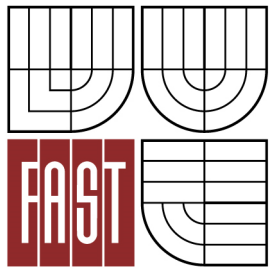




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

VLIV TUHOSTI SPOJŮ NA NAMÁHÁNÍ OCELOVÝCH PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍ

INFLUENCE OF STIFFNESS CONNECTIONS ON LOADING OF STEEL STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN ŠIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ NEVAŘIL, Ph.D.

BRNO 2015



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 Jan Šik

Název Vliv tuhosti spojů na namáhání ocelových prutových konstrukcí

Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.

**Datum zadání
bakalářské práce** 30. 11. 2014

**Datum odevzdání
bakalářské práce** 29. 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

ČSN EN 1991 Zatížení konstrukcí

ČSN EN 1993 Navrhování ocelových konstrukcí

ANSYS Users Manual Rev. 15.0

Zásady pro vypracování

Cílem práce je vypracovat MKP model v prostředí SW ANSYS a posoudit kvalitativní rozdíly v jednotlivých zvolených přístupech k modelování spojů ocelové konstrukce na vybraných jednoduchých příkladech. Student bude spoje navrhovat dle pravidel Eurokódů.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).
- 3.

.....

Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analýzu skutečného chování styčnicků ocelových prutových konstrukcí. V úvodních kapitolách jsou popsány jednotlivé přístupy k modelování styčnicků. První přístup je založen na algoritmech dle norem ČSN EN. Druhý přístup využívá numerický model řešený metodou konečných prvků (MKP) v systému ANSYS. Na závěr je provedeno porovnání výsledků jednotlivých přístupů k modelování styčnicků.

Klíčová slova

Spoje ocelových konstrukcí, statická analýza, MKP, ANSYS, rotační tuhost

Abstract

The given bachelor thesis focuses on the analysis of the real behavior of the joints in steel structures. The introduction describes different approaches to the modeling of joints. The first approach is based on algorithms found in normative documents ČSN EN. The other approach deals with numerical modeling of the joints using the finite element method (FEM) in SW ANSYS. In conclusion, the comparison of results of different approaches to the modeling of joints.

Keywords

Connections of steel structures, static analysis, FEM, ANSYS, rotational stiffness

Bibliografická citace VŠKP

Jan Šik *Vliv tuhosti spojů na namáhání ocelových prutových konstrukcí*. Brno, 2015. 68 s., 16 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 28. 5. 2015

.....
podpis autora
Jan Šik

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Nevařilovi, Ph. D. za odborné vedení práce, připomínky, užitečné rady a za bližší seznámení s programem ANSYS. Dále děkuji Ing. Michalu Štrbovi, Ph. D. za rady při navrhování ocelových konstrukcí.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 STYČNÍKY V OCELOVÝCH PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍCH.....	11
1.1 MATERIÁL STYČNÍKŮ.....	11
1.2 PRACOVNÍ DIAGRAM STYČNÍKU	13
2 ŘEŠENÍ OCELOVÝCH SPOJŮ DLE EUROKÓDŮ.....	14
2.1 METODA KOMPONENTŮ	14
2.2 ROTAČNÍ TUHOST.....	14
2.2.1 <i>Předběžný návrh tuhosti styčnicku.....</i>	<i>15</i>
2.2.2 <i>Postup výpočtu rotační tuhosti styčnicku nosníku se sloupem.....</i>	<i>16</i>
2.2.3 <i>Postup výpočtu rotační tuhosti kotvení sloupu.....</i>	<i>18</i>
2.2.4 <i>Postup výpočtu návrhové momentové únosnosti kotvení sloupu.....</i>	<i>18</i>
2.3 PRUŽNÁ GLOBÁLNÍ ANALÝZA	19
2.3.1 <i>Klasifikace podle tuhosti.....</i>	<i>20</i>
3 ŘEŠENÍ OCELOVÝCH SPOJŮ V PROSTŘEDÍ SW ANSYS.....	22
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	22
3.2 STRUKTURA SW ANSYS	23
3.3 PRVKY – ELEMENTS	23
3.3.1 <i>Element type.....</i>	<i>24</i>
3.3.2 <i>Real constants.....</i>	<i>24</i>
3.3.3 <i>Material properties</i>	<i>24</i>
3.3.4 <i>Sections</i>	<i>24</i>
3.3.5 <i>SHELL181.....</i>	<i>25</i>
3.3.6 <i>SOLID185</i>	<i>26</i>
3.3.7 <i>LINK180.....</i>	<i>27</i>
3.3.8 <i>CONTA174.....</i>	<i>28</i>
3.3.9 <i>TARGE170.....</i>	<i>29</i>
3.4 KONTAKTNÍ ÚLOHY	30
3.5 OPERACE S KONTAKTNÍMI PRVKY.....	31
3.5.1 <i>Nastavení vlastností kontaktních prvků.....</i>	<i>31</i>
3.5.2 <i>Nastavení reálných konstant kontaktních prvků.....</i>	<i>32</i>
4 STYČNÍK NOSNÍKU SE SLOUPEM	33
4.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ A NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ	33
4.2 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY A GEOMETRIE KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ.....	33
4.3 PRUŽNÁ GLOBÁLNÍ ANALÝZA	34
4.3.1 <i>Namáhání šroubů.....</i>	<i>34</i>
4.3.2 <i>Rotační tuhost styčnicku.....</i>	<i>35</i>
4.4 NUMERICKÁ ANALÝZA V SW ANSYS.....	36
5 KOTVENÍ SLOUPU.....	39
5.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ A NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ	39
5.2 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY A GEOMETRIE KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ.....	39
5.3 PRUŽNÁ GLOBÁLNÍ ANALÝZA	40
5.3.1 <i>Namáhání šroubů.....</i>	<i>40</i>
5.3.2 <i>Rotační tuhost.....</i>	<i>41</i>
5.4 NUMERICKÁ ANALÝZA V SW ANSYS.....	41
6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	43
6.1 STYČNÍK NOSNÍKU SE SLOUPEM	43
6.1.1 <i>Namáhání šroubů.....</i>	<i>43</i>
6.1.2 <i>Rotační tuhost styčnicku.....</i>	<i>47</i>
6.1.3 <i>Vliv tloušťky čelní desky na rotační tuhosti styčnicku.....</i>	<i>51</i>
6.2 KOTVENÍ SLOUPU.....	53
6.2.1 <i>Oblast kontaktu</i>	<i>53</i>

6.2.2	<i>Namáhání šroubů</i>	55
6.2.3	<i>Rotační tuhost kotvení</i>	56
ZÁVĚR		59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		61
SEZNAM TABULEK		62
SEZNAM OBRÁZKŮ		63
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		64
SEZNAM PŘÍLOH		68

ÚVOD

Cílem práce je podrobná analýza ocelových spojů prutových konstrukcí. Bude provedena analýza dvou ocelových spojů: šroubovaný přípoj konzoly na sloup a kotvení sloupu s patním plechem a kotevními šrouby do betonové patky. Spoje jsou navrženy dle pravidel Eurokódů.

Provedu analýzu skutečného chování styčnicku. V běžné praxi se uvažuje v globální analýze konstrukce s kloubovým nebo tuhým chováním. Tuhé styčnický přenáší veškerý ohybový moment. Kloubové styčnický umožňují natočení a nepřenášejí žádný moment. Někdy se počítá i s polotuhými styčnický, jejichž působení se nejvíce podobá skutečnému chování styčnicků. U polotuhých styčnicků musíme v globální analýze počítat s jejich rotační tuhostí. Pro analýzu konstrukce s polotuhým styčnickem je potřeba sestavit pracovní diagram styčnicku.

Spoje budou modelovány dvěma způsoby. Prvním přístupem je lineární pružnostní analýza vycházející z normativních předpisů [1] a [2]. Metoda počítá s lineárním chováním materiálu a s ideální geometrií konstrukce. Avšak toto chování neplatí v místech styčnicků, kde je průběh napětí v průřezu nepravidelný. Většina jevů v oblasti styčnicků je nelineární povahy např. plastizování materiálu plechů, kontakty mezi čelními deskami nebo mezi patními deskami a betonovým základem, rozdělení tahových sil ve šroubech a další. Z toho důvodu druhým zvoleným přístupem je řešení konstrukcí styčnicků numerickou metodou. Konkrétně metodou konečných prvků v prostředí SW ANSYS, ve kterém modeluji reálné chování styčnicku. Při práci se softwarem využívám znalostí z kurzu BD91 – Základy práce v prostředí ANSYS Classic.

