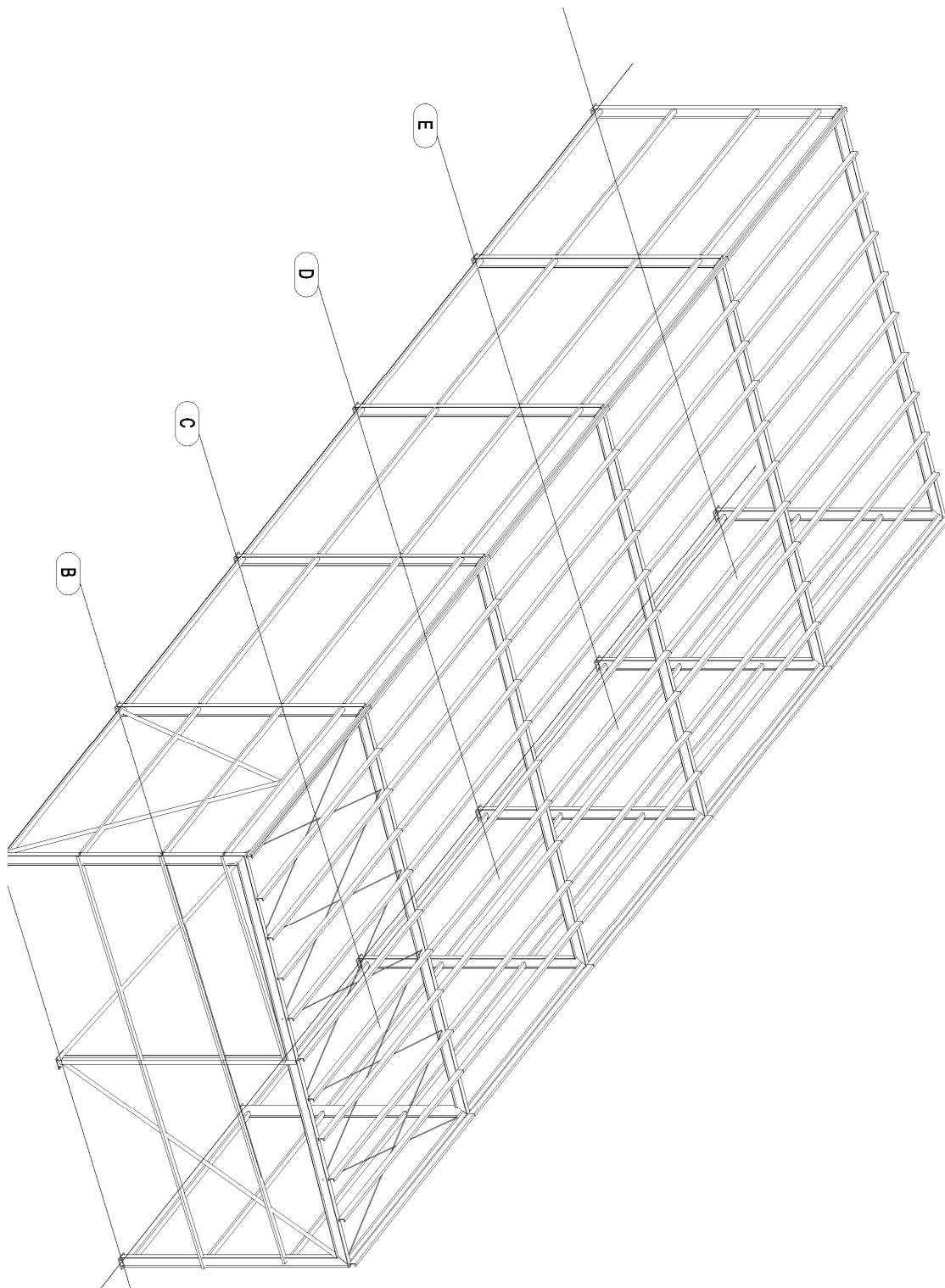




Obr. 2.2 podélný pohled



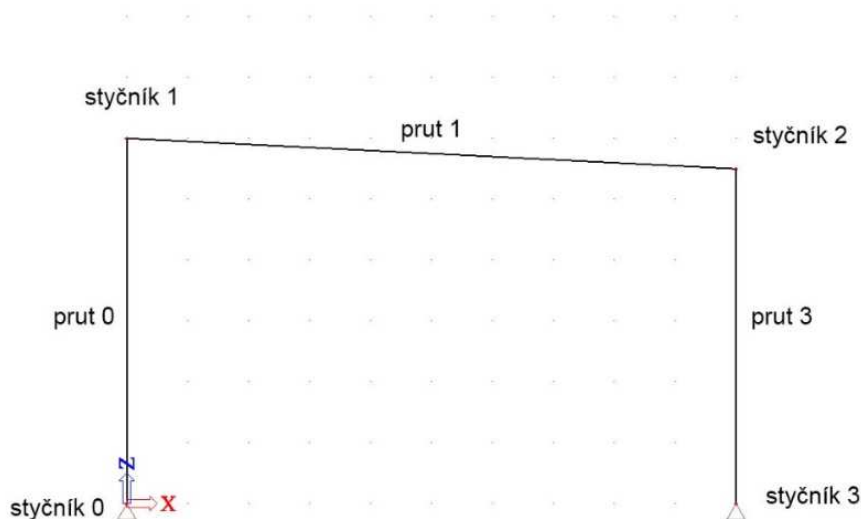
Obr. 2.3 příčný řez



Obr. 2.4 prostorový pohled

## 2.2 VÝPOČTOVÝ MODEL

Výpočty prováděné v této práci jsou řešeny pomocí programu vytvořeného v jazyce JAVA s využitím deformační metody. Veškeré výpočty jsou pro kontrolu srovnávány s výpočty z programu Scia Engineer – model znázorněn na obr. 2.5



Obr. 2.5 výpočtový model (Scia Engineer)

Takto vytvořený model obsahuje průřezové charakteristiky, fyzikální vlastnosti materiálu a dále jsou v něm idealizovány styky prutů, vnější vazby a zatížení rámu nejlépe tak, aby model co možná nejlépe demonstroval chování skutečné konstrukce a zároveň jej bylo možné spočítat. [2] V našem programu byl model vytvořen pomocí 4 hlavních stýčníků, které definují základní geometrii konstrukce (viz obr. 2.5). Pro správné dimenzování je potřeba znát přesný průběh vnitřních sil a proto je zapotřebí rozdělit hlavní pruty (v našem případě *prut 0*, *prut 1*, *prut 3*) na více částí. Tím docílíme zahuštění stýčníků (viz obr. 2.8), ve kterých jsou zjišťovány vnitřní síly a posuny. Takto vytvořené stýčníky a pruty, které uchováváme v polích typu ArrayList (viz obr. 2.6), tvoří náš výpočtový model.

```
ArrayList<Stycnik> stycniky =  
    new ArrayList<Stycnik>(); //list pro uchovani stycniku  
ArrayList<Prut> pruty =  
    new ArrayList<Prut>(); //list pro uchovani prutu
```

Obr. 2.6 arrayList stycniky a pruty

Pro vykreslení modelu z našeho programu je použito balíku EPSPrinter, který umožňuje vykreslit jednotlivé stýčníky s danými parametry (např. souřadnice, barva) a

poté tyto styčníky spojit úsečkou představující pruty. Tyto vykreslené objekty se ukládají do grafického souboru ve formátu .eps. Postup použití je vidět na obrázku 2.7.

```
//vykreslení modelu
String nazevSouboru="model.eps";
Rectangle2D ramecek=new Rectangle2D
.Double(-0.1,-0.1,12,6);
EPSPrintWriter obrazek=new EPSPrintWr
iter(nazevSouboru,ramecek);
for(int i=0; i<stycniky.size(); i++)
{
    obrazek.fillOval(stycniky.get(i).ge
tX(),stycniky.get(i).getY(),0.2,Color.BLACK);
}
for(int i=0; i<pruty.size(); i++)
{
    obrazek.drawLine(pruty.get(i).getS1().ge
tX(),pruty.get(i).getS1().getY(),
pruty.get(i).getS2().getX(),pruty.get(
i).getS2().getY(),0.1,Color.BLACK);
}
obrazek.close();
```

Obr. 2.7 vykreslení modelu

Po spuštění programu se vytvoří soubor model.eps, který obsahuje graficky znázorněný model (viz obr 2.8). Takto vzniklý model je tvořen pruty a styčníky, pro které jsou vytvořeny samostatné třídy a ty jsou popsány v následujících kapitolách.



Obr. 2.8 model generovaný programem se zvýrazněnými styčníky

### 2.2.1 STYČNÍKY

Tato třída s názvem *Stycnik* uchovává informace o styčnίκu, které zastupují nadefinované proměnné – *x*, *y*, *index*, *u*, *w*, *fi* (viz obr. 2.9) První dvě udávají polohu v rovině *XY*, proměnná *index* zastupuje pořadí styčnίκu v modelu, zbylé proměnné udávají možnosti posunutí nebo pootočení.

```
public class Stycnik
{
    protected double x;
    protected double y;
    protected int index;
    protected boolean u;
    protected boolean w;
    protected boolean fi;
}
```

Obr. 2.9 proměnné ve třídě *Stycnik*

Tato třída také obsahuje metody, které umožňují přístup k výše uvedeným proměnným. Jedná se o metody *set* a *get* ( ukázka na obr. 2.10 )

```
public double getY()
{
    return y;
}
public int getIndex()
{
    return index;
}
public void setU(boolean u)
{
    this.u=u;
}
```

Obr. 2.10 metody *get* a *set*

### 2.2.2 PRUTY

Stejně jako pro styčnícíky je i pro pruty vytvořena třída *Prut*, která už je poměrně komplikovanější. V téhle třídě jsou definovány proměnné, které můžete vidět na obrázku 2.11 a které jsou vysvětleny níže.

```

public class Prut
{
    protected double delka;
    protected Zatizeni zatizeni;
    protected Profil profil;
    protected Stycnik stycnik1;
    protected Stycnik stycnik2;
    protected Matrix maticeTuhostiLok;
    protected Matrix maticeTuhostiGlob;
    protected Matrix vektorKoncovychSilGlob;
    protected Matrix transformacniMatice;
    protected Matrix vektorKoncovychSilLok;
    protected double uhel;
}

```

Obr. 2.11 proměnné ve třídě Prut

Prut potřebuje znát svoji délku, aby bylo možné později vypočítat matici tuhosti a stejně tak potřebuje znát zatížení, které na něj působí, pro výpočet zatěžovacího vektoru. V důsledku toho jsou definovány proměnné *delka* a *zatizeni*. Proměnné *stycnik1* a *stycnik2* definují krajní body prutu. Pro výpočet transformační matice musí prut znát úhel, který svírá s globální soustavou, jehož hodnota je uložena do proměnné *uhel*. Pro výpočet výsledných účinků jsou dále potřeba proměnné typu matrix a to *maticeTuhostiLok*, do které se ukládá lokální matice tuhosti daného prutu; *transformacniMatice*, do které se ukládá transformační matice daného prutu a díky které později dostaneme globální matici tuhosti prutu, která je uložena do proměnné *maticeTuhostiGlob*. Stejný princip je u proměnných *vektorKoncovychSilLok* a *vektorKoncovychSilGlob*. Později bude ukázáno, jak se s těmito proměnnými ve třídě Prut pracuje.

### 2.2.3 ZATÍŽENÍ

Pro nastavení zatížení na konstrukci je založena třída Zatizeni, která obsahuje proměnné *q1*, *q2*, *n1*, *n2* a pole *primarniVektor*. Deklarování můžeme vidět na obrázku 2.12

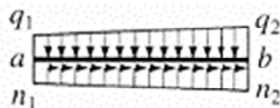
```

public class Zatizeni
{
    protected double q1;
    protected double q2;
    protected double n1;
    protected double n2;
    protected double[] primarniVektor;
}

```

Obr. 2.12 třída Zatizeni

Pro vysvětlení proměnných  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $n_1$  a  $n_2$  použijeme obrázek 2.13



Obr. 2.13 model zatížení [2]

Primární zatěžovací vektor vypočítáme následně pomocí těchto proměnných. Ve třídě jsou dále deklarovány metody get stejně jako u předchozích tříd.

## 2.2.4 MATERIÁL A PRŮŘEZ

Poslední třída, která byla vytvořena pro úplnost výpočtového modelu, se jmenuje *Profil*, která obsahuje hlavně průřezové charakteristiky a fyzikální vlastnosti materiálu. Jednotlivé proměnné jsou vidět na obr. 2.14

```
public class Profil
{
    protected double modulPruznosti;
    protected double momentSetrvacnosti;
    protected double plocha;
    protected String nazev;
    protected double smykPlocha;
    protected double mezKluzu;
    protected double wP1;
    protected double[] silaKrit;
}
```

Obr. 2.14 proměnné ve třídě *Profil*

Proměnné *modulPruznosti*, *momentSetrvacnosti*, *plocha*, *nazev*, *smykPlocha*, *wP1* charakterizují profil použitý v konstrukci rámu a jejich hodnoty můžeme nalézt v tabulkách. Pole s názvem *silaKrit* zastupuje kritické síly potřebné k posouzení prutu na vzpěr. Profily, které budou v programu vytvořeny, budou uloženy do arraylistu s názvem *profily* (stejně jako styčníky a pruty).

## 2.3 VÝPOČET A SESTAVENÍ MATICE TUHOSTI

Nyní je potřeba správně zadat všechny vstupní parametry a aplikovat v programu deformační metodu pro výpočet rámu. Hlavní geometrie je určena 4 hlavními styčníky, kterým je potřeba zadat souřadnice. Následně budou mezi hlavní styčníky přidány další dílčí styčníky, díky kterým bude možno zjistit průběhy vnitřních sil s větší přesností.



```

//definovani stycniku a pridani do listu "stycniky"
double[] x= {0.0,0.0,10.0,10.0};
double[] y= {0.0,6.0,5.5,0.0};
int[] pocetDilku={10,20,10};
//cyklus pro vytvoreni modelu
int indexStycniku=0;
for(int i=0;i<pocetDilku.length;i++)
{
    double deltaX=(x[i+1]-x[i])/pocetDilku[i];
    double deltaY=(y[i+1]-y[i])/pocetDilku[i];
    for(int j=0;j<pocetDilku[i];j++)
    {
        Stycnik stycnik=new Stycnik(x[i]+deltaX*j,
            y[i]+deltaY*j,indexStycniku);
        indexStycniku++;
        stycniky.add(stycnik);
    }
}
Stycnik stycnikKoncovy=new Stycnik(x[x.length-1],
    y[y.length-1],indexStycniku);
indexStycniku++;
stycniky.add(stycnikKoncovy);

```

Obr. 2.15 hlavní styčníky + rozdělení prutů

Na obrázku 2.15 jsou vidět pole  $x$  a  $y$ , které jsou naplněny souřadnicemi hlavních styčnicků a pole  $pocetDilku$ , které udává na kolik dalších prutů je rozdělen první, druhý a třetí prut.

### 2.3.1 PODEPŘENÍ KONSTRUKCE

U styčnicků budou nastaveny možnosti posunu a jejich pozice. Konstrukce je podepřena pevnými klouby a tak je potřeba u prvního a posledního styčnicku nastavit nulový svislý a vodorovný posun. Postup je vidět na obrázku 2.16.

```

//vytvoreni podpor
stycniky.get(0).setU(false);
stycniky.get(0).setW(false);
//stycniky.get(0).setFi(false);
stycniky.get(stycniky.size()-1).setU(false);
stycniky.get(stycniky.size()-1).setW(false);
//stycniky.get(stycniky.size()-1).setFi(false);

```

Obr. 2.16 nastavení pevného kloubu u styčnicku 0

### 2.3.2 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE

Zatížení do programu vložíme pomocí primárního vektoru, jehož podobu vidíme na obrázku 2.17. Ve třídě `Zatizeni` vytvoříme metodu `spocitejPrimarniVektor`, ve které naplníme pole `primarniVektor` jednotlivými vzorci.

$$\vec{R}_{ab} = \begin{Bmatrix} -(2n_1 + n_2)l / 6 \\ -(7q_1 + 3q_2)l / 20 \\ (3q_1 + 2q_2)l^2 / 60 \\ -(n_1 + 2n_2)l / 6 \\ -(3q_1 + 7q_2)l / 20 \\ -(2q_1 + 3q_2)l^2 / 60 \end{Bmatrix}$$

Obr. 2.17 primární vektor [2]

V hodnotách proměnných zastupujících spojitá zatížení je potřeba zahrnout všechny typy zatížení včetně koeficientů a kombinací. Pomocí cyklů se vytvoří zatížení na konstrukcích ze všech typů profilů. V našem případě to bude řada profilů IPE. Argumenty objektu typu `zatizeni` jsou vidět ve třídě `Zatizeni` na obrázku 2.18.

```
public Zatizeni(double q1, double q2, double n1, double n2)
{
    this.q1=q1;
    this.q2=q2;
    this.n1=n1;
    this.n2=n2;
    primarniVektor=new double[6];
}
```

Obr. 2.18 metoda `Zatizeni`

Abychom mohli konstrukci posoudit, je nutné vypočítat zatížení a kombinace. Co se týče stálého zatížení je potřeba započítat vlastní váhu, kterou program spočítá pomocí průřezové plochy, délky a hustoty materiálu a pak stálé zatížení viz tabulka 2.1

Střecha	$g_k$ [kNm <sup>-2</sup> ]	L [m]	$g_k$ [kNm]
Sendvičové PUR panely	0.15	6.00	0.9
Rozvody, osvětlení apod.	0.15	6.00	0.9
	0.30	6.00	<b>1.80</b>

Tabulka 2.1 zatížení - stálé

Zatížení sněhem je navrženo dle normy ČSN EN 1991-1-3 a výpis je v tabulce 2.2

sníh - rovnoměrné rozdělení	
místo stavby:	Slavkov u Brna
sněhova oblast:	I
char. Hodnota tíhy sněhu:	sk= 0.7 kNm <sup>-2</sup>
úhel sklonu střešní roviny:	α= 5°
tvarový součinitel:	m1= 0.8
součinitel typu krajiny:	Ce= 1
zatěžovací délka:	L= 6
tepelný součinitel:	Ct= 1
zatížení sněhem na m <sup>2</sup> půdorysné plochy: m1*Ce*Ct*sk	qk= 0.56 kNm <sup>-2</sup>
zatížení sněhem na m'	qk= 3.36 kNm'