Abych prokázal velikost vlivu tuhosti spojů na namáhání konstrukce, budu porovnávat kvalitativní rozdíly mezi zvolenými přístupy modelování.

1 STYČNÍKY V OCELOVÝCH PRUTOVÝCH KONSTRUKCÍCH

Tuhost styčnicků výrazně ovlivňuje rozdělení vnitřních sil v konstrukci. Rozdělení vnitřních sil má vliv na množství použitého materiálu. Tím pádem můžu, správným nadimenzováním styčnicku, navrhnout ekonomičtější konstrukci.

V ocelových prutových konstrukcích se používá mnoho druhů styčnicků. Styčnický se mezi sebou liší použitými profily, použitými spojovacími prvky, tvarem a konstrukčním uspořádáním. Všechny tyto odlišnosti mají vliv na vlastnosti styčnicku. Hlavní vlastností styčnicku je jeho rotační tuhost, rotační kapacita a momentová únosnost. Tyto vlastnosti jsou zásadní při určení rozdělení vnitřních sil a deformací na konstrukci. Vliv chování styčnicku na rozložení vnitřních sil a momentů v konstrukci a na celkovou deformaci konstrukce se má obecně uvažovat. Tento vliv lze zanedbat, pokud je dostatečně malý [1].

Z hlediska globální pružné analýzy, kterou jsem při modelování zvolil, lze styčnický dělit na tuhé, polotuhé a kloubové. Tuhé styčnický přenášejí veškerý moment mezi připojovanými prvky a nepřipouštějí pootočení mezi těmito prvky. Kloubové připojení připouští jakékoliv pootočení a nepřenáší žádné ohybové momenty. Polotuhé styčnický jsou z hlediska klasifikace mezi těmito dvěma případy. Chování polotuhých styčnicků je nutné uvažovat při globální analýze konstrukce.

Pokud provádíme analýzu styčnicku podle normativních dokumentů, dělíme konstrukci styčnicku na jednotlivé základní komponenty, jejichž vlastnosti se vzájemně propojují a mají celkový vliv na chování styčnicku. Pokud analýzu provádíme pomocí numerického modelu, lze styčnický efektivně modelovat vhodnými konečnými prvky. Je nutné volit konečné prvky tak, aby se jejich vlastnosti blížily reálným vlastnostem jednotlivých částí styčnicku.

1.1 Materiál styčnicků

Materiál styčnicků řešených v této práci je z oceli S235. Vyznačuje se mezí kluzu $f_y = 235 \text{ MPa}$ a mezí pevnosti $f_u = 360 \text{ MPa}$. Ocel je homogenní izotropní látka. Izotropní materiál je charakteristický stejnými vlastnostmi ve všech směrech. Ocel má krystalickou strukturu. Pro izotropní látky platí:

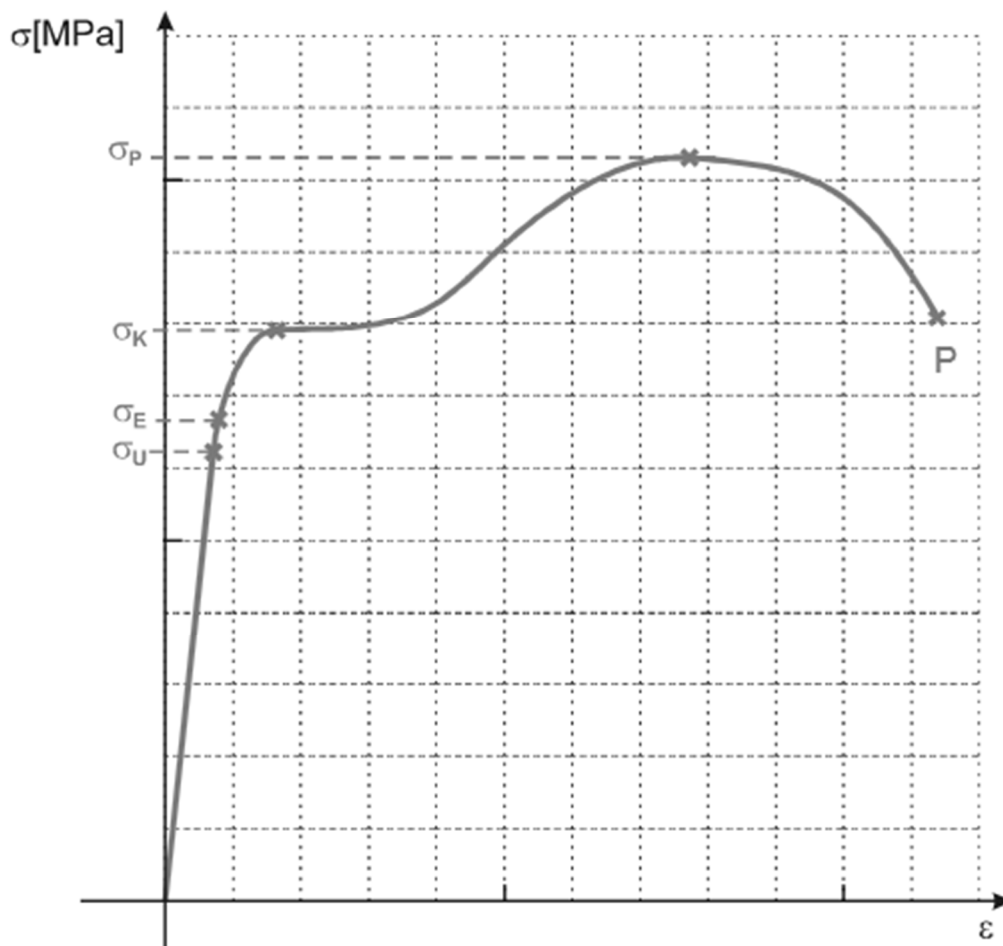
$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} , \quad (1.1)$$

kde $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ je Youngův modul pružnosti v tahu i tlaku,
 $G = 8,1 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ modul pružnosti ve smyku,
 $\nu = 0,3$ Poissonovo číslo, součinitel příčné roztažnosti,
 $\rho = 7850 \text{ kgm}^{-3}$ objemová hmotnost.

Materiál základové patky, která se vyskytuje v jednom z řešených příkladů, je z železobetonu. Vlastnosti betonu jsou dány jeho složením, způsobem výroby, zhutňováním, ošetřováním a mnoha dalšími faktory. Beton v této práci má označení C 16/20 a platí pro něj:

- $E_{cm} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ Youngův modul pružnosti,
- $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$ charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku,
- $\nu = 0,2$ Poissonovo číslo, součinitel příčné roztažnosti.

Stěžejní mechanické vlastnosti oceli jsou jeho pružnost, pevnost a plasticita. Všechny tyto vlastnosti se dají vyjádřit pomocí pracovního diagramu oceli (obr. 1.1), který zobrazuje závislost napětí na deformaci oceli.



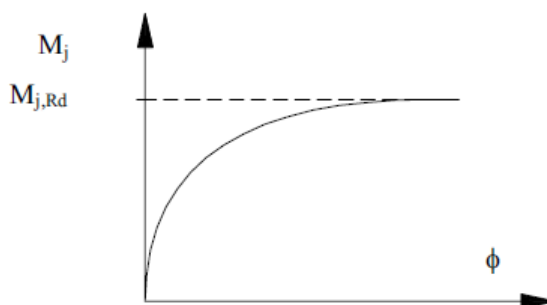
Obrázek 1.1 - Pracovní diagram oceli

Pracovní diagramy vznikají na základě tahových zkoušek v laboratoři. V grafu jsou vyznačeny čtyři základní meze napjatosti, které se vyznačují těmito změnami chování materiálu:

- napětí na mezi úměrnosti σ_U vymezuje oblast, kde jsou deformace lineárně závislé na napětí (platí Hookův zákon),
- napětí na mezi pružnosti σ_E vymezuje bod, při jehož překročení vznikají trvalé deformace,
- napětí na mezi kluzu σ_K je napětí, při němž dochází ke značné plastické deformaci,
- napětí na mezi pevnosti σ_P , při jehož dosažení dojde k trvalému porušení materiálu. Materiál se přetrhne v bodě P .