Tabulka 2.2 Zatížení sněhem [6]

Zatížení větrem bylo počítáno podle normy ČSN EN 1991-1-3-4 pomocí aplikace MS Excel a pro zjednodušení jsou uvedeny pouze výsledné tlaky. Výsledné hodnoty zatížení, které působí na střechu, jsou v tabulce 2.4 a výsledné hodnoty zatížení, které působí na stěny, jsou v tabulce 2.3.

	ze1	ze2	ze3	ze4	ze5	ze6
Maximální dynamický tlak větru (N):						
qp(z)=	795.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vnější tlak větru na návětrnou stěnu D					cpe=	0.80
weD=qp(ze)*cpe						
kNm <sup>-2</sup>	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vnější sání větru na závětrnou stěnu E					cpe=	-0.50
weE=qp(ze)*cpe						
kNm <sup>-2</sup>	-0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabulka 2.3 zatížení - vítr na stěny[5]

Okap návětrné části střechy G :	$C_{pe}(G) = -1.8$	$w_e G = qp(ze) * c_{pe}$	$-1.43$	$\text{kNm}^{-2}$
		$e/10 = 1.00$		
Nároží návětrné části střechy F :	$C_{pe}(F) = -2.1$	$w_e F = qp(ze) * c_{pe}$	$-1.67$	$\text{kNm}^{-2}$
		$e/4 = 3.00$		
Návětrná část střechy H :	$C_{pe}(H) = -0.6$	$w_e H = qp(ze) * c_{pe}$	$-0.48$	$\text{kNm}^{-2}$
		$b/2 - e/10 = 3.80$		
Návětrná část střechy I :	$C_{pe}(I) = -0.5$	$w_e I = qp(ze) * c_{pe}$	$-0.40$	$\text{kNm}^{-2}$
		$d - e/2 = -5.00$		

Tabulka 2.4 zatížení - vítr na střechu [5]

V programu jsou nadefinovány následující kombinace:

- Stálé
- Stálé + sníh
- Stálé + vítr zleva
- Stálé + sníh + vítr zleva
- Stálé + vítr zprava
- Stálé + sníh + vítr zprava

### 2.3.3 LOKÁLNÍ MATICE PRUTU

Pro získání lokální matice prutu vytvoříme metodu *spocitejLokalniMatici*. V této metodě naplníme proměnnou typu *maticeTuhostiLok* hodnotama podle obrázku 2.19.

$$k_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix}$$

Obr. 2.19 lokální matice prutu[2]

### 2.3.4 ÚHEL PRUTŮ A TRANSFORMAČNÍ MATICE PRUTU

Pro stanovení úhlu do transformační matice použijeme proměnné *stycnik1* a *stycnik2*, ze kterých získáme jejich x-ové a y-ové souřadnice a z jejich rozdílů, a použitím matematické funkce *atan*, získáme daný úhel a ten uložíme do proměnné *uhel*. Použití je vidět na obrázku 2.20.

```
//stanoveni transformacniho uhlu
double deltaY=(stycnik2.getY()-stycnik1.getY()); //nap
double deltaX=(stycnik2.getX()-stycnik1.getX());
uhel=Math.atan(Math.abs(deltaY/deltaX));
if(deltaY>0&&deltaX>0)uhel=2*Math.PI-uhel;
else if(deltaY>0&&deltaX<=0)uhel=Math.PI+uhel;
else if(deltaY<=0&&deltaX<0)uhel=Math.PI-uhel;
else if(deltaY<=0&&deltaX>=0)uhel=uhel;
else System.out.println("error transformacniho uhlu");
```

Obr. 2.20 získání transformačního úhlu

Úhel je potřeba dosadit do transformační matice, kterou vidíme na obrázku 2.21

$$T_{ab} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Obr. 2.21 transformační matice [2]

Vytvoříme matici o 6 řádcích a 6 sloupcích a pomocí cyklů přes všechny řádky a přes všechny sloupce naplníme matici pomocí funkce *setValue* hodnotami.

### 2.3.5 GLOBÁLNÍ MATICE TUHOSTI PRUTU

Stanovení úhlu a transformační matice jsou součástí metody *spocitejGlobalniMatici*, která je definována ve třídě *Prut*. Pro získání globální matice tuhosti prutu je potřeba vytvořit transponovanou matici z transformační matice. Taková matice je uložena do proměnné *transponovana*. Do nové proměnné *pomocnaMatice* uložíme součin lokální matice tuhosti s transformační maticí, tzn. součin proměnných *maticeTuhostiLok* s *transformacniMatice*. Nakonec je do proměnné *maticeTuhostiGlob* uložen součin proměnných *transponovana* a *pomocnaMatice*. Tento postup je vidět na obrázku 2.22.

```

Matrix transponovana=Matrix.transpose(transformacniMatice);
Matrix pomocnaMatice=Matrix.multiply(maticeTuhostiLok,transformacniMatice);
maticeTuhostiGlob=Matrix.multiply(transponovana,pomocnaMatice);

```

Obr. 2.22 maticeTuhostiGlob

### 2.3.6 MATICE TUHOSTI KONSTRUKCE

Pro vytvoření matice tuhosti je vytvořena metoda *spocitejMaticiK*, která si zjistí od každého prutu jeho globální matici tuhosti a vytvoří z nich globální matici celé konstrukce. Jako první bylo potřeba vytvořit matici o správném počtu sloupců a řádků. Poté byl vytvořen cyklus pro všechny sloupce a pro všechny řádky a všechny hodnoty byly vynulovány. Poté pomocí indexů řádků a sloupců byla na daná místa uloženy hodnoty z globálních matic jednotlivých prutů. Na obrázku 2.23 je vidět část metody *spocitejMaticiK* a následné naplnění matice hodnotami.

```

public static Matrix spocitejMaticiK(ArrayList<Prut> pruty, int pocetBodu)
{
    Matrix[] matice = new Matrix[pruty.size()];
    for(int i=0; i<pruty.size(); i++)
    {
        matice[i] = pruty.get(i).getMaticeGlob();
    }

    Matrix maticeTuhostiK=new Matrix (pocetBodu*3,pocetBodu*3);

    //vynulovani matice
    for(int i=0;i<maticeTuhostiK.getRowCount();i++)
    {
        for(int j=0;j<maticeTuhostiK.getColumnCount();j++)
        {
            maticeTuhostiK.setValue(i,j,0);
        }
    }
}

```

Obr. 2.23 metoda *spocitejMaticiK*

## 2.4 VEKTOR ZATÍŽENÍ MODELU

Pro získání zatěžovacího vektoru celého modelu je vytvořena metoda `spocitejVektorF`. V této metodě je opět použita transformační matice a to k získání z primárního zatěžovacího vektoru vektor globální a následně vytvoření celkového vektoru modelu použitím stejného principu jako u tvoření celkové matice tuhosti. (viz obrázek 2.24)

```
public static Matrix spocitejVektorF
(ArrayList<Prut> pruty, int pocetBodu)
{
    Matrix vektorF=new Matrix(pocetBodu*3,1);
    double[][] vektor= new double[pruty.size()][6];
    for(int i=0; i<pruty.size(); i++)
    {
        Matrix vectorLok = new Matrix(6,1,pruty.
            get(i).getZatizeni().getVektor());

        Matrix transformacniTransponovana = Matrix.
            transpose(pruty.get(i).getTransformacniMatice());

        Matrix vectorGlob = Matrix.multiply(transf
            ormacniTransponovana,vectorLok);

        for(int j=0; j<6; j++) vektor[i][j] = vec
            torGlob.getValue(j,0);
    }

    for (int i=0;i<(pocetBodu*3);i++)
    {
        vektorF.setValue(i,0,0);
    }
    for(int j=0; j<pruty.size(); j++)
    {
        for (int i=0;i<3;i++)
        {
            vektorF.addValue((pruty.get(j).getS1()
                .getIndex()*3+i,0,vektor[j][0+i]);

            vektorF.addValue((pruty.get(j).getS2()
                .getIndex()*3+i,0,vektor[j][3+i]);
        }
    }
    return vektorF;
}
```

Obr. 2.24 třída `VektorF`

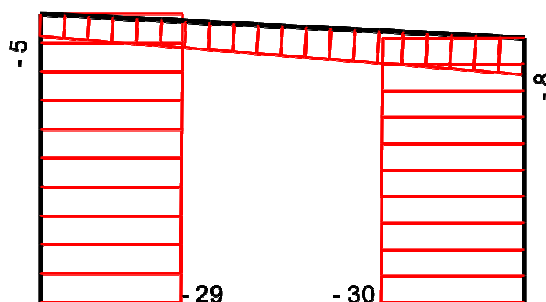
## 2.5 KONCOVÉ ÚČINKY

Vektor lokálních složek koncových sil vyřešíme pomocí lokálního primárního vektoru (viz obrázek 2.17), lokální matice tuhosti (viz obrázek 2.19) a pomocí lokálního vektoru známých složek deformací ze vztahu:

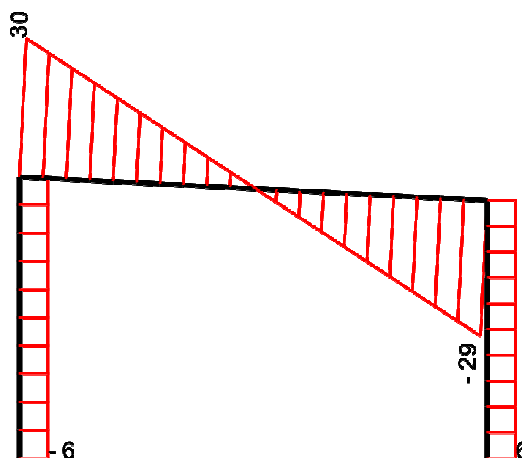
$$R_{ab}^* = R_{ab}^{-*} + k_{ab}^* r_{ab}^* \quad (2.1)$$

Na základě těchto údajů vykreslíme průběhy všech složek výslednice vnitřních sil N, V, M. [2]

K vykreslování bude opět využít EPSPrintWriter a to k vykreslení průběhu normálových a posouvajících sil a ohybových momentů. Pro každou vnitřní sílu bude vytvořeno 6 souborů, jelikož máme 6 různých kombinací zatížení. Všechny průběhy jsou zobrazeny v příloze A. Zde jsou uvedeny na ukázkou průběhy vnitřních sil kombinace stálého zatížení se sněhem. Hodnoty jsou uvedeny v kN.

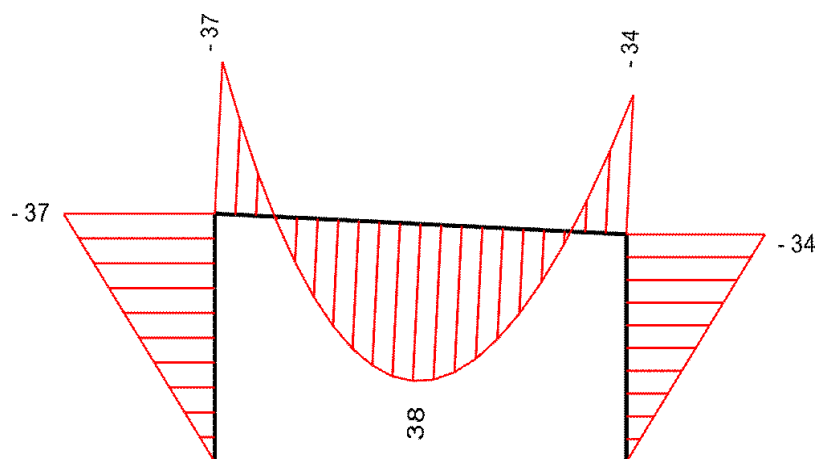


Obr. 2.25 vykreslení N



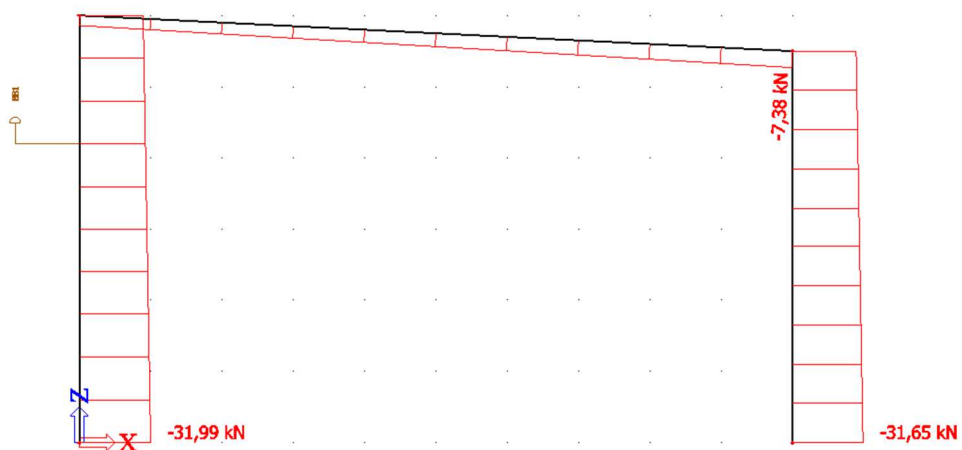
Obr. 2.26 vykreslení V



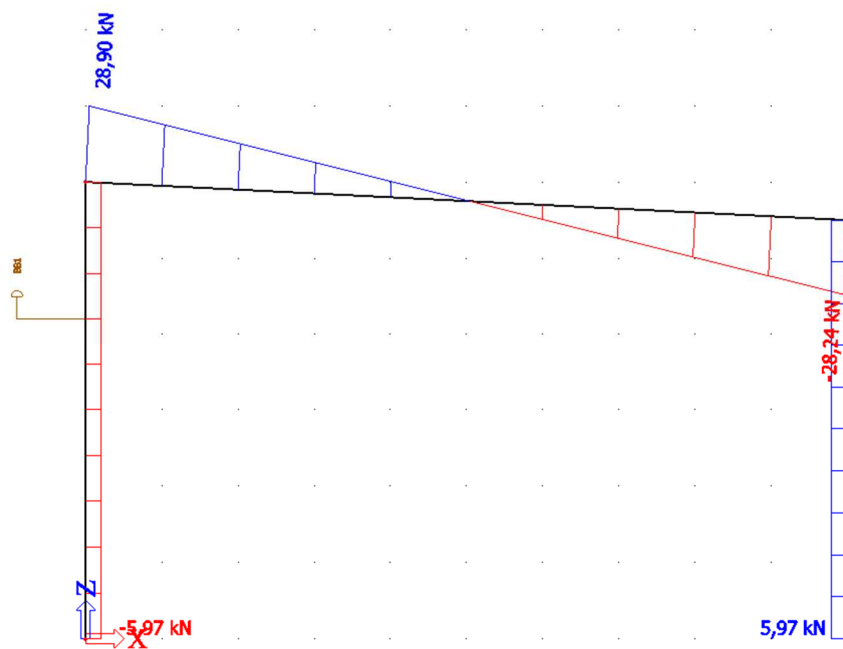


Obr. 2.27 vykreslení  $M$

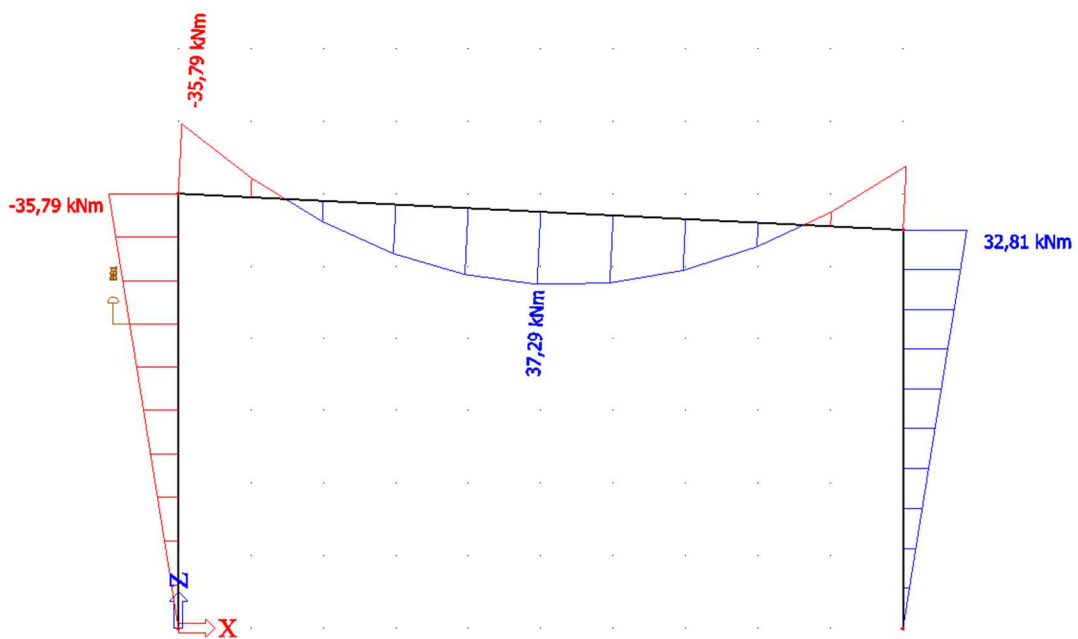
Stejná kombinace byla vytvořena v program Scia. Na obrázcích je vidět, že průběh vnitřních sil je téměř totožný.