1.2 Pracovní diagram styčnicku

Abychom si dokázali představit skutečné působení styčnicku, lze jej vyjádřit pracovním diagramem styčnicku. Tento pracovní diagram vyjadřuje závislost mezi pootočením konstrukce ϕ v místě styčnicku a návrhovým ohybovým momentem M_j (obr. 1.2). Z grafu je zjevné, že závislost pootočení na návrhovém momentu je nelineární. Většinou se pro zjednodušení volí náhradní aproximovaná, po částech lineární závislost (např. lineární nebo bilineární). Nicméně musí vždy platit, že křivka aproximované závislosti se nachází pod křivkou skutečné závislosti [3].



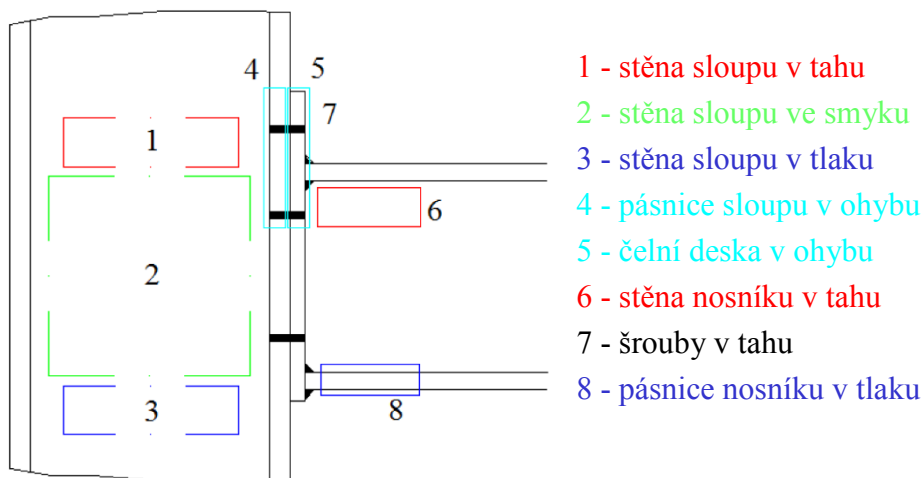
Obrázek 1.2 - Pracovní diagram styčnicku

2 ŘEŠENÍ OCELOVÝCH SPOJŮ DLE EUROKÓDŮ

Při navrhování styčníků prutových ocelových konstrukcí podle Eurokódů se používá metoda komponent. Metoda dělí styčník na jednotlivé části, komponenty, jejichž vlastnosti je možno určit pomocí modelů popsanych v normativních dokumentech [1].

2.1 Metoda komponentů

Při použití této metody se styčník modeluje jako sestava základních komponent (obr. 2.1). Základní komponenta je část styčníku, která se podílí na jedné nebo více konstrukčních vlastnostech. Vlastnosti komponent lze určit pomocí jednoduchých modelů. Složením jednotlivých komponent se získají výsledné parametry styčníku. Pomocí této metody se určuje nejen momentová únosnost styčníku, ale také jeho počáteční tuhost a pomocí zjednodušeného modelu lze odvodit celý pracovní diagram styčníku [4].



Obrázek 2.1 - Základní komponenty styčníku

2.2 Rotační tuhost

Rotační tuhost styčníku S_j je moment potřebný k vyvolání jednotkového natočení styčníku. Jednotka rotační tuhosti je Nm . Rotační tuhost styčníku se určí z poddajnosti jeho základních komponent. Tato poddajnost je popsána pružným součinitelem tuhosti k_i , viz 4.3.2 a 5.3.2.

2.2.1 Předběžný návrh tuhosti styčnicku

Podle [5] pro předběžný návrh konstrukce se používá zjednodušený odhad tuhosti a únosnosti styčnicku. Tento odhad se odvíjí od znalosti nejslabší části styčnicku, tj. pásnice sloupu. Tuhost se odhaduje jako:

$$S_{j,ini,app} = \frac{Ez^2t_{fc}}{\xi}, \quad (2.1)$$

kde E je modul pružnosti oceli,
 z rameno vnitřních sil,
 t_{fc} tloušťka pásnice nosníku,
 ξ součinitel dle tabulky 2.1.

Rameno vnitřních sil z , udává vzdálenost středu tlačené pásnice nosníku a středu tažené části přípoje. Pro svařovaný přípoj a pro přípoj s čelní deskou s přesahem je rameno z možno odhadnout jako vzdálenost středů pásnic nosníku.

V případě, že o únosnosti styčnicku rozhoduje pásnice sloupu v ohybu, hodí se vypracovat i odhad momentové únosnosti styčnicku.

$$M_{j,Rd,app} = \frac{\zeta f_y z^2 t_{fc}}{\gamma_{M0}}, \quad (2.2)$$

kde f_y je návrhová hodnota meze kluzu oceli,
 z rameno vnitřních sil,
 t_{fc} tloušťka pásnice nosníku,
 ζ součinitel dle tabulky 2.1,
 γ_{M0} dílčí součinitel.

Tabulka 2.1 - Tabulka součinitelů ξ a ζ pro jednotlivé druhy styčnicků

Styčnick nosniku se sloupem	Součinitel		Styčnick nosniku se sloupem, patka	Součinitel	
	ξ	ζ		ξ	ζ
	13,0	5		∞	> 7
	7,5	7		6	7
	8,5	5		7	-
	3	> 7		10	-
	3	> 7		35	-
	11,5	5		15	-
	11,5	5		14	-
	6,0	7		40	-
	5,5	5		20	5

2.2.2 Postup výpočtu rotační tuhosti styčnicku nosniku se sloupem

Podle normy [1] lze rotační tuhost S_j styčnicku získat s dostatečnou přesností pro moment $M_{j,Ed}$, který je menší než návrhová momentová únosnost styčnicku $M_{j,Rd}$, za předpokladu, že osová síla N_{Ed} v připojovaném prutu nepřekročí 5% návrhové únosnosti průřezu $N_{pl,Rd}$ z výrazu:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad (2.3)$$

kde E je Youngův modul pružnosti oceli,
 z rameno, viz obr. 6.15 v normě [1],
 μ poměr tuhosti $S_{j,ini} / S_j$,
 k_i součinitel tuhosti základní komponenty styčnicku i .

Výpočet součinitelů k_i tuhosti základních komponent styčnicku je podrobně vysvětlen v normě [1]. Při výpočtech tuhosti styčnicku nosníku se sloupem čelní deskou se používá tzv. účinná délka jednotlivých komponent, která je ve formě tabulek vypsána v normě [1]. Je závislá na roztečích a vzdálenostech šroubů od překážek a okrajů, na hodnotě součinitele α a na poloze šroubů vůči pásnicím a stojinám profilů a ztužení.

Pro výpočet tuhosti styčnicku nosníku se sloupem čelní deskou se určí náhradní součinitel tuhosti k_{eq} a náhradní rameno z_{eq}

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} h_r}{z_{eq}}, \quad (2.4)$$

$$z_{eq} = \frac{\sum r k_{eff,r} h_r^2}{\sum r k_{eff,r} h_r}, \quad (2.5)$$

kde h_r je vzdálenost řady šroubů r ke středu tlaku,
 $k_{eff,r}$ účinný součinitel tuhosti řady šroubů r , který započítává součinitele tuhosti základních komponent k_3, k_4, k_5, k_{10} [1].

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}, \quad (2.6)$$

kde $k_{i,r}$ je součinitel tuhosti představující komponentu i pro řadu šroubů r .

Tuhost styčnicku se získá ze vztahu (2.3) pomocí náhradního součinitele tuhosti k_{eq} , součinitele tuhosti pro stěnu sloupu ve smyku k_l a pomocí ramene z , které se uvažuje rovno náhradnímu rameni z_{eq} .