Obr. 2.28 Scia - průběh  $N$



Obr. 2.29 Scia - průběh V



Obr. 2.30 Scia - průběh M

### 3 POSOUZENÍ

Navrhované či posuzované stavební konstrukce musí vyhovět z hlediska únosnosti a z hlediska použitelnosti, přičemž posouzení únosnosti souvisí s nejnepříznivějšími definovanými účinky zatížení, které se mohou vyskytnout za dobu životnosti konstrukce, a posouzení použitelnosti s účinky běžného provozního zatížení. Uvedená hlediska vedla k formulaci podmínek spolehlivosti dvou základních skupin mezních stavů, což jsou:

- Skupina mezních stavů únosnosti: soustřeďuje podmínky prokazující způsobilost prvků, dílců i soustav přenést definované nejnepříznivější účinky zatížení, a to po celou dobu životnosti konstrukce
- Skupina mezních stavů použitelnosti: soustřeďuje podmínky prokazující vhodnost navržené konstrukce z hlediska funkce při běžném každodenním provozu

Obě skupiny mezních stavů se kvalitativně liší, neboť odpovídající podmínky vycházejí z různých omezujících hledisek, předpokladů a charakteristik zatížení. Podmínky obou skupin jsou však z hlediska navrhování rovnocenné. Není předem známo, která skupina (popř. která podmínka) bude při návrhu rozhodující.[3]

Pro posouzení byla vybrána řada profilů IPE a s potřebnými charakteristikami byly uloženy do arraylistu *profily*. Jako materiál byla vybrána ocel S235, jelikož patří mezi nejdostupnější a nejpoužívanější. Část výpisu profilů je vidět na obrázku 3.1, přičemž každému profilu je přiřazeno pole *silaKrit*, které obsahuje kritické síly prutů (více v kapitole 3.1).

```

double[] silaKrit5={17175,250000,17150};
Profil profil5=new Profil("IPE160", 2.01E-3, 210E9,
    8.69E-6, 9.66E-4, 235e6, 123.9e-6,silaKrit5);
profil5.add(profil5);
double[] silaKrit6={25173,350000,29958};
Profil profil6=new Profil("IPE180", 2.395E-3, 210E9,
    13.170E-6, 1.125E-3, 235e6, 166.4e-6,silaKrit6);
profil6.add(profil6);
double[] silaKrit7={37432,402709,37362};
Profil profil7=new Profil("IPE200", 2.848E-3, 210E9,
    19.43E-6, 1.4E-3, 235e6, 220.6e-6,silaKrit7);
profil7.add(profil7);
double[] silaKrit8={52984,500000,63055};
Profil profil8=new Profil("IPE220", 3.337E-3, 210E9,
    27.72E-6, 1.588E-3, 235e6, 285.4e-6,silaKrit8);
profil8.add(profil8);

```

Obr. 3.1 část výpisu nadefinovaných profilů

Průřezové charakteristiky a fyzikální vlastnosti materiálu jsou uloženy v jednotlivých profilech, které jsou vidět na obrázku 3.1 a vysvětleny v kapitole 2.2.4. Pro vytvoření zástupce třídy *Profil* je potřeba použít konstruktor této třídy (viz obr. 3.2), do kterého se vypíše potřebné charakteristiky.

```

public Profil(String nazev, double plocha,
double modulPruznosti, double momentSetrvacnosti,
double smykPlocha, double mezKluzu, double wPl,
double[] silaKrit)

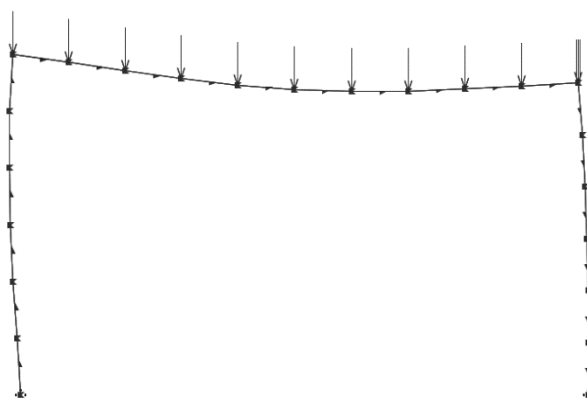
```

Obr. 3.2 objekt *Profil*

Pro správné posouzení je potřeba, aby bylo programu zadáno v jakém místě má nosník posoudit a proto je vytvořeno pole *maxM*, *maxN*, *minN* a *maxV*, do kterých se ukládají největší hodnoty příslušných vnitřních sil. Dále je vytvořen cyklus přes všechny pruty, ve kterém jsou porovnávány hodnoty vnitřních sil s aktuálním minimem a maximem. Na konci cyklu jsou ve výše zmíněných polích uložena požadovaná maxima/minima. Podobný princip bude použit k získání maximálního průhybu, kde jsou srovnávány hodnoty deformací. Největší hodnoty jsou uloženy do proměnných *maxU* a *maxW*.

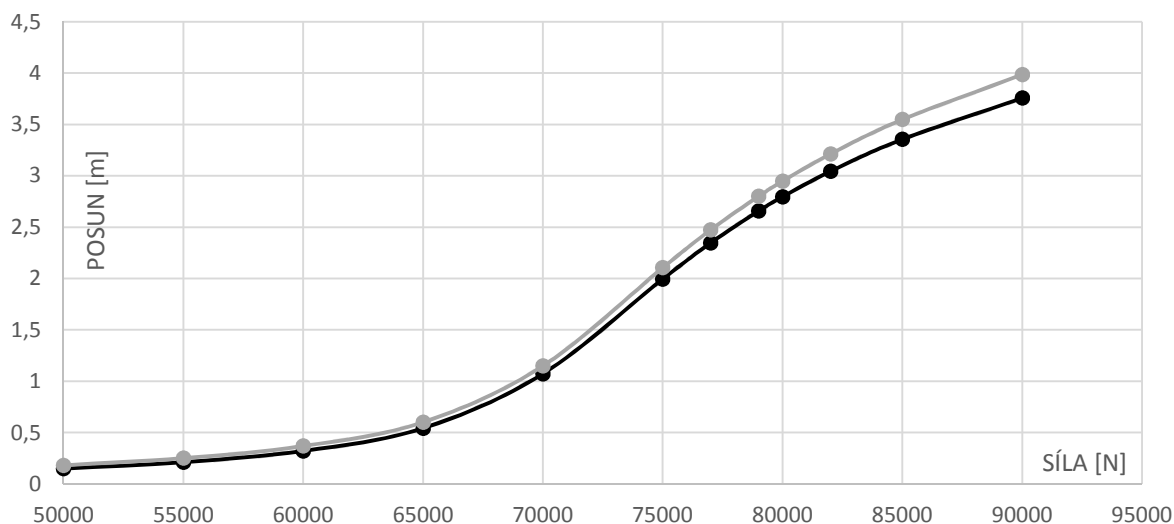
### 3.1 KRITICKÁ SÍLA

U každého profilu, který bude posuzován, je potřeba zjistit hodnotu kritické síly kvůli posouzení kombinace tlaku a ohybu. Hodnota této síly byla zjišťována pomocí programu *fyDiK* vytvořeného Ing. Petrem Frantíkem Ph.D.



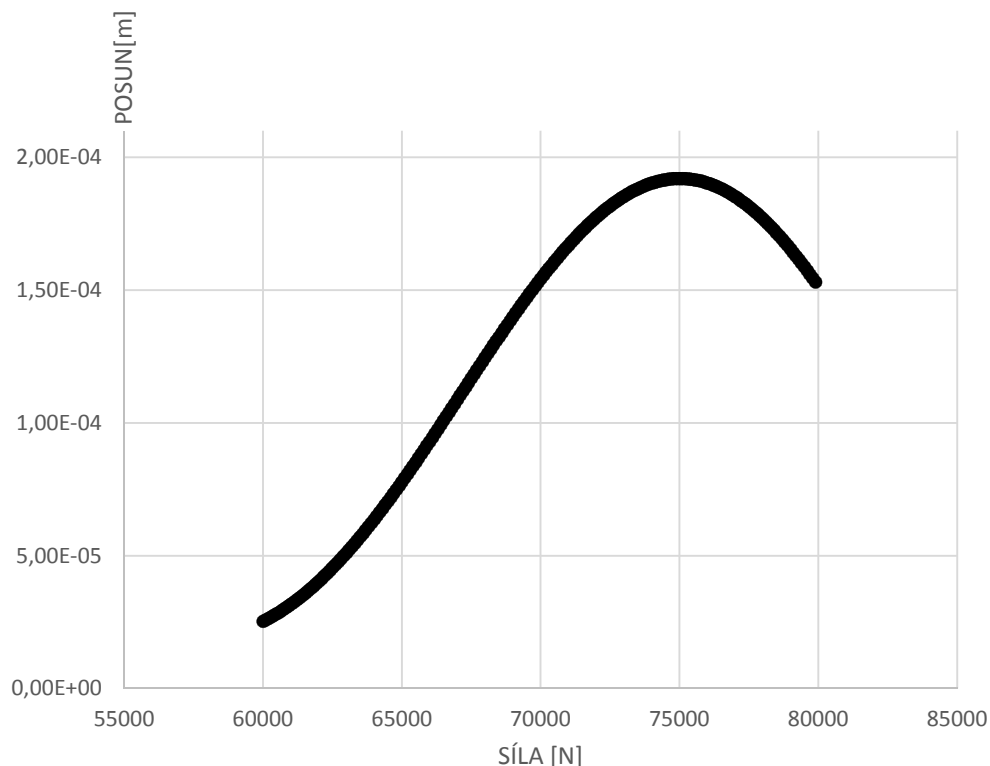
Obr. 3.3 model v programu *fyDiK*

V programu byl vytvořen model (obrázek 3.3), který byl zatěžován narůstajícím zatížením. Při každém nárůstu jsou zaznamenány posuny styčnicku v závislosti na vzrůstající síle (viz obr. 3.4) a z výsledného grafu lze stanovit kritickou sílu odpovídající hodnotě v inflexním bodu. [7]



Obr. 3.4 zatěžovací graf

Pro přesné určení inflexního bodu byla vypočtená závislost proložena polynomem 6. stupně. (pomocí polynomické spojnice trendu v MS Excel) a byla spočtena její derivace. Při dosazení hodnot do této rovnice vznikla funkce, jejíž vrchol udával hodnotu hledané síly. (obr. 3.5) Pro zjištění této síly byla vytvořena třída s názvem *Inflex* (obr 3.7), díky které bylo možné zjistit přesnou hodnotu tohoto bodu Tato analýza byla provedena u celé řady IPE profilů a výsledky jsou k nalezení v příloze B.



Obr. 3.5 grafické zjištění inflexního bodu

Díky kritické síle lze vypočítat i kritickou délku [4] a součinitel vzpěru.[4] (vzorec 3.1 a 3.2)

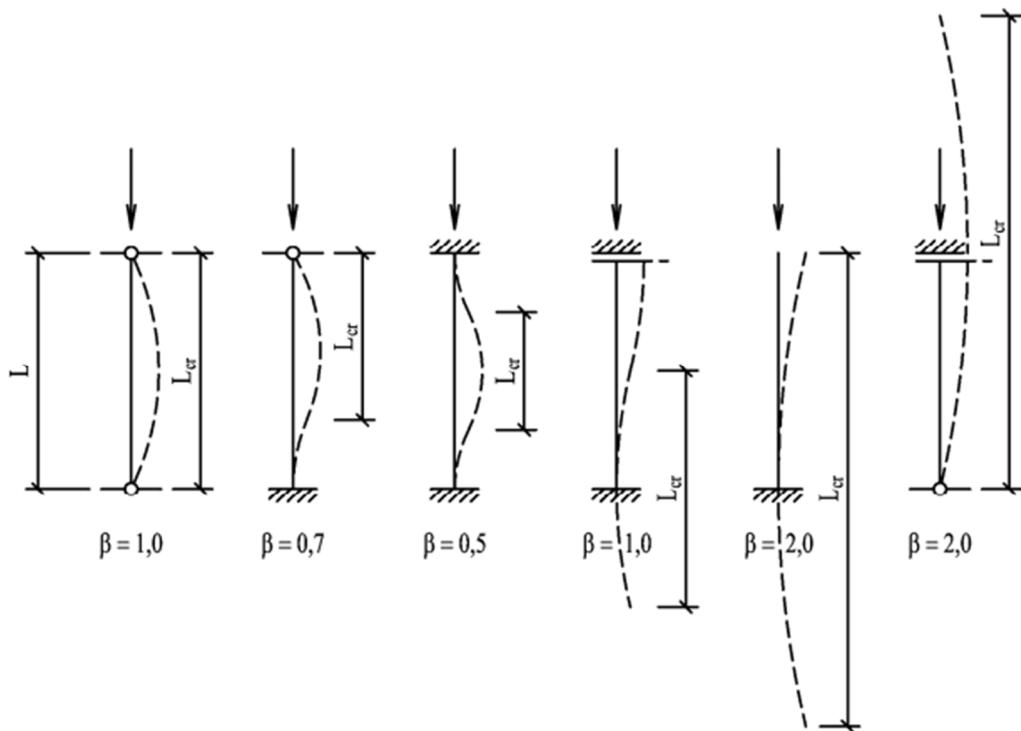
$$kr. \text{ délka} = \sqrt{\frac{EI\pi^2}{5F}} \quad (3.1)$$

$$\beta = \frac{kr. \text{ délka}}{6} \quad (3.2)$$

Výsledné hodnoty jsou vidět v tabulce 2.4, kde první hodnota u profilu patří prutu 0 a druhá hodnota patří prutu 2. Další profily naleznete v příloze B. Součinitel  $\beta$  se zpravidla používá podle obrázku 3.6. Přesnější metoda je ale jeho výpočet dle výše uvedeného postupu.

Profil	E	I	Kr. síla	kr. Delka	Beta
IPE80	2.10E+11	8.01E-07	1564	14.57407	2.429011
	2.10E+11	8.01E-07	1560	14.59274	2.432124
IPE120	2.10E+11	3.18E-06	6283	14.47998	2.41333
	2.10E+11	3.18E-06	6274	14.49036	2.41506
IPE160	2.10E+11	8.69E-06	17175	14.48475	2.414125
	2.10E+11	8.69E-06	17150	14.4953	2.415884
IPE200	2.10E+11	1.94E-05	37432	14.66862	2.444771
	2.10E+11	1.94E-05	37362	14.68236	2.44706
IPE240	2.10E+11	3.89E-05	75017	14.66497	2.444161
	2.10E+11	3.89E-05	74899	14.67651	2.446086
IPE300	2.10E+11	8.36E-05	161059	14.66497	2.444162
	2.10E+11	8.36E-05	160666	14.6829	2.447149
IPE360	2.10E+11	1.63E-04	311392	14.71684	2.452807
	2.10E+11	1.63E-04	310976	14.72668	2.454447

Tabulka 3.1 hodnoty Beta [FyDiK]



Obr. 3.6 tabulkové hodnoty  $\beta$  [4]

```

public class Inflex
{
    public static void main(String[] args) throws Exception
    {
        double koef0=2.88873328E-02;
        double koef1=-3.66033161E-04;
        double koef2=9.04160376E-07;
        double koef3=-9.98504679E-10;
        double koef4=4.98960710E-13;
        double koef5=-1.18311364E-16;
        double koef6=1.01906353E-20;
        double y0=0;
        int inflex=0;
        BufferedWriter bwFile = new BufferedWriter(new
        FileWriter("inflex.txt"));
        for(int i=3100; i<4200;i++)
        {
            double y=0;
            y=Math.pow(i,5)*koef6*6+Math.pow(i,4)*koef5*
            5+Math.pow(i,3)*koef4*4+Math.pow(i,2)*koef3*
            3+Math.pow(i,1)*koef2*2+koef1;
            //y=Mat.pow(i,6)*koef6+Math.pow(i,5)*koef5+Math.
            //pow(i,4)*koef4+Math.pow(i,3)*koef3+Math.pow(i,
            //2)*koef2+Math.pow(i,1)*koef1+koef0; vykreslení funkce
            if(y<y0 && inflex==0)
            {
                System.out.println(i);
                inflex++;
            }
            if(i%10==0)
            {
                bwFile.write(i+" " +y);
                bwFile.newLine();
            }
            y0=y;
        }
        bwFile.close();
    }
}

```

Obr. 3.7 program Inflex

## 3.2 POSUDKY

Pro posouzení únosnosti ve smyku byly vytvořeny proměnné *unosnostSmyk* a *posudekSmyk*, kde *unosnostSmyk* odpovídá dle normy ČSN-EN-1993-1-1 označení  $V_{c,Rd}$  a *posudekSmyk* se pak rovná  $V_{ed} / V_{c,Rd}$ . Samotné posouzení má podobu vzorce 3.3



$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.3)$$

Pro posouzení ohybu a tlaku jsou vytvořeny proměnné  $\lambda$  ( $\lambda$ ), u které je potřeba kritická síla (viz kapitola 3.1.2), dále proměnná  $\phi$ ,  $\chi$ ,  $N_{Tlak}$ ,  $N_{Tah}$ ,  $N$ ,  $N_{navrhove}$ ,  $M$  a  $M_{posudek}$ . Posouzení je provedeno dle normy ČSN-EN-1993-1-1 podle vzorce 3.4, kde proměnné  $N_{Ed}$  a  $M_{y,Ed}$  jsou naše maxima.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (3.4)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{X A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.5)$$

$$X = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (3.6)$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad (3.7)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{kr}}} \quad (3.8)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_y f_y}{\gamma} \quad (3.9)$$

Pro posouzení průhybu jsou použity mezní hodnoty dle ČSN-EN-1993-1-1, takže limitní průhyb nosníku je jeho délka/250.