Určení počáteční tuhosti styčnicku $S_{j,ini}$ se stanoví pro $\mu = 1$. Poměr tuhosti μ se má stanovit z následujících vztahů [1]:

- pokud $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$ je:
 $\mu = 1$
- pokud $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} < M_{j,Rd}$ je:
 $\mu = (1,5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\psi$

kde součinitel ψ se stanoví z tabulky 2.2.

Tabulka 2.2 - Hodnota součinitele ψ

Typ přípoje	ψ
Svařovaný	2,7
Šroubovaná čelní deska	2,7
Šroubovaný úhelník na pásnici nosníku	3,1
Patní deska	2,7

2.2.3 Postup výpočtu rotační tuhosti kotvení sloupu

Podle [1] se rotační tuhost S_j kotvení sloupu, které je namáháno kombinací osově síly a ohybového momentu počítá podle následujícího výrazu:

$$S_j = \frac{EZ^2}{\mu \left(\frac{1}{k_{T,l}} + \frac{1}{k_{C,r}} \right)} * \frac{e}{e+e_k}, \quad (2.7)$$

kde $e_k = \frac{z_{C,r}k_{C,r} - z_{T,l}k_{T,l}}{k_{T,l} + k_{C,r}},$

$z = z_{T,l} + z_{C,r}$ jsou ramena vnitřních sil,

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}},$$

$k_{T,l}$ je součinitel tuhosti v tahu na levé straně styčnicku. Skládající se ze součtu součinitelů tuhosti k_{I5} a k_{I6} .

$k_{C,r}$ je součinitel tuhosti v tlaku na pravé straně styčnicku. Má se uvažovat roven součiniteli tuhosti k_{I3} .

2.2.4 Postup výpočtu návrhové momentové únosnosti kotvení sloupu

V případě sloupu je součástí příloh i výpočet momentové únosnosti kotvení podle normativních předpisů [1] a [2]. Návrhová momentová únosnost $M_{j,Rd}$ kotvení sloupu, které je namáháno kombinací osově síly a momentu, se má stanovit podle následujících výrazů. Při výpočtu se zanedbává příspěvek betonové části pod stěnou sloupu.

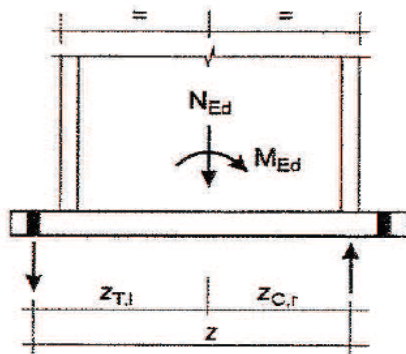
$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \frac{F_{T,l,Rd} \cdot z}{\frac{z_{C,r}}{e} + 1}; \frac{-F_{C,r,Rd} \cdot z}{\frac{z_{T,l}}{e} - 1} \right\}, \quad (2.8)$$

kde $F_{T,l,Rd}$ je návrhová únosnost v tahu levé strany styčnicku,
 $F_{C,r,Rd}$ návrhová únosnost v tlaku pravé strany styčnicku,
 z rameno vnitřních sil,
 $z_{C,r}$ rameno podle obr. 2.2,
 $z_{T,l}$ rameno podle obr. 2.2,
 e excentricita zatížení.

Návrhové únosnosti $F_{T,l,Rd}$ a $F_{C,r,Rd}$ se vypočtou jako minimální hodnota návrhových únosností následujících základních komponent.

- $F_{T,l,Rd} = \min\{F_{t,wc,Rd}; F_{t,pl,Rd}\},$
- $F_{C,r,Rd} = \min\{F_{c,pl,Rd}; F_{c,fc,Rd}\},$

kde $F_{t,wc,Rd}$ je stěna sloupu v tahu u levé pásnice sloupu,
 $F_{t,pl,Rd}$ patní deska v ohybu pod levou pásnicí sloupu,
 $F_{c,pl,Rd}$ beton v tlaku pod pravou pásnicí sloupu,
 $F_{c,fc,Rd}$ pravá pásnice a stěna sloupu v tlaku.



Obrázek 2.2 - Ramena vnitřních sil

Postup výpočtu návrhových únosností těchto komponent je detailně popsán v normě [1] a je spočítán v příloze této práce.

2.3 Pružná globální analýza

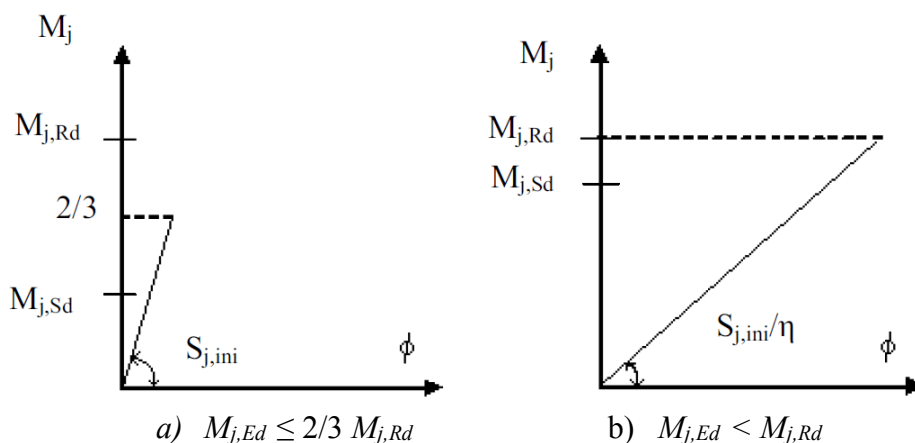
Podle [1] jsou tři metody globální analýzy, které jsou znázorněny v tabulce 2.3. Každá metoda analýzy s sebou nese jiné klasifikace styčnicků.

Tabulka 2.3 - Modely styčnicků

Metoda globální analýzy	Klasifikace styčnicku		
Pružná	Kloubový	Tuhý	Polotuhý
Tuho-plastická	Kloubový	S plnou únosností	S částečnou únosností
Pružně-plastická	Kloubový	Tuhý s plnou únosností	Polotuhý s částečnou únosností Polotuhý s plnou únosností Tuhý s částečnou únosností
Typ modelu styčnicku	Kloubový	Spojité	Částečně spojitý

V případě pružné globální analýzy se styčnický klasifikují podle jejich počáteční rotační tuhosti $S_{j,ini}$. U polotuhých styčnicků se má obecně uvažovat s rotační tuhostí S_j , která odpovídá návrhovému ohybovému momentu $M_{j,Ed}$. Pokud $M_{j,Ed}$ je menší než $2/3$ návrhové momentové únosnosti styčnicku $M_{j,Rd}$, lze v globální analýze uvažovat s počáteční rotační tuhostí $S_{j,ini}$, viz obrázek 2.3(a).

Pro zjednodušení lze uvažovat rotační tuhost pro všechny hodnoty $M_{j,Ed}$ jako $S_{j,ini}/\eta$, jak je znázorněno na obrázku 2.3(b), kde η je součinitel změny tuhosti podle tabulky 2.4 [1].



Obrázek 2.3 - Rotační tuhost pro pružnou globální analýzu

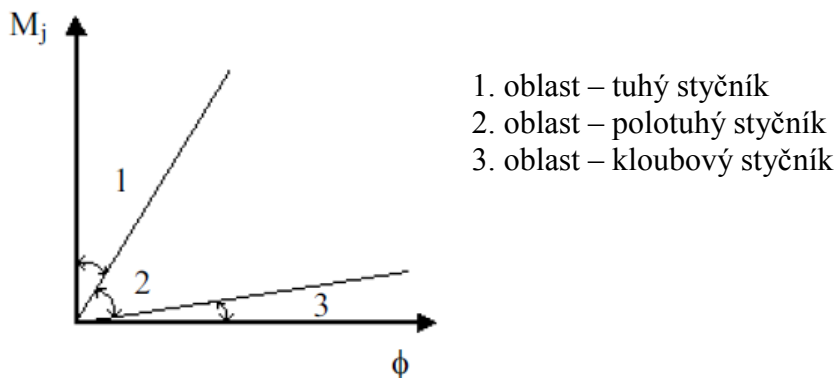
Tabulka 2.4 - Součinitel změny tuhosti η

Typ spoje	Styčnick nosníku se sloupem	Jiné typy styčnicků (přípoj nosníku na průvlak, spoj nosníků, kotvení sloupu)
Svařovaný	2,0	3,0
Šroubovaný s čelní deskou	2,0	3,0
Šroubovaný s úhelníky na pásnicích	2,0	3,5
Patní desky	-	3,0

2.3.1 Klasifikace podle tuhosti

Porovnáním počátečních tuhostí $S_{j,ini}$ s klasifikačními hranicemi dělíme styčnick na tuhý, polotuhý a kloubový. Kloubový styčnick by měl být schopen přenášet vnitřní síly, aniž by se vytvářely významné momenty. Tuhý styčnick má dostatečnou rotační tuhost, která při analýze umožňuje využít plné spojitosti. Polotuhé styčnick jsou schopné přenášet vnitřní síly a momenty. Míra spolupůsobení mezi pruty je dána návrhovým diagramem styčnicku.

Na obrázku 2.4 jsou vyznačeny klasifikační hranice styčnicku nosníku ke sloupu podle normy [1].



Obrázek 2.4 - Klasifikace styčnicků podle rotační tuhosti

1. oblast: Styčník lze klasifikovat jako tuhý, jestliže:

$$S_{j,ini} \geq k_b \frac{EI_b}{L_b}, \quad (2.9)$$

kde $k_b = 8$ pro prutové konstrukce vyztužené ve vodorovném směru (redukce vodorovných posunů nejméně o 80%), $k_b = 25$ pro ostatní prutové konstrukce, za předpokladu, že v každém patře platí $K_b/K_c \geq 0,1$.

2. oblast: Polotuhý styčník. Některé styčníky v 1. a 3. oblasti lze uvažovat jako polotuhé. Prutové konstrukce s $K_b/K_c < 0,1$ se klasifikují jako polotuhé.

3. oblast: Styčník lze klasifikovat jako kloubový, jestliže:

$$S_{j,ini} \leq 0,5E \frac{I_b}{L_b}, \quad (2.10)$$

kde K_b je střední hodnota I_b/L_b pro všechny nosníky nad uvažovaným podlažím,
 K_c střední hodnota I_c/L_c pro všechny sloupy v uvažovaném podlaží,
 I_b moment setrvačnosti nosníku,
 I_c moment setrvačnosti sloupu,
 L_b rozpětí nosníku (mezi středy sloupů),
 L_c výška sloupu.

Klasifikace kotvení sloupů se řídí jinými pravidly [1]. Kotvení sloupů je tuhé, pokud je v prutových konstrukcích ztužení omezující vodorovné posuny na nejméně 80%, lze zanedbat účinky deformace a jsou splněny tyto podmínky:

- pokud $\bar{\lambda}_0 \leq 0,5$,
- pokud $0,5 < \bar{\lambda}_0 < 3,93$ a $S_{j,ini} \geq 7 * (2\bar{\lambda}_0 - 1)E \frac{I_c}{L_c}$,
- pokud $\bar{\lambda}_0 \geq 3,93$ a $S_{j,ini} \geq 48E \frac{I_c}{L_c}$,
- jinak pokud $S_{j,ini} \geq 30E \frac{I_c}{L_c}$,

kde $\bar{\lambda}_0$ je poměrná štíhlost sloupu s kloubovým zakončením na obou koncích.

3 ŘEŠENÍ OCELOVÝCH SPOJŮ V PROSTŘEDÍ SW ANSYS

Pro zjištění reálného chování řešených styčníků, bylo zapotřebí zvolit vhodný software. V praxi se nejčastěji využívají prutové modely pro určení vnitřních sil, napětí a deformací ocelových konstrukcí. Rámová konstrukce tvořena sloupy a příčlemi je nahrazena pruty, které procházejí střednicemi těchto sloupů a příčlí. Geometrie prutu je určena průřezovými charakteristikami a délkou. Při tomto zjednodušení není možné detailně popsat šroubovaný přípoj. Lze pouze namodelovat kloubový nebo tuhý spoj. Program Scia Engineer, který využívá prutových modelů, umožňuje modelování polotuhého styčnicku. V takovém případě jsou pruty spojeny přes pružinu, která umožňuje částečný přenos ohybového momentu, je tedy částečně spojitá. Otázkou je, jakou tuhost tato pružina má. Tento problém už program Scia Engineer vyřešit neumí. Abych mohl zjistit reálné chování styčnicku a tím zjistit jeho rotační tuhost, musel jsem zvolené úlohy řešit v programu ANSYS Mechanical 15.0 v klasickém prostředí. Program umožňuje detailní analýzu konstrukcí metodou konečných prvků (MKP).

3.1 Metoda konečných prvků

Metodou konečných prvků lze řešit většina typů konstrukcí. Je to univerzální metoda, která se dnes vyskytuje v mnoha odvětvích techniky a průmyslu. Je to numerická metoda pro nepřímé řešení diferenciálních rovnic. Je bezprostředně spjatá s použitím počítačů. Pomocí MKP se dnes řeší statické a dynamické úlohy, lineární nebo nelineární. Umožňuje nám řešit úlohy s prouděním a magnetismem. Uplatnění si tato metoda našla i v biomechanice, kde se například řešilo proudění krve v komorách srdce.

MKP vychází z Ritz-Galerkinových variačních principů, kdy jsou používány náhradní (bázové) funkce aproximující určitá pole. Klasické variační principy převádějí řešení diferenciálních rovnic na algebraické řešení rovnic. Toto zjednodušení umožňuje pracovat se skalárními veličinami (energie, potenciál,...) namísto vektorových (síly, posunutí,...). Do bázových funkcí se rozkládají hledané funkce F . Tento rozklad je spjat s rozdělením řešené oblasti Ω na podoblasti Ω_e (konečné prvky). Existují tři varianty řešení: deformační, silová a smíšená. V praxi se v drtivé většině případů používá deformační metoda. Jde o energetické pojetí úlohy. Hledá se extrém nějakého operátoru (funkcionálu). Jeho hodnota pro celou oblast je rovna součtu hodnot v částech (konečných prvků). U deformační metody reprezentují funkce F posuny a funkcionálem je potenciální energie soustavy. Funkce F plynou z podmínek minima funkcionálu. Deformační metoda je charakterizována použitím Lagrangeova principu minima celkové potenciální energie

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_e = \min, \quad (3.1)$$

kde Π_e je potenciální energie vnějších sil,
 Π_i potenciální energie vnitřních sil.

Vztah popisujeme takto: ze všech přípustných funkcí posunutí, tj. funkcí splňujících dané geometrické okrajové podmínky a neporušující spojitost tělesa, se realizují ty funkce, které udělují celkové potenciální energii Π minimální hodnotu [6].

3.2 Struktura SW ANSYS

Program pracuje se základními jednotkami soustavy SI. Tvorba geometrického tvaru vyšetřované konstrukce probíhá pomocí následujících geometrických útvarů:

- *keypoint* – bod,
- *line* – úsečka,
- *area* – plocha,
- *volume* – objem.

Všechny tyto prvky jsou na sobě závislé podle tohoto schéma:

KEYPOINT → LINE → AREA → VOLUME

To znamená, že program nedovolí smazat *keypoint*, aniž by předtím nebyl smazán *line*, který je daným geometrickým útvarem *keypoint* definován. Těmito útvary se vytváří *solid model*, na který se po vytvoření konečněprvkové sítě váže *FE model* (finite element – konečný prvek).

Menu tohoto programu má tři základní složky. *Preprocessor*, *Solution* a *Postprocessor*. V části *Preprocessor* dochází k přípravě vstupních údajů. Mezi tyto vstupní údaje patří geometrie, materiálové vlastnosti, zatížení a další.

Část *Solution* se zaměřuje na zatížení, typ analýzy a nastavení řešiče (Gaussova metoda a jiné algoritmy). Je nutné se zamyslet na volbě algoritmu, neboť přímo ovlivňuje přesnost a čas výpočtu.

Část *Postprocessor* vyhodnocuje výpočet a poskytuje grafické a textové výstupy.