## 4 VÝSLEDKY

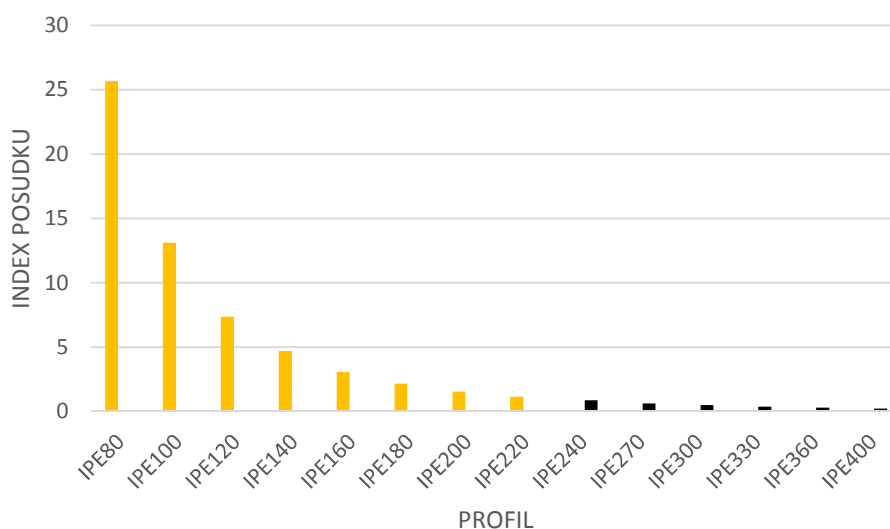
Jako poslední krok, program vypíše seznam všech potřebných hodnot, tzn. tabulku, která bude obsahovat sloupce: název, kombinace, prut, posouvající síly, smyková únosnost, posudek na smyk, normálové síly, normálová únosnost, ohybové momenty,

ohybová únosnost, posudek, průhyb, mezní průhyb a posudek na průhyb. (viz následující tabulka 4.1)

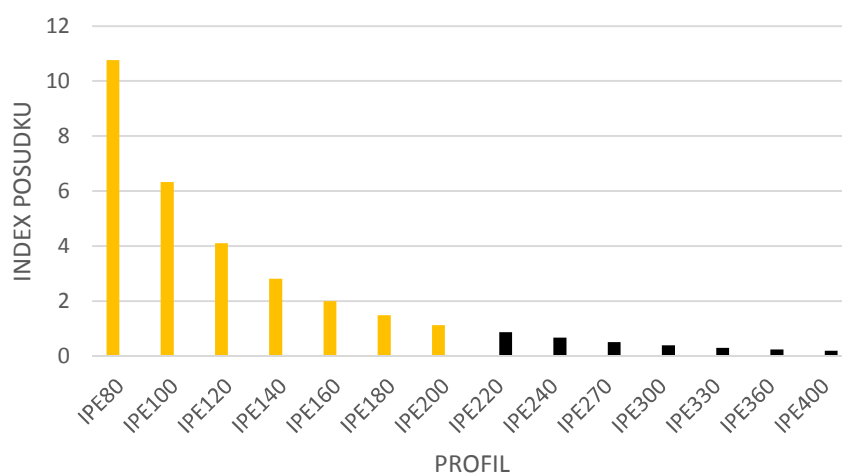
Název	komb	prut	V[N]	smyk ú. [N]	posudek smyk	N[N]	norm ú. [N]	M[Nm]	ohyb ú. [Nm]	posudek	u/w [m]	mezní u/w [m]	posudek u/w
IPE400	0	1	3225	579206	0.006	15422	413123	19347	307145	0.100	0.00	0.024	0.051
	0	2	15564	579206	0.027	3989	1753988	20016	307145	0.067	0.00	0.040	0.089
	0	3	3223	579206	0.006	18998	487363	17728	307145	0.097	0.00	0.022	0.024
IPE400	1	1	6742	579206	0.012	32244	413123	40451	307145	0.210	0.00	0.024	0.107
	1	2	32540	579206	0.056	8341	1753988	41848	307145	0.141	0.01	0.040	0.185
	1	3	6739	579206	0.012	35818	487363	37065	307145	0.194	0.00	0.022	0.051
IPE400	2	1	19170	579206	0.033	18743	1984810	47778	307145	0.165	0.02	0.024	0.962
	2	2	16333	579206	0.028	4692	1753988	57586	307145	0.190	0.00	0.040	0.043
	2	3	17070	579206	0.029	20124	487363	57586	307145	0.229	0.02	0.022	1.094
IPE400	3	1	19170	579206	0.033	18743	1984810	47778	307145	0.165	0.02	0.024	0.962
	3	2	16333	579206	0.028	4692	1753988	57586	307145	0.190	0.00	0.040	0.043
	3	3	17070	579206	0.029	20124	487363	57586	307145	0.229	0.02	0.022	1.094
IPE400	4	1	14183	579206	0.024	11025	413123	41898	307145	0.163	0.02	0.024	0.878
	4	2	23846	579206	0.041	767	1984810	55278	307145	0.180	0.00	0.040	0.040
	4	3	20611	579206	0.036	23850	1984810	55278	307145	0.192	0.02	0.022	1.006
IPE400	5	1	15895	579206	0.027	16133	413123	52169	307145	0.209	0.02	0.024	0.944
	5	2	16187	579206	0.028	1103	1753988	52169	307145	0.170	0.00	0.040	0.051
	5	3	19625	579206	0.034	14426	1984810	50100	307145	0.170	0.02	0.022	1.075

Tabulka 4.1 Posouzení IPE400

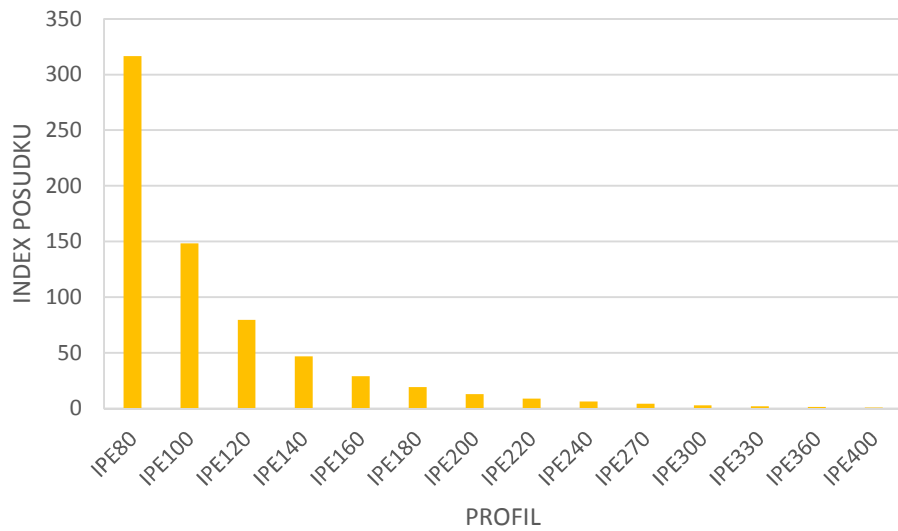
Z tabulek je zřetelné, že profil IPE400 bez problému vyhoví na únosnost, ale má problém s průhybem u sloupů. Posudky ostatních profilů jsou k nalezení v příloze C. Na grafech únosnosti a použitelnosti všech profilů (Graf 4.1 – Graf 4.4) lze vidět výsledné indexy posudku, které zastupují poměr mezi posuzovaným zatížením a únosností. Světle vybarvené sloupy značí posudek větší než 1; tmavě vybarvené vyhoví. Pro posudek sloupů byly brány hodnoty z tabulek posudků pro prut 1 a 3. pro posouzení střešního vazníku pak prut 2.



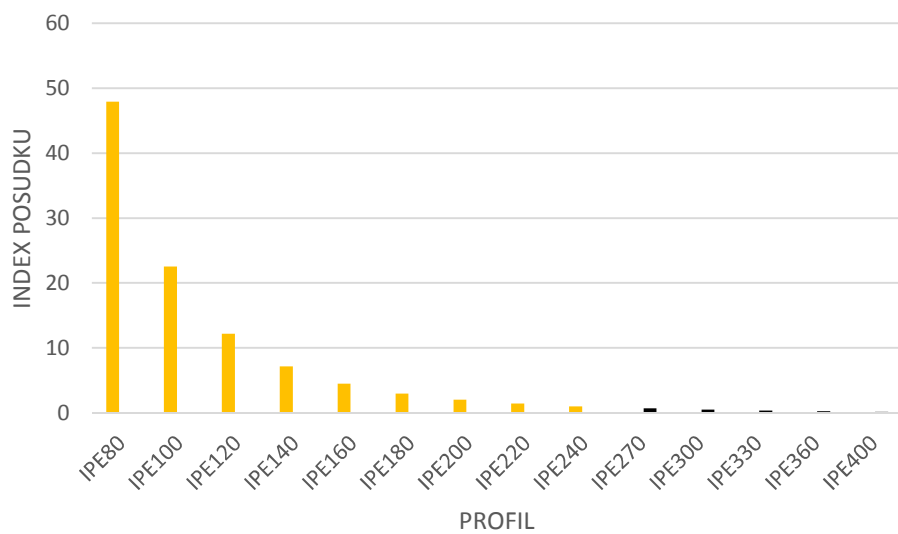
Graf 4.1 Mezní stav únosnosti - sloupy



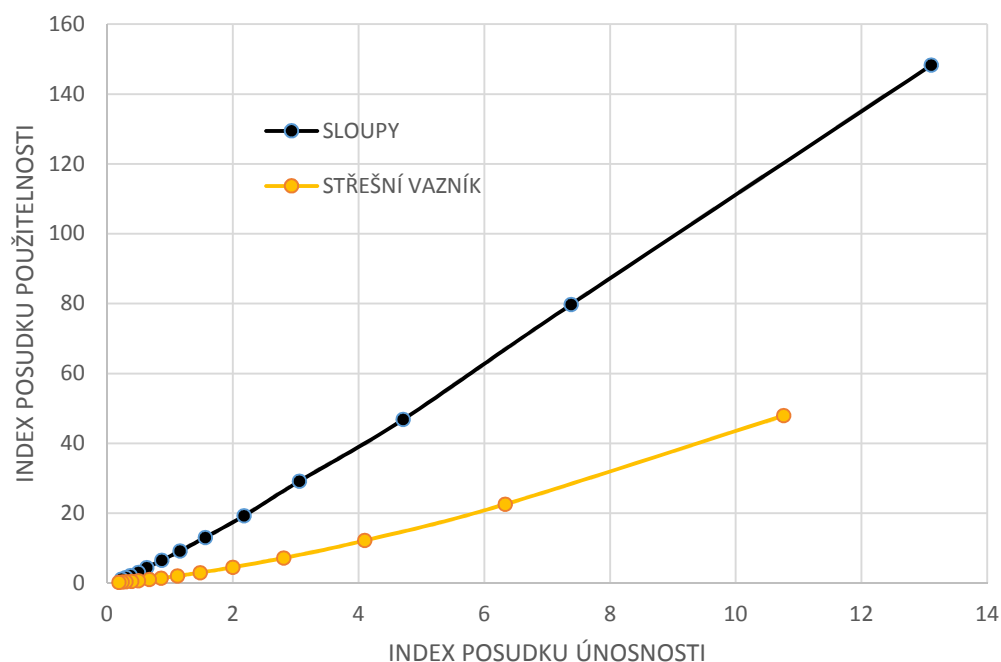
Graf 4.2 Mezní stavu únosnosti – střešní nosník



Graf 4.3 Mezní stav použitelnosti - sloupy



Graf 4.4 Mezní stav použitelnosti - střešní vazník



Graf 4.5 Závislost mezního stavu únosnosti a použitelnosti

Na grafu 4.5 je vidět přibližně lineární závislost na posudcích mezního stavu únosnosti a použitelnosti. Nejvzdálenější bod od počátku souřadné soustavy patří nejmenšímu profilu. Čím je bod blíže, tím větší profil reprezentuje.

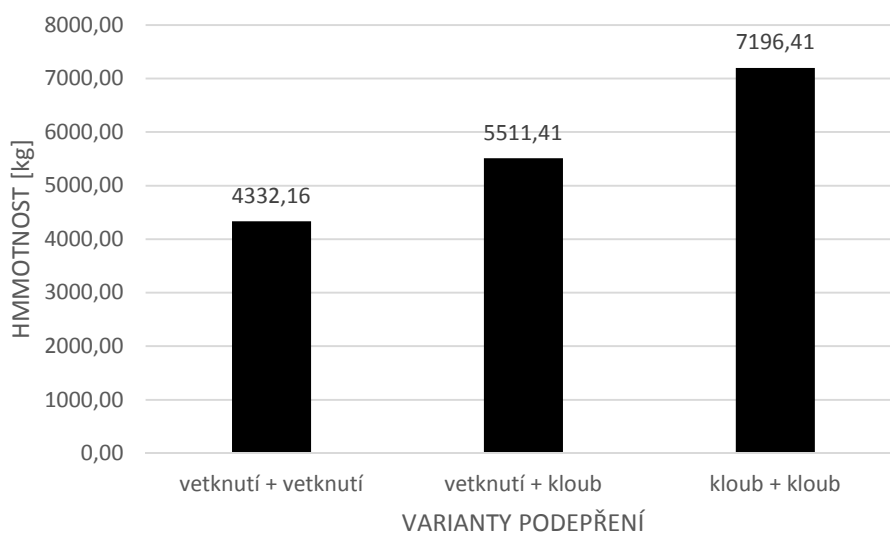
## 4.1 OPTIMALIZACE

Z grafu je vidět, že u sloupů nevyhoví na použitelnost ani IPE400. Použití větší dimenze už by ale znamenalo značnou neekonomičnost stavby. Proto bude potřeba minimálně jednu stranu rámu vetknout a tím zabránit nadměrným průhybům. Nyní je využito toho, že byla snaha psát program co nejobecněji a tak zpětné změny zaberou minimum práce. Je potřeba v programu změnit u styčnicku 0 možnost pootočení na hodnotu *false* (kapitola 2.3.1). Dále je potřeba zjistit a následně změnit v programu kritické síly pro dané nosníky. Dále bude zpracována ještě varianta s vetknutím na obou stranách a následně vyhodnocena optimální řešení. V tabulkách 4.2 a 4.3 jsou vidět ideální dimenze pro každý případ.

Investorovi budou navrženy 3 optimální řešení v závislosti na podepření konstrukce. Nelze říci, která varianta bude pro danou stavbu ideální. Z výsledků je jasné, že varianta s oboustranným vetknutím povede k největší úspoře materiálu, avšak tahle úspora

z horní stavby povede k větším nákladům na stavbu spodní (založení konstrukce). Také bude záležet na podmínkách pro založení, kde vetknutí v praxi se nemusí chovat přesně tak, jak je s ním počítáno v našem programu. Výsledkem je graf, který obsahuje 3 možné varianty a ke každému řešení je vypočtena výsledná hmotnost přepočtena na hmotnost celé haly.

Pro variantu kloubovou je použito pro sloupové prvky profil IPE450 a pro střešní vazník IPE240. Kombinace vetknutí a kloubu zahrnuje profil IPE360 pro sloupy a IPE220 pro vazník. Poslední a hmotnostně nejpřijatelnější řešení je použití vetknutí na obou podporách s profilem pro sloupy IPE270 a pro vazník IPE240. Dále bude záležet na investorovi, které řešení pro něj bude nejvýhodnější.



Graf 4.6 Závislost hmotnosti na podepření konstrukce

Název	komb	prut	V[N]	smyk ú. [N]	posudek smyk	N[N]	norm ú. [N]	M[Nm]	ohyb ú. [Nm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE360	0	1	4483	476227	0.009	14516	293410	22370	239465	0.143	0.00	0.024	0.063
IPE220	0	2	15177	215456	0.070	5246	420794	24649	67069	0.380	0.02	0.040	0.413
IPE360	0	3	4482	476227	0.009	18499	293033	24649	239465	0.166	0.00	0.022	0.131
IPE360	1	1	9521	476227	0.020	30828	293410	47507	239465	0.303	0.00	0.024	0.133
IPE220	1	2	32233	215456	0.150	11142	420794	52353	67069	0.807	0.04	0.040	0.878
IPE360	1	3	9519	476227	0.020	35829	293033	52353	239465	0.341	0.01	0.022	0.278
IPE360	2	1	26632	476227	0.056	10841	1708450	78113	239465	0.333	0.02	0.024	0.701
IPE220	2	2	8451	215456	0.039	3572	784195	16543	67069	0.251	0.00	0.040	0.117
IPE360	2	3	9608	476227	0.020	11361	293033	19203	239465	0.119	0.02	0.022	0.871
IPE360	3	1	21594	476227	0.045	8830	293410	73019	239465	0.335	0.02	0.024	0.772
IPE220	3	2	25507	215456	0.118	2722	420794	44247	67069	0.666	0.02	0.040	0.560
IPE360	3	3	14645	476227	0.031	28691	293033	44247	239465	0.283	0.02	0.022	0.987
IPE360	4	1	20145	476227	0.042	3729	293410	68420	239465	0.298	0.02	0.024	0.674
IPE220	4	2	17763	215456	0.082	5949	420794	22487	67069	0.349	0.01	0.040	0.191
IPE360	4	3	14649	476227	0.031	17462	1708450	27938	239465	0.127	0.02	0.022	0.848
IPE360	5	1	22965	476227	0.048	8084	293410	75957	239465	0.345	0.02	0.024	0.718
IPE220	5	2	8501	215456	0.039	8548	420794	18631	67069	0.298	0.00	0.040	0.070
IPE360	5	3	12555	476227	0.026	7284	1708450	20524	239465	0.090	0.02	0.022	0.895

Tabulka 4.2 vetknutí X kloub

Název	komb	prut	V[N]	smyk ú. [N]	posudek smyk	N[N]	norm ú [N]	M[Nm]	ohyb ú [Nm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE270	0	1	5055	300390	0.017	13742	106088	19741	113740	0.303	0.00	0.024	0.106
IPE240	0	2	13978	259144	0.054	5753	502381	19741	86151	0.241	0.01	0.040	0.369
IPE270	0	3	5054	300390	0.017	16076	125700	19152	113740	0.296	0.00	0.022	0.063
IPE270	1	1	11157	300390	0.037	30329	106088	43566	113740	0.669	0.01	0.024	0.234
IPE240	1	2	30848	259144	0.119	12697	502381	43566	86151	0.531	0.03	0.040	0.814
IPE270	1	3	11154	300390	0.037	33131	125700	42270	113740	0.635	0.00	0.022	0.139
IPE270	2	1	20132	300390	0.067	10710	1079590	40244	113740	0.364	0.02	0.024	0.666
IPE240	2	2	8431	259144	0.033	3334	502381	15162	86151	0.183	0.00	0.040	0.043
IPE270	2	3	16109	300390	0.054	9269	125700	37135	113740	0.400	0.02	0.022	0.772
IPE270	3	1	14030	300390	0.047	7999	106088	27460	113740	0.317	0.01	0.024	0.576
IPE240	3	2	23899	259144	0.092	10215	502381	38280	86151	0.465	0.02	0.040	0.432
IPE270	3	3	22209	300390	0.074	26325	125700	47568	113740	0.628	0.02	0.022	0.730
IPE270	4	1	12595	300390	0.042	2492	106088	27800	113740	0.268	0.01	0.024	0.548
IPE240	4	2	18212	259144	0.070	1990	918850	21341	86151	0.250	0.01	0.040	0.148
IPE270	4	3	22198	300390	0.074	18288	1079590	42670	113740	0.392	0.01	0.022	0.659
IPE270	5	1	15301	300390	0.051	7106	106088	34642	113740	0.372	0.02	0.024	0.646
IPE240	5	2	8404	259144	0.032	901	502381	13961	86151	0.164	0.00	0.040	0.050
IPE270	5	3	20219	300390	0.067	8370	1079590	40771	113740	0.366	0.02	0.022	0.757

Tabulka 4.3 vetknutí X vetknutí



## 5 ZÁVĚR

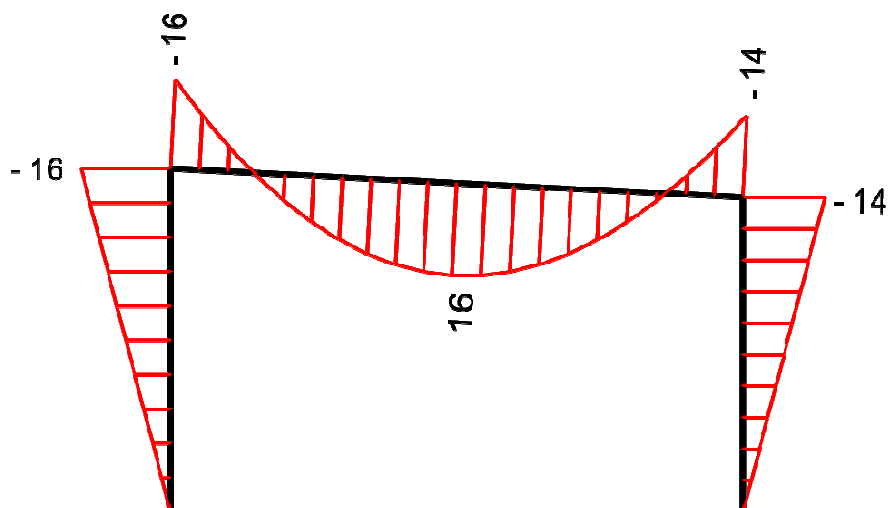
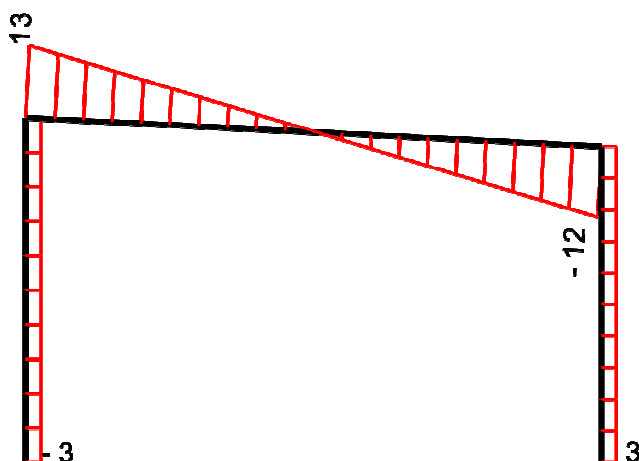
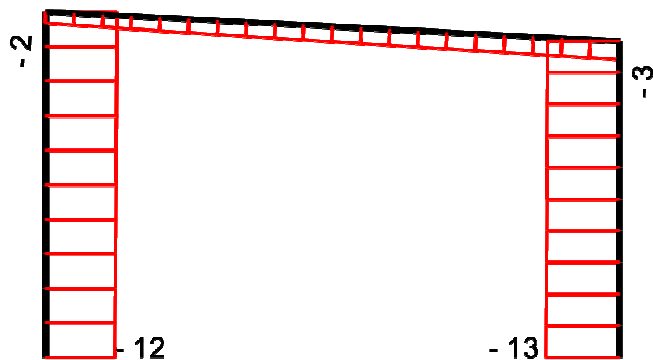
Hlavním úkolem práce bylo propojit teoretickou a praktickou část stavební mechaniky, což se při psaní práce projevilo hlavně díky přímému použití deformační metody na reálné konstrukci použitím vytvořeného programu v jazyce JAVA. Tento program dokázal vykreslit průběhy vnitřních sil v závislosti na kombinacích skutečných zatížení vypočítaných dle normy a následně dokázal posoudit konstrukci na mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Dále by mohl sloužit jako základ pro další, náročnější a komplexní studii. Pro optimální výsledek byly přesně zjištěny kritické síly pro posudek vzpěru pomocí aplikace FyDiK, které byly následně použity v programu. Výsledky byly srovnávány s komerčním statickým programem Scia Engineer, ve kterém se ukázalo jako optimální řešení použití stejného profilu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

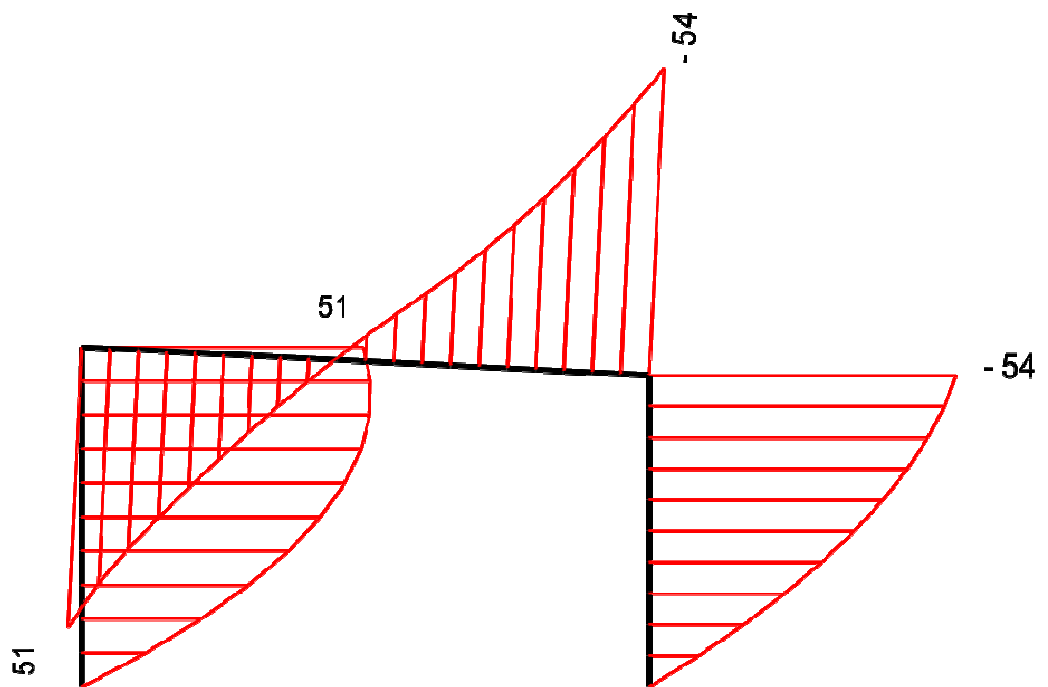
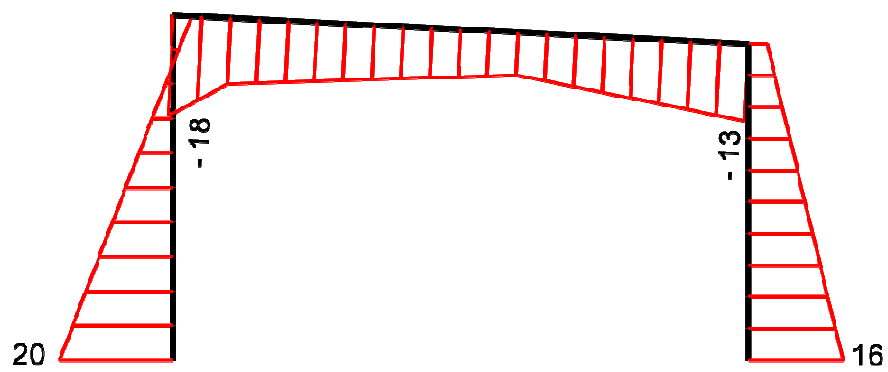
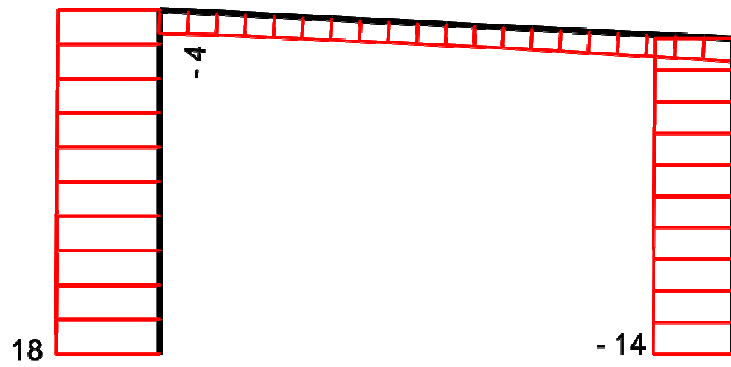
- [1] DOC. ING. PAVEL HEROUT, Ph.D. *Učebnice jazyka JAVA*. Dotisk pátého rozšířeného vydání (České Budějovice): nakladatelství KOPP, 2013, 386 s. ISBN 978-80-7232-398-2
- [2] ING. JIŘÍ KYTÝR, CSc., ING. PETR FRANTÍK, Ph.D.. *Statika II* (Brno) 2006
- [3] DOC. PAVEL MAREK, CSc., A KOLEKTIV. *Kovové konstrukce pozemních staveb*. 1. vydání (Praha):SNTL, 1985, 650 s. ISBN L17-C3-V-31f/78230.
- [4] *Navrhování ocelových konstrukcí, příručka k ČSN EN 1993-1-1*. (Praha):SNTL, 2013, 181 s.
- [5] ČSN – EN 1991-1-4 Zatížení větrem
- [6] ČSN – EN 1991-1-3 Zatížení sněhem
- [7] ING. PETR FRANTÍK, Ph.D., doc. RNDr. JIŘÍ MACUR, CSc. *Kritická síla imperfektovaných systémů* 2006, ISBN 80-02-01827-3

# PŘÍLOHA A: VYKRESLENÍ VNITŘNÍCH SIL

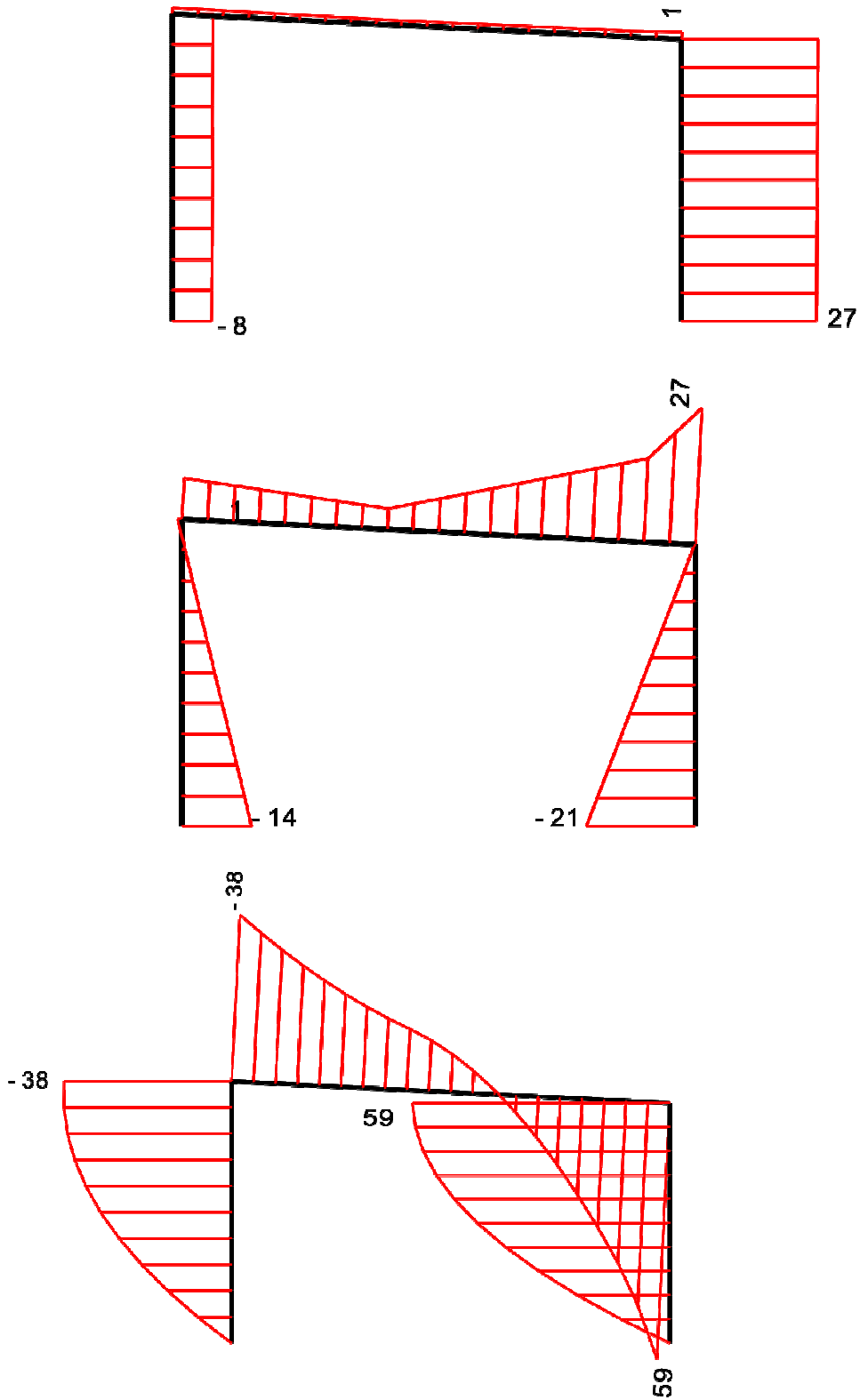
## A.1 ZATÍŽENÍ STÁLÉ – N + V + M



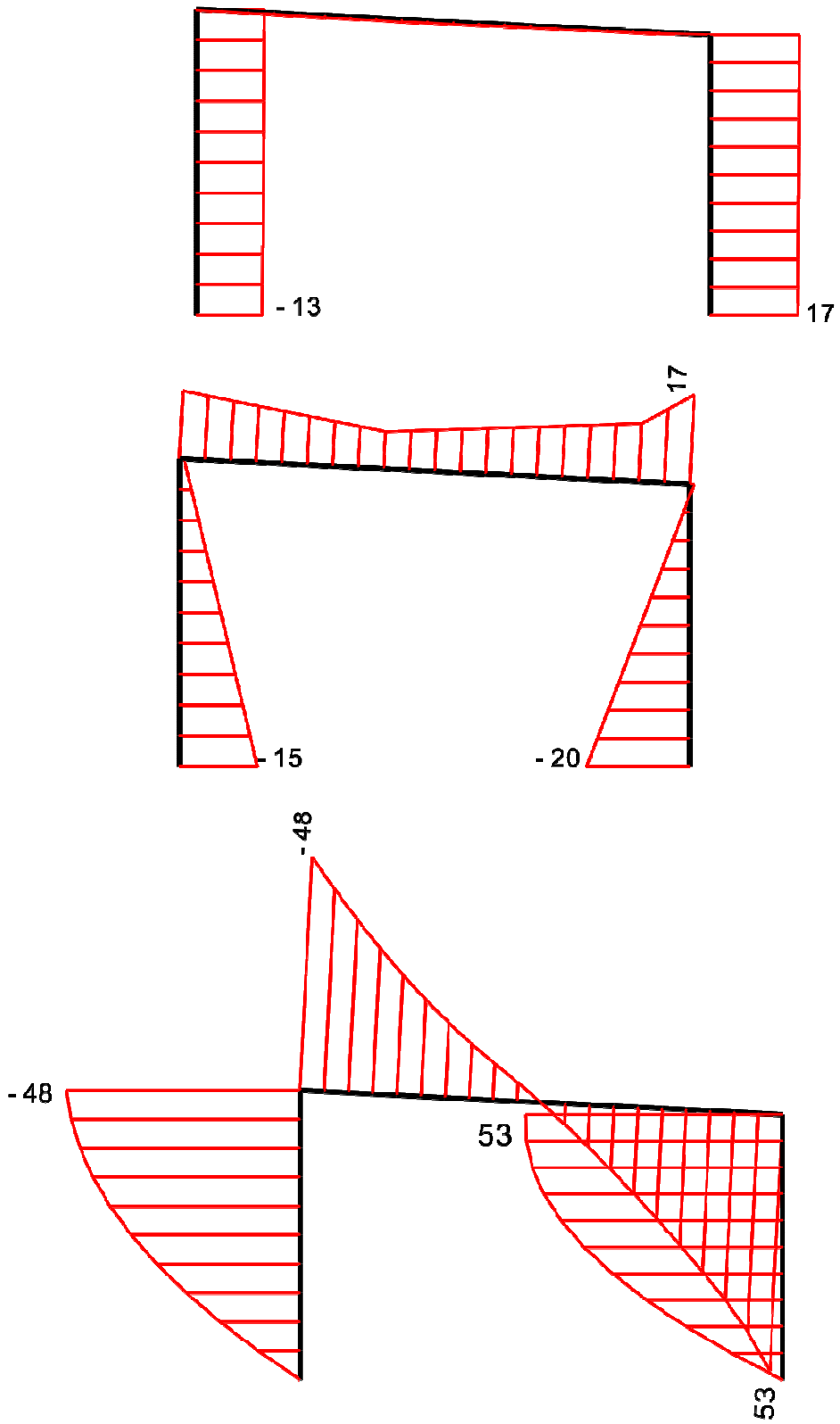
## A.2 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + VÍTR ZLEVA N + V + M