3.3 Prvky – elements

Zvolenými prvky (beam – prut, shell – skořepina, solid – prostor) lze detailně popsat řešený problém. Charakteristiky prvků detailně popisuje ANSYS Help Viewer [7]. Konečné prvky jsou v prostředí ANSYS závislé na čtyřech hlavních atributech:

- element type,
- real constants,
- material properties,
- sections.

3.3.1 Element type

Definuje prvkům prostorové uspořádání, tvar, počet uzlů, stupně volnosti a další.

3.3.2 Real constants

Jsou to vlastnosti závisující na typu konečného prvku. Ne všechny prvky vyžadují nastavení reálných konstant. Jiné prvky stejného typu mohou mít rozdílné hodnoty reálných konstant. Prvky typu *SHELL* a *SOLID* nevyžadují tato nastavení. Naopak prvku *LINK* se zde nastavuje průřezová plocha, přídatná hmota a dovolené způsoby namáhání. Kontaktnímu prvku typu *CONTA* se zde nastavuje více než 20 vlastností.

3.3.3 Material properties

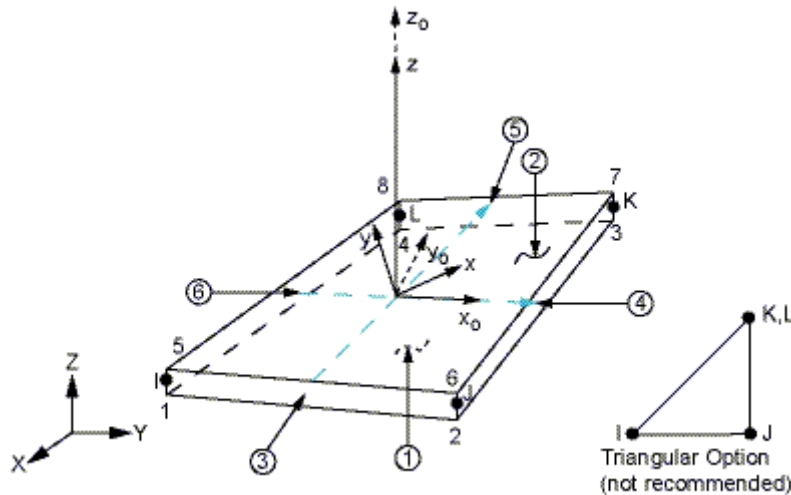
Umožňuje nastavit materiálové charakteristiky. Lze nastavit strukturální, teplotní, elektromagnetické, akustické, fluidní, termoelektrické, difuzní a další vlastnosti materiálu.

3.3.4 Sections

Stejně jako u *real constants* přiřazuje charakteristické vlastnosti v závislosti na zvoleném prvku. Jde většinou o průřezové charakteristiky. U prvku typu *LINK* se skrze něj nastavuje plocha průřezu prvku. U prvku typu *SHELL* se nastavuje tloušťka prvku. Vlastnost section se nedá snadno definovat. Jeho charakter se odvíjí od typu prvku. Některé prvky (např. *SOLID*) nastavení sections nevyžadují.

3.3.5 SHELL181

Je vhodný pro analýzu štíhlých až středně tlustých skořepin. Prvek je definován čtyřmi uzly se šesti stupni volnosti v každém uzlu (posuny ve směru x , y a z a rotace kolem osy x , y a z) a tzv. shell section information, ve kterém se např. udává tloušťka prvku. Trojúhelníkový tvar tohoto prvku není doporučeno používat, nicméně vyskytuje se při tvorbě konečně prvkové sítě. Tento prvek se hodí pro lineární i nelineární aplikaci.



Obrázek 3.1 - Geometrie prvku SHELL181

Vstupní údaje:

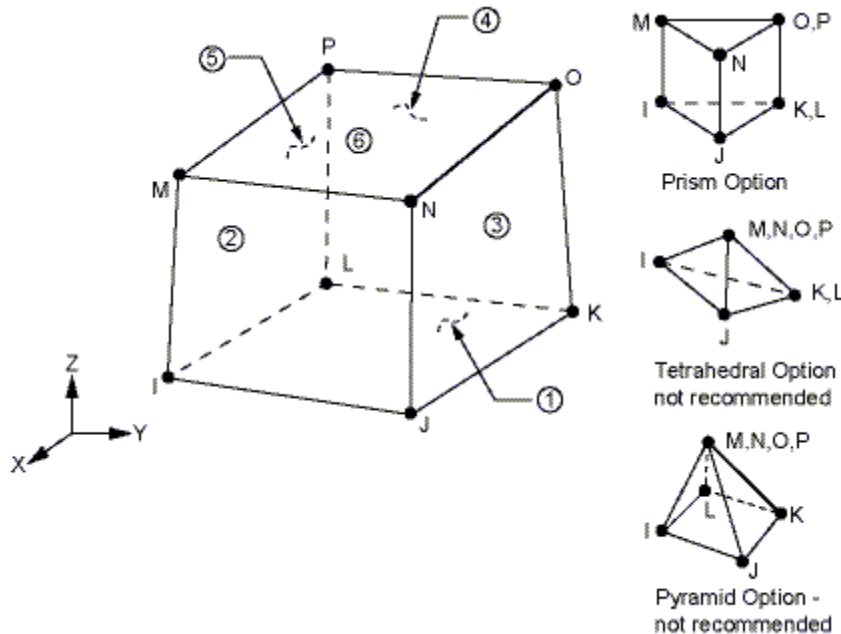
- Uzly: I, J, K, L
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ nebo UX, UZ, UY
- Materiálové vlastnosti: EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DNES, GXY, GYZ, GXZ, ALPD
- Povrchové zatížení: tlak na povrchy 1 až 6 znázorněné na obrázku 3.1
- Speciální vlastnosti: aktivace a deaktivace prvku, počáteční stav, velký průhyb, velké přetvoření, definice sekce (vrstvené prvky) a další

Výstupní údaje:

- uzlové posuny zahrnuté do celého uzlového řešení,
- napětí, tlak, intenzita napětí a další.

3.3.6 SOLID185

Používá se pro modelování 3D konstrukcí. Je definován osmi uzly, z nichž každý má tři stupně volnosti (posuny ve směru x , y a z). Lze ho použít v úlohách plastických, hyperplastických, s napětovým zpevněním, s dotvarováním a s velkými průhyby. Má schopnost simulovat deformaci téměř nestlačitelných elastoplastických materiálů a plně nestlačitelných hyperelastických materiálů.



Obrázek 3.2 - Geometrie prvku SOLID185

Vstupní údaje:

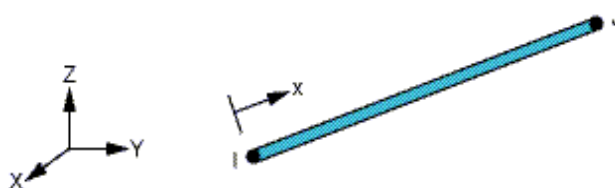
- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ
- Reálné konstanty: HGSTF
- Materiálové vlastnosti: EX, EY, EZ, PRXY, PRXZ, PRYZ, ALPX, ALPY, ALPZ, GXY, GYZ, GXZ
- Povrchové zatížení: tlak na povrchy 1 až 6 znázorněné na obrázku 3.2
- Speciální vlastnosti: aktivace a deaktivace prvku, počáteční tlak, velký průhyb, velké přetvoření, rezonance a další

Výstupní údaje:

- uzlové posuny zahrnuté do celého uzlového řešení,
- napětí, tlak, intenzita napětí, hydrostatický tlak a další.

3.3.7 LINK180

Je to 3D prvek prutového typu, který se hodí v různých technických aplikacích. Prvek je namáhán v jeho ose tahem i tlakem. Je definován dvěma uzly, z nichž každý má tři stupně volnosti (posuny ve směru x , y a z). Prvku jde omezit namáhání pouze na tlak nebo na tah. Mezi vlastnosti prvku patří plasticita, dotvarování, rotace, velké průhyby a deformace. Prvku lze nastavit počáteční stav napjatosti.