### A.3 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + VÍTR ZPRAVA N + V + M



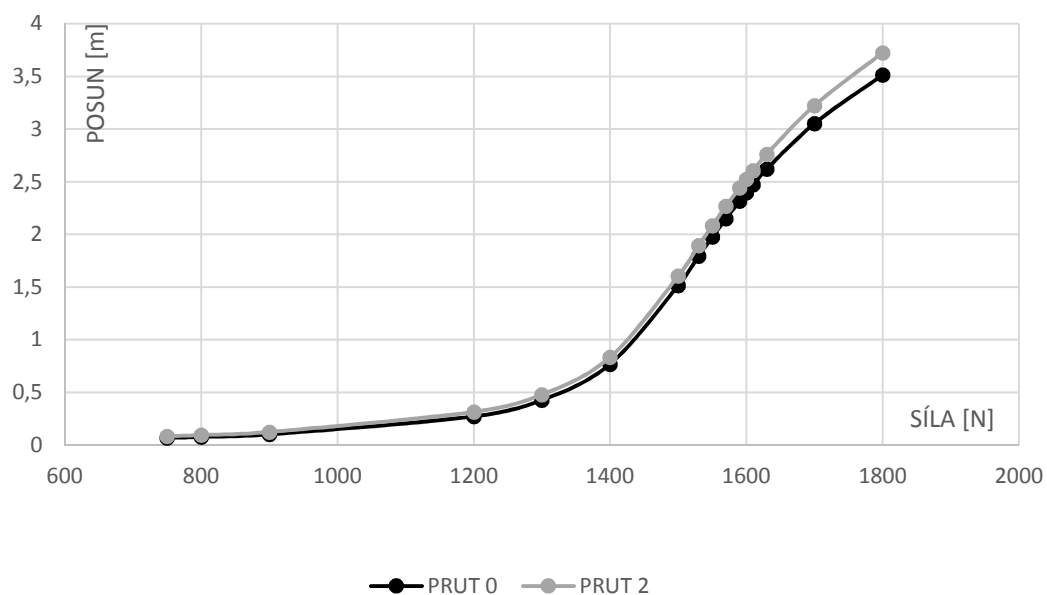
#### A.4 ZATÍŽENÍ STÁLÉ + SNÍH + VÍTR ZPRAVA N + V + M



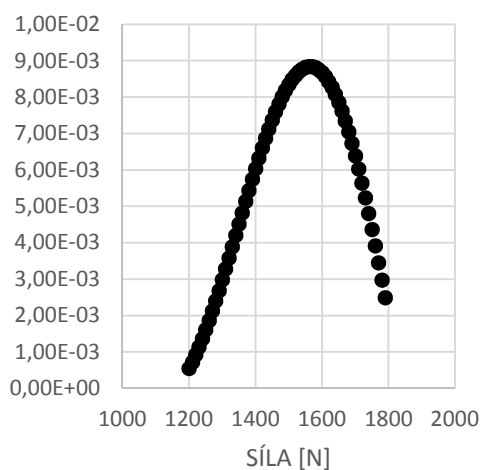
## PŘÍLOHA B: KRITICKÉ SÍLY – KLOUB x KLOUB

### B.1 IPE 80

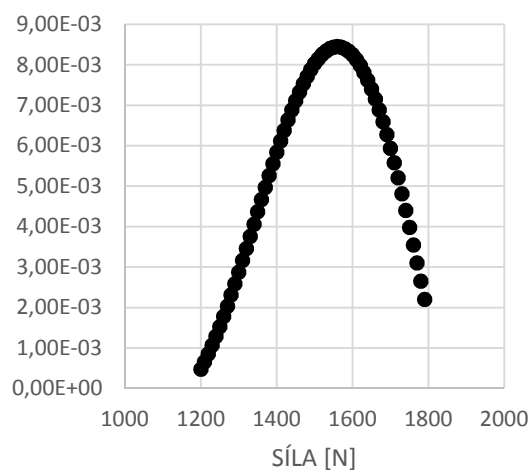
#### ZATĚŽOVACÍ GRAF



#### PRUT 0 INFLEX



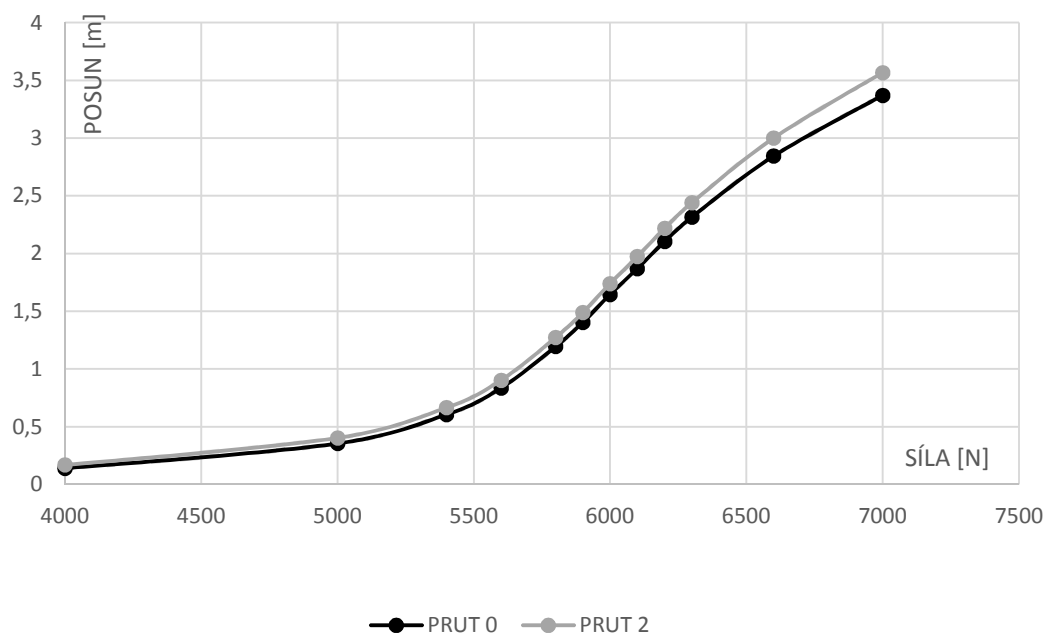
#### PRUT 2 INFLEX



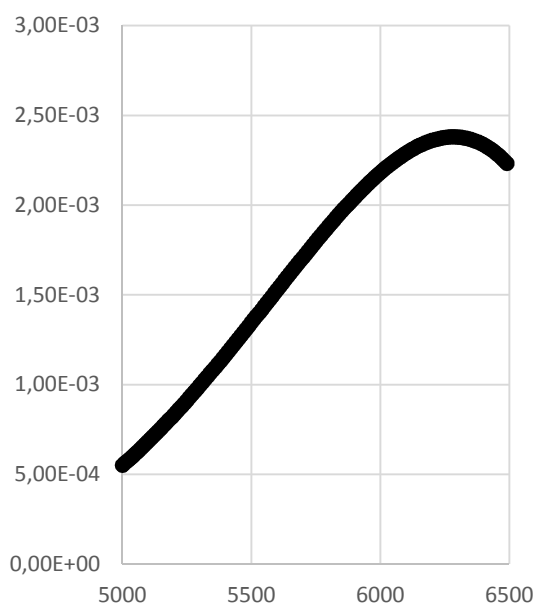
Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE80	2.10E+11	8.01E-07	1564	14.57407	2.429011
	2.10E+11	8.01E-07	1560	14.59274	2.432124

## B.2 IPE 120

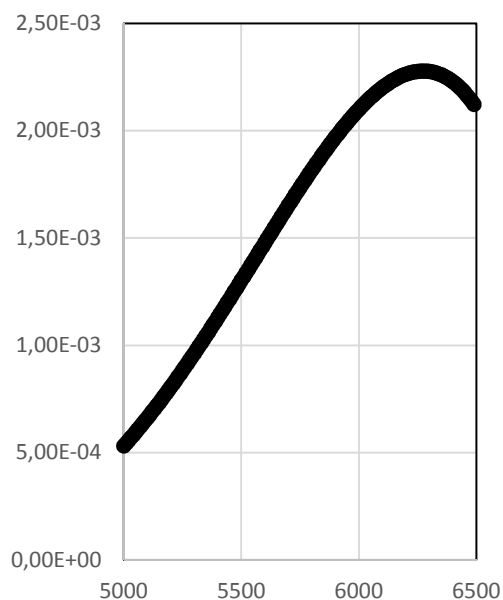
### ZATĚŽOVACÍ GRAF



PRUT 0 INFLEX



PRUT 2 INFLEX

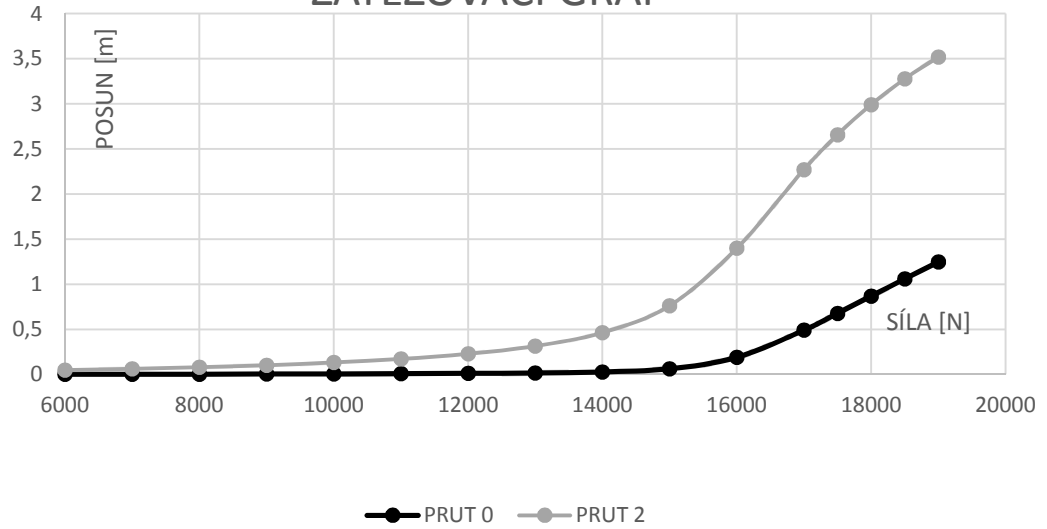


Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE120	2.10E+11	3.18E-06	6283	14.47998	2.41333
	2.10E+11	3.18E-06	6274	14.49036	2.41506

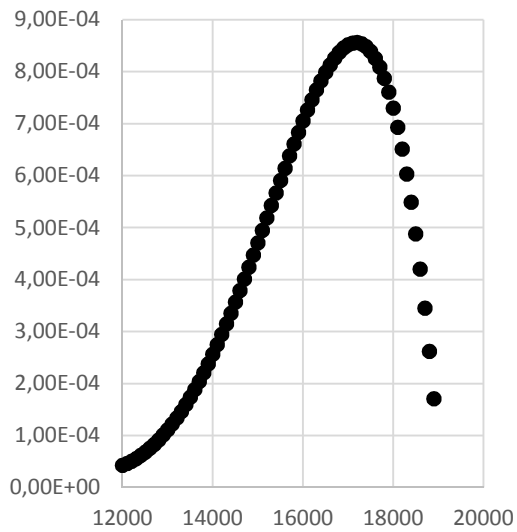


### B.3 IPE 160

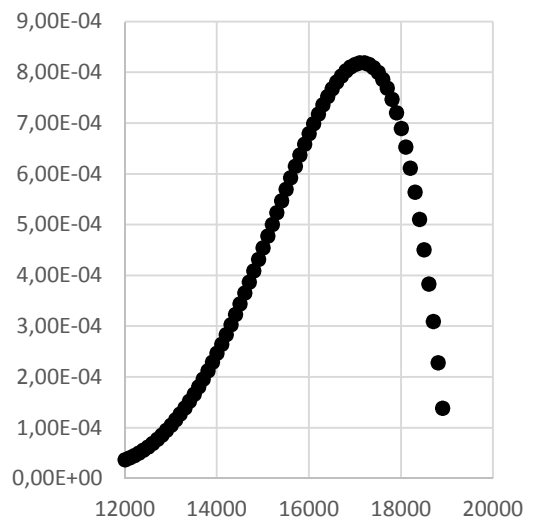
#### ZATĚŽOVACÍ GRAF



#### PRUT 0 INFLEX



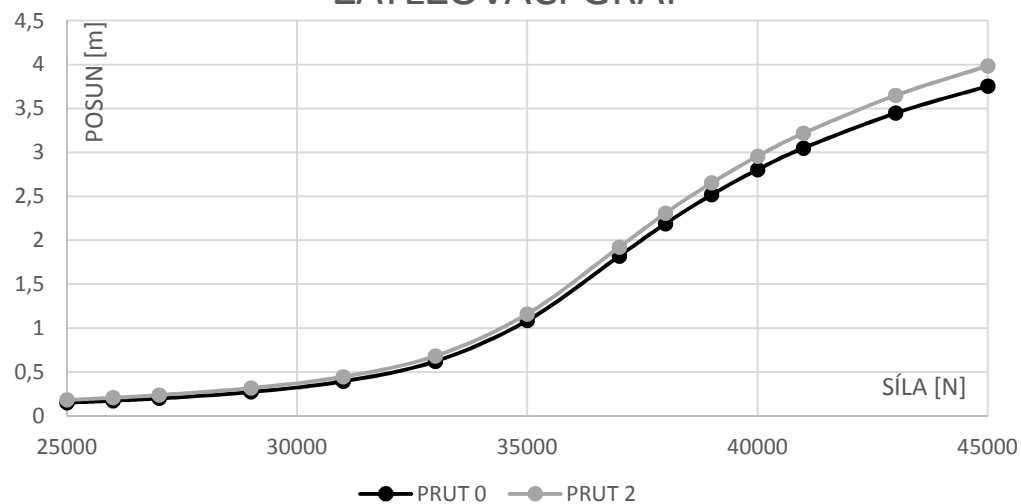
#### PRUT 2 INFLEX



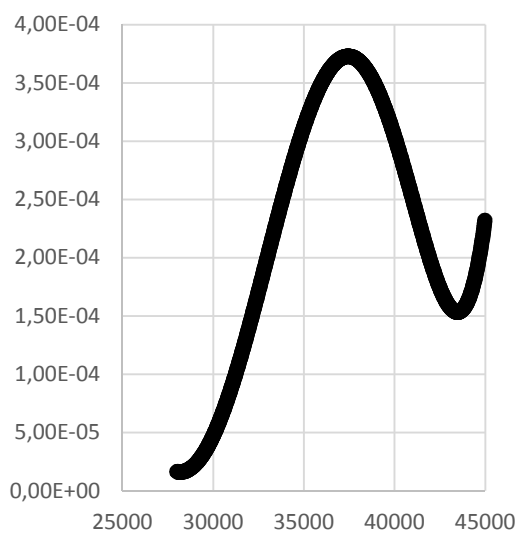
Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE160	2.10E+11	8.69E-06	17175	14.48475	2.414125
	2.10E+11	8.69E-06	17150	14.4953	2.415884

## B.4 IPE 200

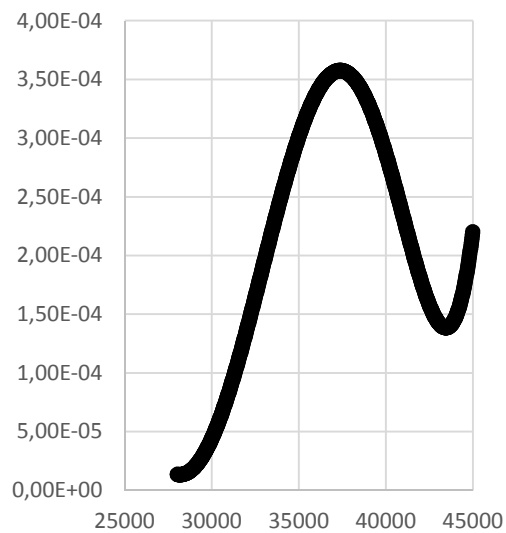
### ZATĚŽOVACÍ GRAF



### PRUT 0 INFLEX

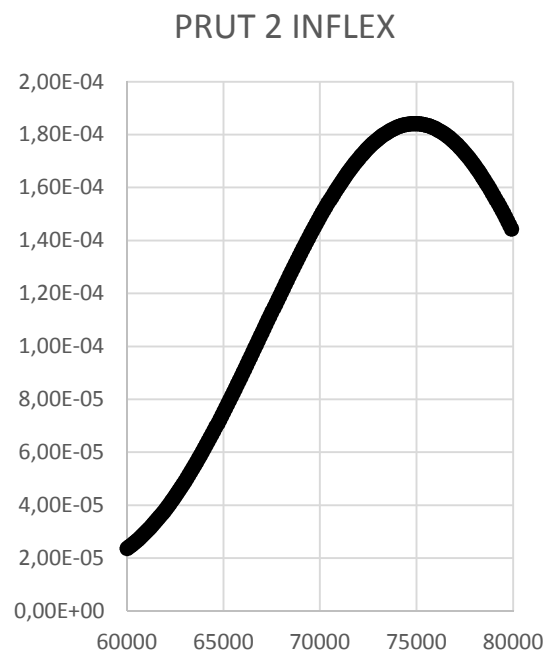
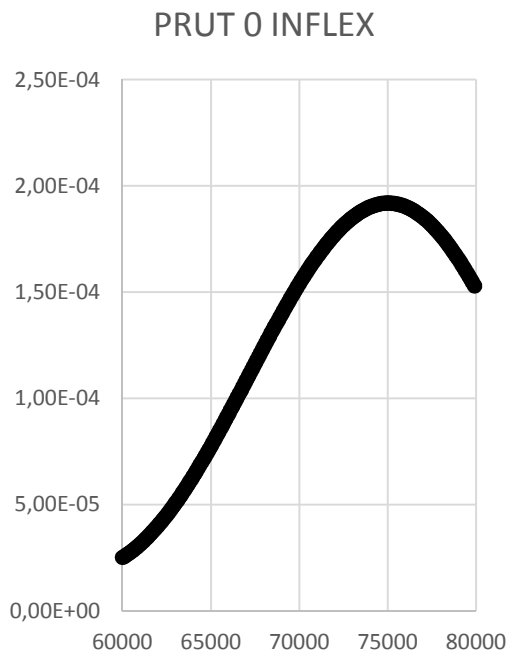
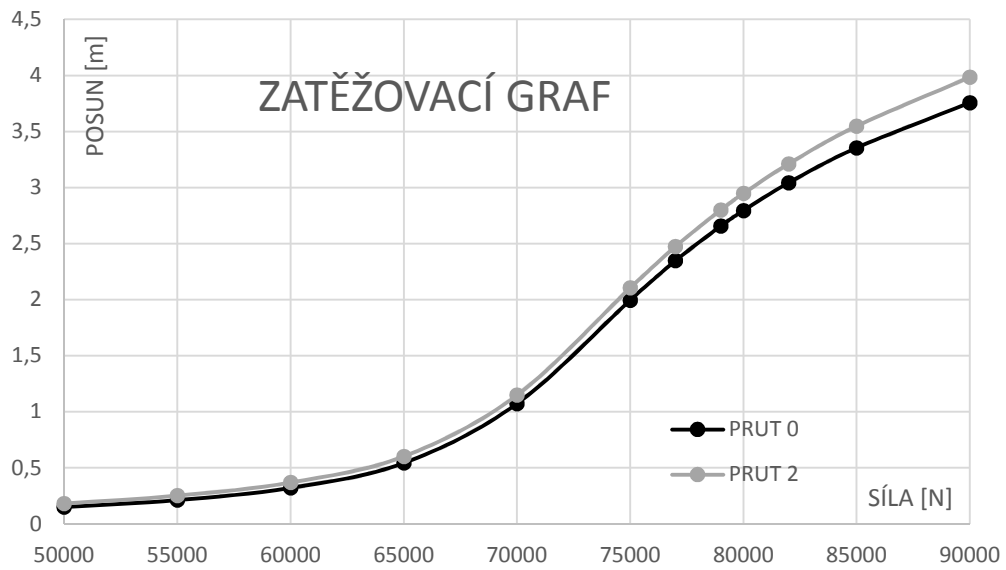


### PRUT 2 INFLEX



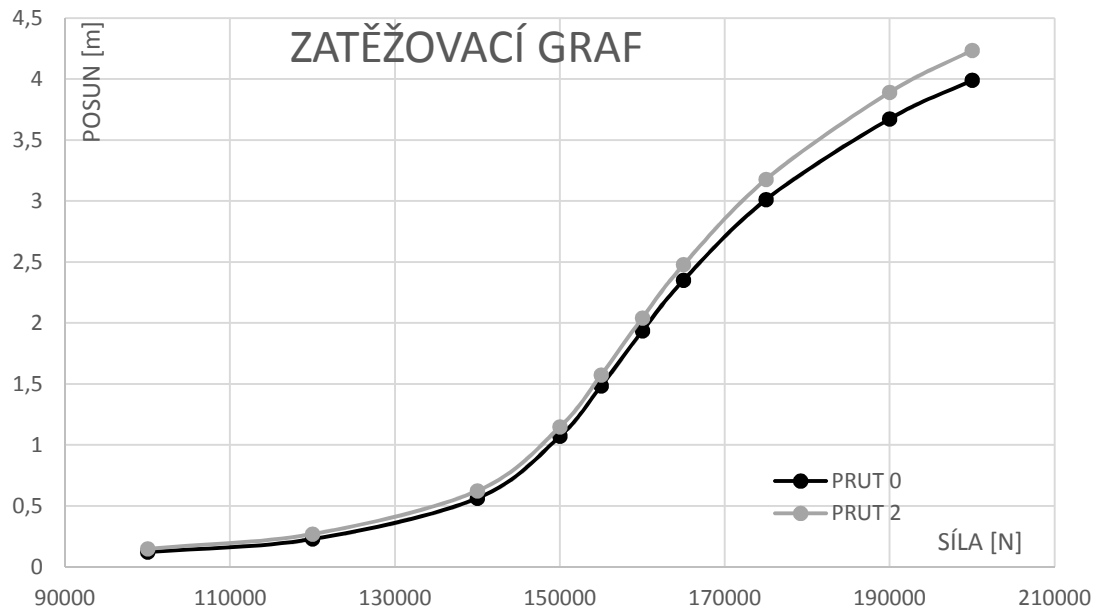
Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE200	2.10E+11	1.94E-05	37432	14.66862	2.444771
	2.10E+11	1.94E-05	37362	14.68236	2.44706

## B.5 IPE 240

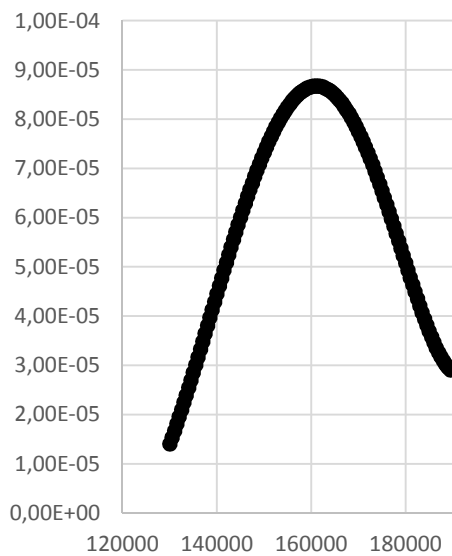


Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE240	2.10E+11	3.89E-05	75017	14.66497	2.444161
	2.10E+11	3.89E-05	74899	14.67651	2.446086

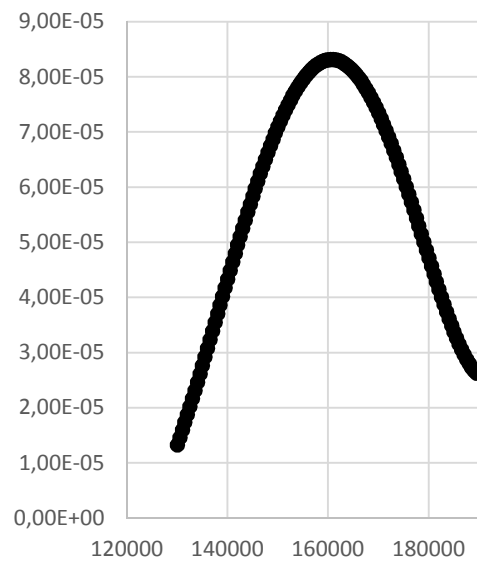
## B.6 IPE 300



**PRUT 0 INFLEX**

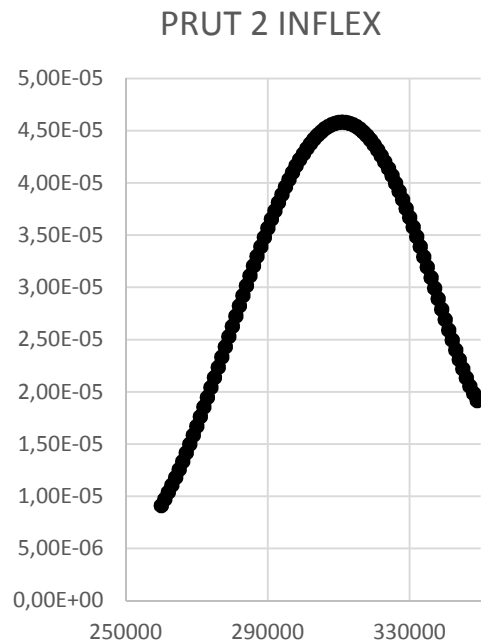
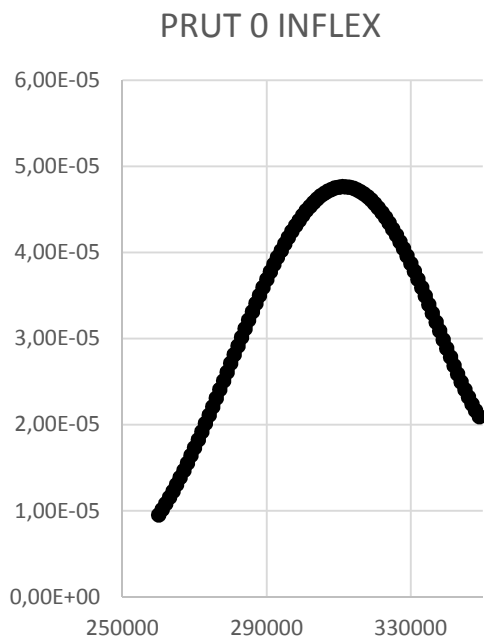
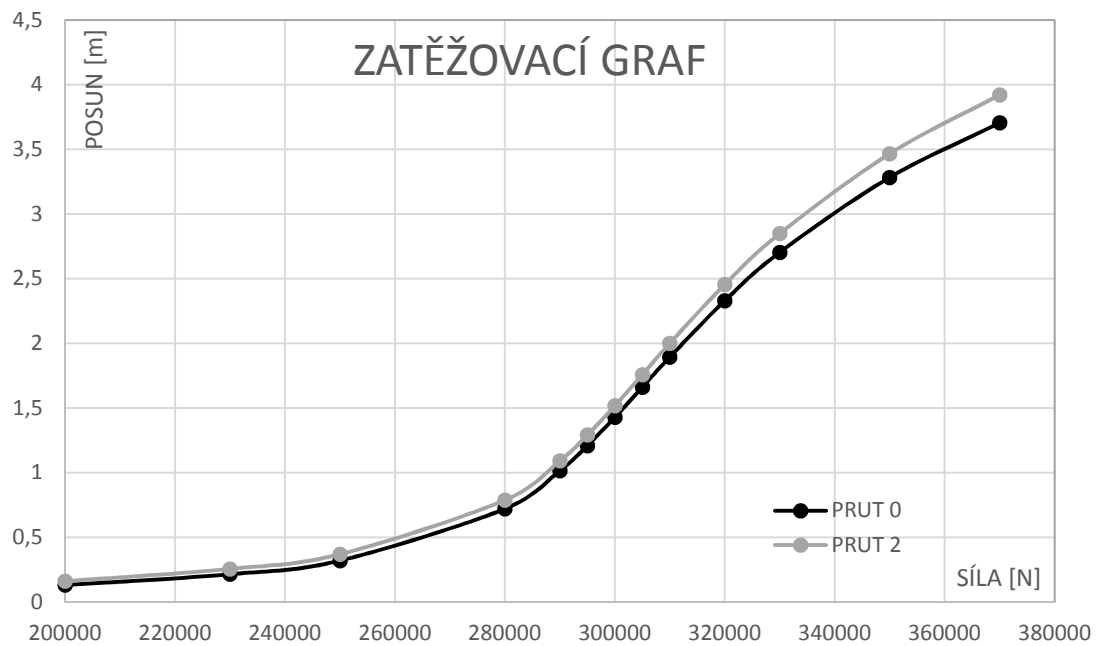


**PRUT 2 INFLEX**



Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE300	2.10E+11	8.36E-05	161059	14.66497	2.444162
	2.10E+11	8.36E-05	160666	14.6829	2.447149

## B.7 IPE 360



Profil	E	I	zatizeni	kr. Delka	Beta
IPE360	2.10E+11	1.63E-04	311392	14.71684	2.452807
	2.10E+11	1.63E-04	310976	14.72668	2.454447

## PŘÍLOHA C: POSUDKY

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE80	0	1	2607	48572	0.054	12460	1545	15641	5457	10.929	0.29	0.024	11.992
	0	2	12575	48572	0.259	3225	28357	16163	5457	3.076	0.82	0.040	20.394
	0	3	2606	48572	0.054	12783	1542	14332	5457	10.919	0.12	0.022	5.580
IPE80	1	1	6126	48572	0.126	29282	1545	36756	5457	25.683	0.68	0.024	28.181
	1	2	29552	48572	0.608	7578	28357	37984	5457	7.228	1.92	0.040	47.927
	1	3	6124	48572	0.126	29603	1542	33680	5457	25.376	0.29	0.022	13.115
IPE80	2	1	19787	48572	0.407	18155	179540	50862	5457	9.422	6.69	0.024	278.881
	2	2	17617	48572	0.363	4138	28357	54193	5457	10.077	0.63	0.040	15.669
	2	3	16453	48572	0.339	13909	1542	54193	5457	18.954	6.97	0.022	316.636
IPE80	3	1	16268	48572	0.335	1333	179540	34455	5457	6.322	6.42	0.024	267.307
	3	2	30029	48572	0.618	8281	28357	73541	5457	13.769	1.00	0.040	24.973
	3	3	19971	48572	0.411	30729	1542	73541	5457	33.411	6.80	0.022	309.102
IPE80	4	1	13563	48572	0.279	8063	1545	38249	5457	12.227	6.02	0.024	250.750
	4	2	26773	48572	0.551	1449	179540	58686	5457	10.763	0.60	0.040	14.905
	4	3	21230	48572	0.437	26812	179540	58686	5457	10.904	6.34	0.022	288.355
	IPE80	5	1	15276	48572	0.314	13171	1545	48455	5457	17.402	6.48	0.024
5		2	17410	48572	0.358	514	28357	53262	5457	9.779	0.47	0.040	11.773
5		3	20244	48572	0.417	17388	179540	53262	5457	9.858	6.79	0.022	308.541

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE100	0	1	2628	68924	0.038	12564	3220	15770	9261	5.605	0.14	0.024	5.663
	0	2	12679	68924	0.184	3251	64520	16297	9261	1.810	0.39	0.040	9.636
	0	3	2627	68924	0.038	13000	3827	14450	9261	4.957	0.06	0.022	2.637
IPE100	1	1	6148	68924	0.089	29385	3220	36885	9261	13.109	0.32	0.024	13.246
	1	2	29656	68924	0.430	7605	64520	38119	9261	4.234	0.90	0.040	22.537
	1	3	6145	68924	0.089	29820	3827	33798	9261	11.442	0.14	0.022	6.167
IPE100	2	1	19765	68924	0.287	18176	242520	50745	9261	5.554	3.13	0.024	130.609
	2	2	17513	68924	0.254	4154	64520	54312	9261	5.929	0.29	0.040	7.285
	2	3	16475	68924	0.239	14125	3827	54312	9261	9.556	3.26	0.022	148.304
IPE100	3	1	16246	68924	0.236	1354	242520	34365	9261	3.716	3.00	0.024	125.188
	3	2	30131	68924	0.437	8308	64520	73659	9261	8.082	0.47	0.040	11.769
	3	3	19993	68924	0.290	30946	3827	73659	9261	16.040	3.19	0.022	144.773
IPE100	4	1	13585	68924	0.197	8166	3220	38365	9261	6.679	2.82	0.024	117.498
	4	2	26671	68924	0.387	1422	242520	58567	9261	6.330	0.28	0.040	6.921
	4	3	21209	68924	0.308	26708	242520	58567	9261	6.434	2.97	0.022	135.101
IPE100	5	1	15297	68924	0.222	13274	3220	48584	9261	9.368	3.04	0.024	126.519
	5	2	17308	68924	0.251	535	64520	53144	9261	5.746	0.22	0.040	5.555
	5	3	20222	68924	0.293	17284	242520	53144	9261	5.809	3.18	0.022	144.556

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE120	0	1	2652	85612	0.031	12675	6170	15909	14272	3.169	0.07	0.024	3.072
	0	2	12791	85612	0.149	3280	91507	16442	14272	1.188	0.21	0.040	5.229
	0	3	2650	85612	0.031	13233	6161	14578	14272	3.169	0.03	0.022	1.431
IPE120	1	1	6171	85612	0.072	29496	6170	37024	14272	7.375	0.17	0.024	7.149
	1	2	29768	85612	0.348	7633	91507	38263	14272	2.764	0.49	0.040	12.170
	1	3	6168	85612	0.072	30053	6161	33925	14272	7.255	0.07	0.022	3.331
IPE120	2	1	19742	85612	0.231	18198	310200	50620	14272	3.606	1.69	0.024	70.219
	2	2	17401	85612	0.203	4172	91507	54439	14272	3.860	0.16	0.040	3.886
	2	3	16498	85612	0.193	14359	6161	54439	14272	6.145	1.75	0.022	79.740
IPE120	3	1	16223	85612	0.189	1376	310200	34268	14272	2.406	1.62	0.024	67.305
	3	2	30241	85612	0.353	8336	91507	73787	14272	5.261	0.26	0.040	6.370
	3	3	20016	85612	0.234	31179	6161	73787	14272	10.231	1.71	0.022	77.841
IPE120	4	1	13608	85612	0.159	8277	6170	38491	14272	4.039	1.52	0.024	63.207
	4	2	26561	85612	0.310	1393	310200	58439	14272	4.099	0.15	0.040	3.687
	4	3	21185	85612	0.247	26597	310200	58439	14272	4.181	1.60	0.022	72.666
IPE120	5	1	15321	85612	0.179	13385	6170	48724	14272	5.583	1.63	0.024	68.057
	5	2	17198	85612	0.201	557	91507	53016	14272	3.721	0.12	0.040	3.010
	5	3	20199	85612	0.236	17173	310200	53016	14272	3.770	1.71	0.022	77.751



Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú [kN]	M[kNm]	ohyb ú [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE140	0	1	2678	103657	0.026	12799	10131	16065	20760	2.037	0.04	0.024	1.822
	0	2	12917	103657	0.125	3312	174498	16604	20760	0.819	0.12	0.040	3.104
	0	3	2676	103657	0.026	13494	12033	14721	20760	1.830	0.02	0.022	0.850
IPE140	1	1	6197	103657	0.060	29621	10131	37180	20760	4.715	0.10	0.024	4.218
	1	2	29893	103657	0.288	7665	174498	38425	20760	1.895	0.29	0.040	7.184
	1	3	6194	103657	0.060	30314	12033	34068	20760	4.160	0.04	0.022	1.966
IPE140	2	1	19716	103657	0.190	18222	386105	50480	20760	2.479	0.99	0.024	41.251
	2	2	17275	103657	0.167	4192	174498	54582	20760	2.653	0.09	0.040	2.262
	2	3	16524	103657	0.159	14620	12033	54582	20760	3.844	1.03	0.022	46.849
IPE140	3	1	16197	103657	0.156	1400	386105	34159	20760	1.649	0.95	0.024	39.539
	3	2	30364	103657	0.293	8368	174498	73929	20760	3.609	0.15	0.040	3.770
	3	3	20042	103657	0.193	31440	12033	73929	20760	6.174	1.01	0.022	45.732
IPE140	4	1	13634	103657	0.132	8402	10131	38632	20760	2.690	0.89	0.024	37.156
	4	2	26438	103657	0.255	1361	386105	58296	20760	2.812	0.09	0.040	2.143
	4	3	21159	103657	0.204	26473	386105	58296	20760	2.877	0.94	0.022	42.709
IPE140	5	1	15347	103657	0.148	13510	10131	48880	20760	3.688	0.96	0.024	40.005
	5	2	17075	103657	0.165	582	174498	52873	20760	2.550	0.07	0.040	1.784
	5	3	20173	103657	0.195	17049	386105	52873	20760	2.591	1.01	0.022	45.696