Obrázek 3.3 - Geometrie prvku LINK180

Vstupní údaje:

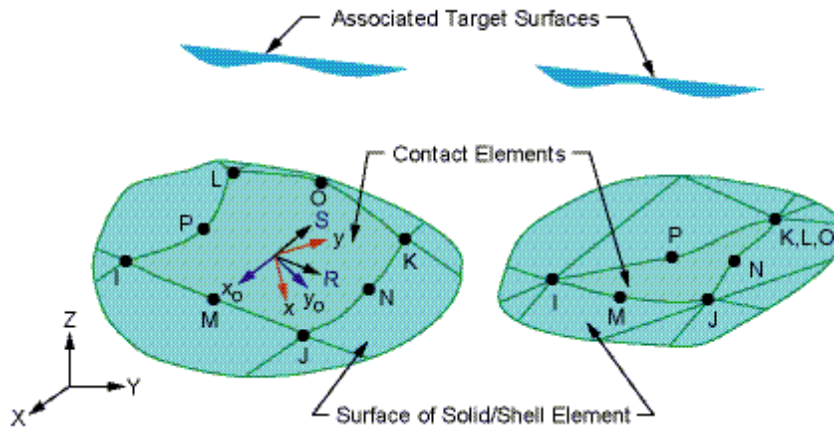
- Uzly: I, J
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ
- Materiálové vlastnosti: EX, (PRXY nebo NUXY), ALPX (nebo CTEX nebo THSX), DNES, GXY, ALPD, BETD
- Speciální vlastnosti: aktivace a deaktivace prvku, počáteční napětí, velký průhyb, velké přetvoření, napětíové vyztužení a další

Výstupní údaje:

- uzlové posuny zahrnuté do celého uzlového řešení,
- osová napětí, síla, hydrostatický tlak a další.

3.3.8 CONTA174

Prvek se používá k reprezentaci kontaktu mezi cílovým (TARGE170) a deformovatelným povrchem, který je definován tímto prvkem. Má stejné geometrické charakteristiky jako prostorový nebo skořepinový prvek, s kterým je spojen.



Obrázek 3.4 - Geometri prvku CONTA174

Vstupní údaje:

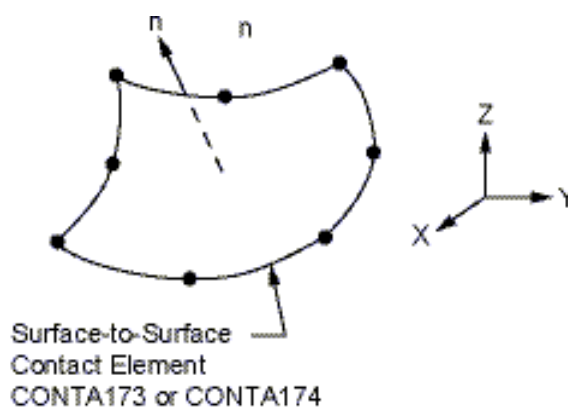
- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG
- Reálné konstanty: R1, R2, FTOLN, PINB, PMAX, PMIN a mnoho dalších
- Materiálové vlastnosti: MU
- Speciální vlastnosti: aktivace a deaktivace prvku, rozpojení, izotropní tření, velké průhyby, nelinearita

Výstupní údaje:

- uzlové posuny zahrnuté do celého uzlového řešení,
- kontaktní status, aktuální penetrace, aktuální mezera, kontaktní napětí, koeficient tření a mnoho dalších.

3.3.9 TARGE170

Prvek reprezentuje různé 3D cílové plochy pro na ně spojené kontaktní prvky. Kontaktní prvky samy o sobě pokrývají prostorové, skořepinové a prutové prvky popisující hranici deformovatelného tělesa a jsou potenciálně v kontaktu s cílovým povrchem. Lze stanovit translační a rotační posunutí, teplotu, magnetický potenciál a elektrické napětí na cílovém segmentu prvku.



Obrázek 3.5 - Geometrie prvku TARGE170

Cílový povrch je modelován prostřednictvím souboru cílových segmentů. Běžně několik segmentů zahrnuje jeden cílový povrch. Cílový povrch může být tuhý nebo poddajný. Více o kontaktních prvcích v kapitole 3.4.

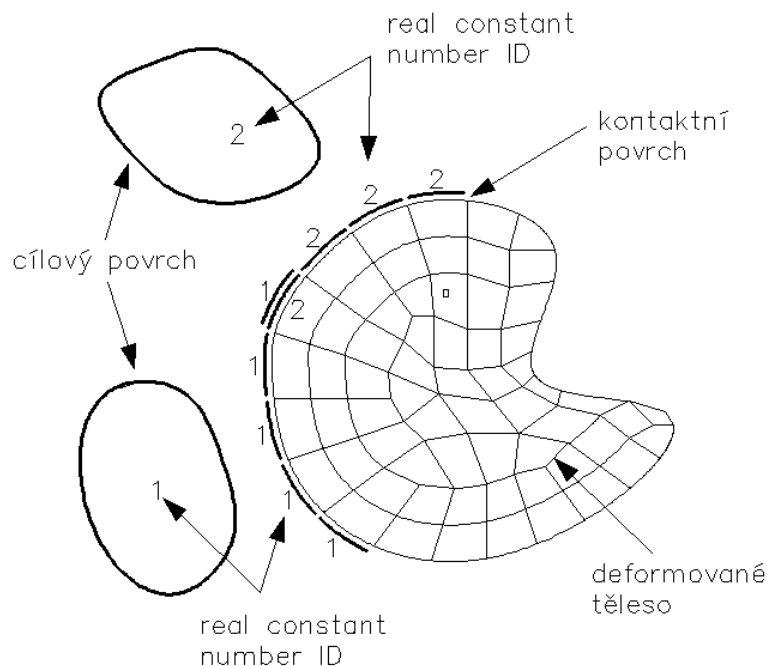
Vstupní údaje:

- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG, ROTX, ROTY, ROTZ
- Reálné konstanty: R1, R2, ostatní jsou definovány pomocí párových prvků typu CONTA
- Materiálové vlastnosti: žádné
- Speciální vlastnosti: aktivace a deaktivace prvku, lineární odchylka, nelinearita

3.4 Kontaktní úlohy

Kontaktní úlohy v systému ANSYS jsou nelineární. Nelinearita kontaktního problému vyplývá vlastního iteračního algoritmu kontaktní úlohy a ze zahrnutého modelu tření, které je v systému ANSYS vždy nelineární [8]. Pro řešení kontaktních úloh poskytuje program tři základní kontaktní algoritmy: *node-to-node*, *surface-to-surface*, *node-to-surface*. V této práci je ve všech zvolených úlohách využíván algoritmus *surface-to-surface*.

V případě, že řešíme úlohu, kde na sebe doléhají dva různé povrchy, musíme namodelovat kontaktní prvky. Kontaktní prvky modelujeme tam, kde se předpokládá možný styk dvou různých povrchů. Při určování ploch kontaktních prvků je nutné počítat s deformacemi těles při zatěžování. Tím je myšleno, že musíme předem odhadnout všechny možné oblasti možného kontaktu. Pokud máme určeny oblasti možného kontaktu, je nutné na těchto oblastech určit kontaktní povrchy, které jsou definovány kontaktními „*contact*“ a cílovými „*target*“ prvky. Tyto dva prvky utvářejí kontaktní pár. Kontaktní pár je definován stejným číslem množiny reálných konstant (obr. 3.6). Tato množina reálných konstant zahrnuje všechny reálné konstanty pro cílové i kontaktní prvky [7].



Obrázek 3.6 - Schéma kontaktní úlohy

Na obrázku 3.6 lze vidět, více oblastí možných kontaktů těles. Každá tato oblast musí mít vlastní kontaktní pár a musí být definován vlastní množinou reálných konstant. Každý cílový povrch může být spojen s pouze jedním kontaktním povrchem a obráceně.

Nicméně, některé kontaktní prvky mohou tvořit dosedací plochu, a tím se dostat do styku se stejným cílovým povrchem [7].

Pro určení kontaktního a cílového povrchu je nutné určit typ kontaktu. V řešených příkladech se jedná o kontakt poddajného tělesa (patní plech, čelní deska) a tuhého tělesa (betonová patka, vyztužená pásnice sloupu). V takovém případě je kontaktní povrch poddajného tělesa tvořen kontaktními prvky a kontaktní povrch tuhého tělesa je tvořen cílovými prvky.