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE160	0	1	2707	131064	0.021	12941	16761	16243	29117	1.330	0.03	0.024	1.147
	0	2	13060	131064	0.100	3349	217439	16787	29117	0.592	0.08	0.040	1.956
	0	3	2706	131064	0.021	13791	16737	14883	29117	1.335	0.01	0.022	0.535
IPE160	1	1	6226	131064	0.048	29763	16761	37356	29117	3.059	0.06	0.024	2.639
	1	2	30036	131064	0.229	7702	217439	38610	29117	1.361	0.18	0.040	4.498
	1	3	6224	131064	0.047	30611	16737	34230	29117	3.005	0.03	0.022	1.231
IPE160	2	1	19687	131064	0.150	18250	472350	50321	29117	1.767	0.62	0.024	25.684
	2	2	17133	131064	0.131	4214	217439	54744	29117	1.900	0.06	0.040	1.394
	2	3	16553	131064	0.126	14917	16737	54744	29117	2.771	0.64	0.022	29.173
IPE160	3	1	16168	131064	0.123	1429	472350	34035	29117	1.172	0.59	0.024	24.619
	3	2	30504	131064	0.233	8405	217439	74091	29117	2.583	0.09	0.040	2.368
	3	3	20071	131064	0.153	31737	16737	74091	29117	4.441	0.63	0.022	28.477
IPE160	4	1	13664	131064	0.104	8543	16761	38792	29117	1.842	0.56	0.024	23.151
	4	2	26298	131064	0.201	1325	472350	58133	29117	1.999	0.05	0.040	1.319
	4	3	21130	131064	0.161	26331	472350	58133	29117	2.052	0.59	0.022	26.607
IPE160	5	1	15376	131064	0.117	13651	16761	49057	29117	2.499	0.60	0.024	24.925
	5	2	16935	131064	0.129	610	217439	52710	29117	1.813	0.04	0.040	1.122
	5	3	20144	131064	0.154	16907	472350	52710	29117	1.846	0.63	0.022	28.467

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE180	0	1	2738	152637	0.018	13089	24499	16428	39104	0.954	0.02	0.024	0.765
	0	2	13210	152637	0.087	3387	296063	16980	39104	0.446	0.05	0.040	1.306
	0	3	2737	152637	0.018	14102	29081	15053	39104	0.870	0.01	0.022	0.357
IPE180	1	1	6257	152637	0.041	29911	24499	37542	39104	2.181	0.04	0.024	1.749
	1	2	30186	152637	0.198	7740	296063	38803	39104	1.018	0.12	0.040	2.985
	1	3	6254	152637	0.041	30922	29081	34399	39104	1.943	0.02	0.022	0.817
IPE180	2	1	19656	152637	0.129	18280	562825	50154	39104	1.315	0.41	0.024	16.943
	2	2	16983	152637	0.111	4238	296063	54914	39104	1.419	0.04	0.040	0.910
	2	3	16584	152637	0.109	15228	29081	54914	39104	1.928	0.42	0.022	19.247
IPE180	3	1	16137	152637	0.106	1458	562825	33906	39104	0.870	0.39	0.024	16.240
	3	2	30651	152637	0.201	8443	296063	74260	39104	1.928	0.06	0.040	1.576
	3	3	20102	152637	0.132	32048	29081	74260	39104	3.001	0.41	0.022	18.787
IPE180	4	1	13695	152637	0.090	8692	24499	38968	39104	1.351	0.37	0.024	15.284
	4	2	26151	152637	0.171	1286	562825	57962	39104	1.485	0.03	0.040	0.859
	4	3	21099	152637	0.138	26183	562825	57962	39104	1.529	0.39	0.022	17.562
IPE180	5	1	15407	152637	0.101	13800	24499	49244	39104	1.823	0.39	0.024	16.454
	5	2	16788	152637	0.110	640	296063	52539	39104	1.346	0.03	0.040	0.748
	5	3	20113	152637	0.132	16759	562825	52539	39104	1.373	0.41	0.022	18.790

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE200	0	1	2775	189948	0.015	13264	36308	16647	51841	0.686	0.01	0.024	0.526
	0	2	13386	189948	0.070	3432	342828	17207	51841	0.342	0.04	0.040	0.898
	0	3	2773	189948	0.015	14469	36241	15254	51841	0.693	0.01	0.022	0.246
IPE200	1	1	6293	189948	0.033	30086	36308	37760	51841	1.557	0.03	0.024	1.192
	1	2	30362	189948	0.160	7785	342828	39031	51841	0.776	0.08	0.040	2.036
	1	3	6291	189948	0.033	31289	36241	34599	51841	1.531	0.01	0.022	0.557
IPE200	2	1	19619	189948	0.103	18314	669280	49957	51841	0.991	0.28	0.024	11.481
	2	2	16806	189948	0.088	4265	342828	55115	51841	1.076	0.02	0.040	0.608
	2	3	16621	189948	0.088	15595	36241	55115	51841	1.493	0.29	0.022	13.044
IPE200	3	1	16100	189948	0.085	1493	669280	33753	51841	0.653	0.26	0.024	11.005
	3	2	30823	189948	0.162	8488	342828	74460	51841	1.461	0.04	0.040	1.079
	3	3	20138	189948	0.106	32415	36241	74460	51841	2.331	0.28	0.022	12.732
IPE200	4	1	13731	189948	0.072	8866	36308	39188	51841	1.000	0.25	0.024	10.366
	4	2	25979	189948	0.137	1241	669280	57761	51841	1.116	0.02	0.040	0.574
	4	3	21062	189948	0.111	26008	669280	57761	51841	1.153	0.26	0.022	11.909
IPE200	5	1	15444	189948	0.081	13974	36308	49463	51841	1.339	0.27	0.024	11.159
	5	2	16616	189948	0.087	674	342828	52339	51841	1.012	0.02	0.040	0.513
	5	3	20076	189948	0.106	16584	669280	52339	51841	1.034	0.28	0.022	12.740

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú [kN]	M[kNm]	ohyb ú [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE220	0	1	2814	215456	0.013	13452	51228	16883	67069	0.514	0.01	0.024	0.374
	0	2	13576	215456	0.063	3481	420794	17453	67069	0.268	0.03	0.040	0.639
	0	3	2813	215456	0.013	14864	60765	15470	67069	0.475	0.00	0.022	0.175
IPE220	1	1	6333	215456	0.029	30274	51228	37995	67069	1.157	0.02	0.024	0.841
	1	2	30553	215456	0.142	7834	420794	39277	67069	0.604	0.06	0.040	1.438
	1	3	6330	215456	0.029	31685	60765	34815	67069	1.041	0.01	0.022	0.394
IPE220	2	1	19580	215456	0.091	18352	784195	49747	67069	0.765	0.19	0.024	8.045
	2	2	16616	215456	0.077	4295	420794	55331	67069	0.835	0.02	0.040	0.420
	2	3	16660	215456	0.077	15990	60765	55331	67069	1.088	0.20	0.022	9.142
IPE220	3	1	16061	215456	0.075	1530	784195	33589	67069	0.503	0.19	0.024	7.712
	3	2	31010	215456	0.144	8537	420794	74676	67069	1.134	0.03	0.040	0.764
	3	3	20177	215456	0.094	32811	60765	74676	67069	1.653	0.20	0.022	8.923
IPE220	4	1	13771	215456	0.064	9055	51228	39425	67069	0.765	0.17	0.024	7.271
	4	2	25792	215456	0.120	1192	784195	57544	67069	0.860	0.02	0.040	0.396
	4	3	21023	215456	0.098	25820	784195	57544	67069	0.891	0.18	0.022	8.351
IPE220	5	1	15483	215456	0.072	14163	51228	49699	67069	1.017	0.19	0.024	7.826
	5	2	16430	215456	0.076	712	420794	52122	67069	0.779	0.01	0.040	0.365
	5	3	20037	215456	0.093	16396	784195	52137	67069	0.798	0.20	0.022	8.934

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú [kN]	M[kNm]	ohyb ú [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE240	0	1	2860	259144	0.011	13673	72270	17160	86151	0.388	0.01	0.024	0.270
	0	2	13799	259144	0.053	3538	502381	17740	86151	0.213	0.02	0.040	0.463
	0	3	2859	259144	0.011	15328	72158	15724	86151	0.395	0.00	0.022	0.127
IPE240	1	1	6379	259144	0.025	30495	72270	38271	86151	0.866	0.01	0.024	0.603
	1	2	30776	259144	0.119	7891	502381	39565	86151	0.475	0.04	0.040	1.033
	1	3	6376	259144	0.025	32148	72158	35068	86151	0.853	0.01	0.022	0.283
IPE240	2	1	19534	259144	0.075	18396	918850	49526	86151	0.595	0.14	0.024	5.731
	2	2	16393	259144	0.063	4330	502381	55584	86151	0.654	0.01	0.040	0.294
	2	3	16706	259144	0.064	16454	72158	55584	86151	0.873	0.14	0.022	6.513
IPE240	3	1	16015	259144	0.062	1574	918850	33396	86151	0.389	0.13	0.024	5.493
	3	2	31228	259144	0.121	8593	502381	74928	86151	0.887	0.02	0.040	0.552
	3	3	20223	259144	0.078	33274	72158	74928	86151	1.331	0.14	0.022	6.357
IPE240	4	1	13817	259144	0.053	9276	72270	39702	86151	0.589	0.12	0.024	5.185
	4	2	25574	259144	0.099	1135	918850	57290	86151	0.666	0.01	0.040	0.277
	4	3	20976	259144	0.081	25599	918850	57290	86151	0.693	0.13	0.022	5.954
IPE240	5	1	15529	259144	0.060	14384	72270	49976	86151	0.779	0.13	0.024	5.581
	5	2	16211	259144	0.063	756	502381	51868	86151	0.604	0.01	0.040	0.265
	5	3	19991	259144	0.077	16175	918850	51908	86151	0.620	0.14	0.022	6.369

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE270	0	1	2915	300390	0.010	13937	106088	17490	113740	0.285	0.00	0.024	0.185
	0	2	14065	300390	0.047	3606	838281	18083	113740	0.163	0.01	0.040	0.318
	0	3	2914	300390	0.010	15881	125700	16026	113740	0.267	0.00	0.022	0.087
IPE270	1	1	6433	300390	0.021	30759	106088	38600	113740	0.629	0.01	0.024	0.409
	1	2	31042	300390	0.103	7959	838281	39909	113740	0.360	0.03	0.040	0.701
	1	3	6431	300390	0.021	32702	125700	35369	113740	0.571	0.00	0.022	0.192
IPE270	2	1	19479	300390	0.065	18448	1079590	49262	113740	0.450	0.09	0.024	3.849
	2	2	16127	300390	0.054	4372	838281	55886	113740	0.497	0.01	0.040	0.193
	2	3	16761	300390	0.056	17007	125700	55886	113740	0.627	0.10	0.022	4.375
IPE270	3	1	15961	300390	0.053	1626	1079590	33166	113740	0.293	0.09	0.024	3.689
	3	2	31489	300390	0.105	8661	838281	75229	113740	0.672	0.02	0.040	0.376
	3	3	20278	300390	0.068	33828	125700	75229	113740	0.931	0.09	0.022	4.270
IPE270	4	1	13872	300390	0.046	9539	106088	40033	113740	0.442	0.08	0.024	3.487
	4	2	25313	300390	0.084	1067	1079590	56986	113740	0.502	0.01	0.040	0.182
	4	3	20921	300390	0.070	25335	1079590	56986	113740	0.524	0.09	0.022	4.003
IPE270	5	1	15585	300390	0.052	14648	106088	50307	113740	0.580	0.09	0.024	3.753
	5	2	15951	300390	0.053	808	838281	51565	113740	0.454	0.01	0.040	0.182
	5	3	19935	300390	0.066	15911	1079590	51636	113740	0.469	0.09	0.022	4.282

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE300	0	1	2978	348419	0.009	14240	153530	17869	147674	0.214	0.00	0.024	0.131
	0	2	14371	348419	0.041	3684	1041980	18478	147674	0.129	0.01	0.040	0.225
	0	3	2977	348419	0.009	16518	153166	16374	147674	0.219	0.00	0.022	0.061
IPE300	1	1	6496	348419	0.019	31062	153530	38978	147674	0.466	0.01	0.024	0.286
	1	2	31348	348419	0.090	8037	1041980	40305	147674	0.281	0.02	0.040	0.491
	1	3	6494	348419	0.019	33338	153166	35716	147674	0.460	0.00	0.022	0.134
IPE300	2	1	19416	348419	0.056	18508	1264535	48959	147674	0.346	0.06	0.024	2.666
	2	2	15821	348419	0.045	4420	1041980	56233	147674	0.385	0.01	0.040	0.131
	2	3	16824	348419	0.048	17644	153166	56233	147674	0.496	0.07	0.022	3.031
IPE300	3	1	15898	348419	0.046	1686	1264535	32901	147674	0.224	0.06	0.024	2.555
	3	2	31788	348419	0.091	8739	1041980	75575	147674	0.520	0.01	0.040	0.265
	3	3	20341	348419	0.058	34464	153166	75575	147674	0.737	0.07	0.022	2.958
IPE300	4	1	13936	348419	0.040	9843	153530	40414	147674	0.338	0.06	0.024	2.419
	4	2	25014	348419	0.072	988	1264535	56637	147674	0.384	0.00	0.040	0.123
	4	3	20858	348419	0.060	25032	1264535	56637	147674	0.403	0.06	0.022	2.775
IPE300	5	1	15648	348419	0.045	14951	153530	50688	147674	0.441	0.06	0.024	2.603
	5	2	15651	348419	0.045	868	1041980	51216	147674	0.348	0.01	0.040	0.129
	5	3	19872	348419	0.057	15608	1264535	51322	147674	0.360	0.07	0.022	2.969



Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú [kN]	M[kNm]	ohyb ú [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE330	0	1	3049	418022	0.007	14580	455791	18294	189011	0.129	0.00	0.024	0.095
	0	2	14714	418022	0.035	3772	763777	18919	189011	0.105	0.01	0.040	0.164
	0	3	3048	418022	0.007	17230	455791	16763	189011	0.126	0.00	0.022	0.045
IPE330	1	1	6567	418022	0.016	31401	455791	39401	189011	0.277	0.00	0.024	0.205
	1	2	31690	418022	0.076	8124	763777	40748	189011	0.226	0.01	0.040	0.353
	1	3	6564	418022	0.016	34050	455791	36103	189011	0.266	0.00	0.022	0.097
IPE330	2	1	19345	418022	0.046	18576	1471335	48620	189011	0.270	0.05	0.024	1.892
	2	2	15500	418022	0.037	4474	763777	56622	189011	0.305	0.00	0.040	0.090
	2	3	16895	418022	0.040	18356	455791	56622	189011	0.340	0.05	0.022	2.151
IPE330	3	1	15827	418022	0.038	1754	1471335	32606	189011	0.174	0.04	0.024	1.813
	3	2	32124	418022	0.077	8827	763777	75962	189011	0.413	0.01	0.040	0.192
	3	3	20411	418022	0.049	35176	455791	75962	189011	0.479	0.05	0.022	2.099
IPE330	4	1	14007	418022	0.034	10182	455791	40840	189011	0.238	0.04	0.024	1.719
	4	2	24678	418022	0.059	901	1471335	56247	189011	0.298	0.00	0.040	0.085
	4	3	20787	418022	0.050	24693	1471335	56247	189011	0.314	0.04	0.022	1.972
IPE330	5	1	15719	418022	0.038	15290	455791	51113	189011	0.304	0.04	0.024	1.850
	5	2	15337	418022	0.037	936	763777	51113	189011	0.272	0.00	0.040	0.094
	5	3	19801	418022	0.047	15269	1471335	50971	189011	0.280	0.05	0.022	2.109

Název	komb	prut	V[kN]	smyk ú. [kN]	posudek smyk	N[kN]	norm ú. [kN]	M[kNm]	ohyb ú. [kNm]	posudek	u/w [m]	mezni u/w [m]	posudek u/w
IPE360	0	1	3130	476227	0.007	14969	293410	18781	239465	0.129	0.00	0.024	0.070
	0	2	15106	476227	0.032	3872	1465601	19425	239465	0.084	0.00	0.040	0.122
	0	3	3129	476227	0.007	18046	293033	17209	239465	0.133	0.00	0.022	0.033
IPE360	1	1	6648	476227	0.014	31790	293410	39886	239465	0.275	0.00	0.024	0.150
	1	2	32083	476227	0.067	8224	1465601	41256	239465	0.178	0.01	0.040	0.259
	1	3	6645	476227	0.014	34867	293033	36548	239465	0.272	0.00	0.022	0.071
IPE360	2	1	19264	476227	0.040	18653	1708450	48231	239465	0.212	0.03	0.024	1.365
	2	2	15885	476227	0.033	4575	1465601	57067	239465	0.241	0.00	0.040	0.063
	2	3	16976	476227	0.036	19172	293033	57067	239465	0.304	0.03	0.022	1.553
IPE360	3	1	15747	476227	0.033	1831	1708450	32267	239465	0.136	0.03	0.024	1.309
	3	2	32508	476227	0.068	8927	1465601	76406	239465	0.325	0.01	0.040	0.141
	3	3	20492	476227	0.043	35993	293033	76406	239465	0.442	0.03	0.022	1.515
IPE360	4	1	14088	476227	0.030	10571	293410	41329	239465	0.209	0.03	0.024	1.243
	4	2	24294	476227	0.051	839	1708450	55799	239465	0.234	0.00	0.040	0.059
	4	3	20705	476227	0.043	24304	1708450	55799	239465	0.247	0.03	0.022	1.425
IPE360	5	1	15800	476227	0.033	15679	293410	51601	239465	0.269	0.03	0.024	1.337
	5	2	15730	476227	0.033	1013	1465601	51601	239465	0.216	0.00	0.040	0.070
	5	3	19720	476227	0.041	14880	1708450	50569	239465	0.220	0.03	0.022	1.524