Pro kontaktní pár musíme definovat koeficient tření, který se zadá při vytváření tohoto kontaktního páru. Kontaktní prvky aplikujeme na vysíťovaný konečněprvkový model. Kontaktní prvky sdílejí uzly s prvky typu SOLID a SHELL, které se vyskytují v řešených úlohách. Pro správný výpočet je nutné, aby normály kontaktních prvků směřovaly proti sobě.

3.5 Operace s kontaktními prvky

Kontaktní prvky lze různě nastavovat. Mají velké množství vlastností, které se mohou různě kombinovat a měnit, aby bylo docíleno správného řešení úlohy. Vlastnosti kontaktních prvků se nastavují pomocí reálných konstant a tzv. KEYOPT. Vlastnosti kontaktních prvků (KEYOPT) lze nastavit pomocí menu (“Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete“). Pro většinu úloh je doporučeno výchozí nastavení těchto vlastností. Nicméně v některých případech, když nastanou problémy s výpočtem modelu, je vhodné tyto vlastnosti správně nastavit.

3.5.1 Nastavení vlastností kontaktních prvků

Výrobce systému ANSYS doporučuje používat přednastavené hodnoty pro většinu kontaktních úloh. Vlastnosti kontaktních prvků dovolují nastavovat některá kritéria pro výpočet. Pro ilustraci jsou uvedeny jen některé z nich [7]:

- KEYOPT(1) – stupně volnosti,
- KEYOPT(2) – výběr kontaktního algoritmu (Lagrangeův algoritmus,...),
- KEYOPT(5) – definuje mezeru nebo proniknutí mezi kontaktními povrchy,
- KEYOPT(7) – kontrolní parametr pro časový krok,
- KEYOPT(9) – účinek počáteční penetrace,
- KEYOPT(11) – vliv tloušťky prvku,
- KEYOPT(12) – chování kontaktního povrchu.

3.5.2 Nastavení reálných konstant kontaktních prvků

Hodnoty reálných konstant kontaktních prvků jsou přednastaveny, ale v průběhu ladění výpočtu je někdy nutné tyto hodnoty změnit. Reálné konstanty kontaktních prvků lze nastavit pomocí menu ("Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete"). Opět jsou uvedeny pouze některé reálné konstanty [7].

- R1 a R2 definují geometrii cílového elementu,
- FKN definuje součinitel normálové kontaktní tuhosti,
- FTOLN je součinitel, podle kterého program ANSYS vypočítá dovolený průnik na základě tloušťky elementu,
- ICONT součinitel, který definuje počáteční nastavení,
- PMIN a PMAX definuje povolenou oblast penetrace pro počáteční penetraci,
- CNOF určuje kladnou nebo zápornou velikost možného posunutí (přesazení) kontaktního povrchu,
- FKOP součinitel, který definuje tuhost při spuštění kontaktního algoritmu,
- FKT definuje tangenciální složku kontaktní tuhosti,
- COHE definuje odpor při posuvu kontaktního povrchu.

4 STYČNÍK NOSNÍKU SE SLOUPEM

Použiji dva výpočtové modely na výpočet tuhosti styčnicku, jejichž výsledky následně porovnám. Prvním modelem je pružná globální analýza řídicí se normativními předpisy [1] a [2]. Normativní předpisy většinou využívají algoritmy podložené experimentálními výzkumy. Tyto algoritmy jsou omezené pouze na určité druhy profilů, které se stýkají ve styčnicku. Norma [1] se omezuje na styčnicku typu H a I. Omezená je i ve smyslu konstrukčního uspořádání styčnicků. Norma tím pádem řeší pouze běžné druhy styčnicků.

Druhým modelem je numerický model v SW ANSYS. Cílem tohoto numerického modelu je analyzovat skutečné chování styčnicku a jeho částí. V numerickém modelu budu sledovat namáhání šroubů, kontaktní plochu profilů, tuhost styčnicku a vliv tloušťky čelní desky na celkovou tuhost styčnicku.

V příloze této práce je podrobný výpočet rotační tuhosti styčnicku, jeho klasifikace na základě počáteční rotační tuhosti a posouzení na návrhový ohybový moment, na smyk, na kombinaci stříhu a tahu, otláčení šroubů a na protlačení.

4.1 Konstrukční uspořádání a návrhové zatížení

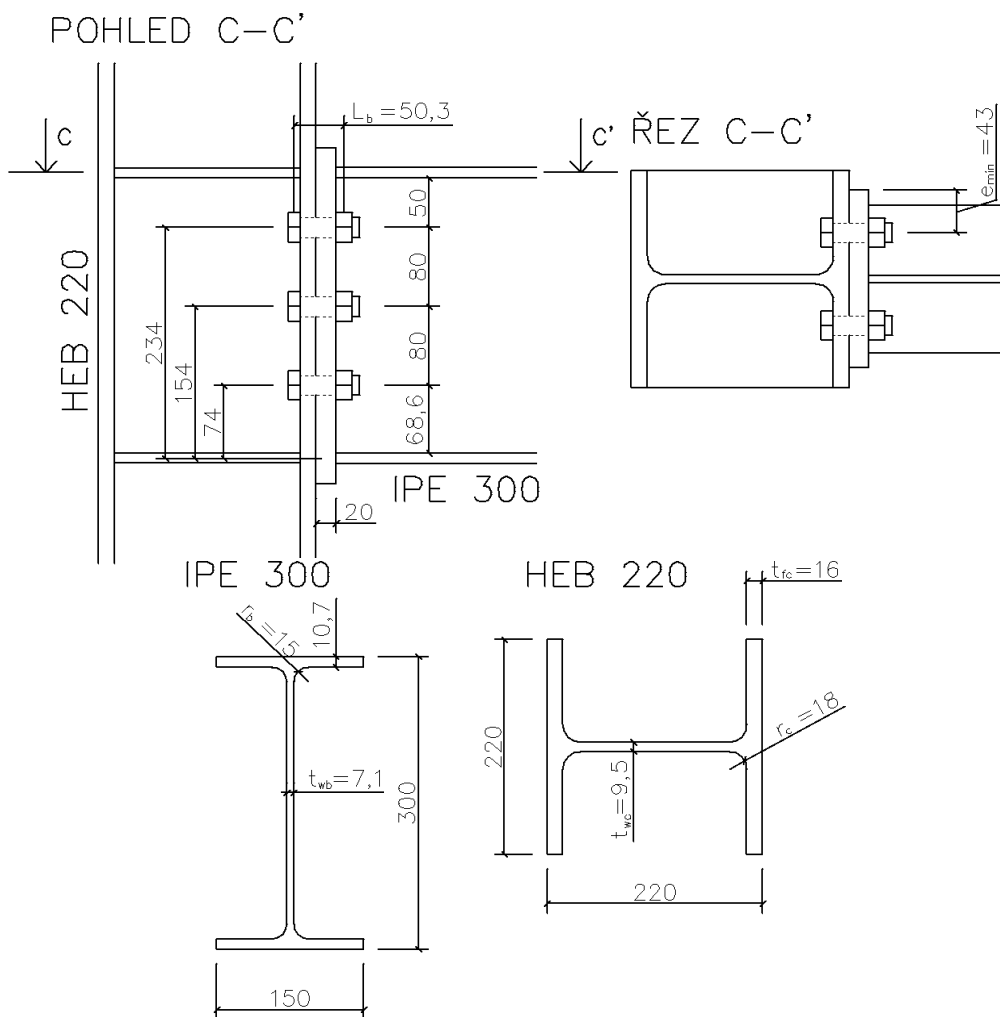
Nosník typu IPE 300 je přivařen k čelní desce. Čelní deska má šest otvorů, kterými prochází šrouby M20 – 4.6. Čelní deska je skrze tyto šrouby připojena k pásnici sloupu HEB 220. Spoje jsou bez příložek pod šrouby. Stojina sloupu je vyztužená vodorovnými výztuhami. Geometrie otvorů pro šrouby odpovídá normativním předpisům pro minimální rozteče a vzdáleností od překážek a okrajů.

Nosník je dlouhý 8 m. Tento údaj uvádím, protože délka nosníku ovlivňuje klasifikační hranice styčnicku [1].

Styčnick je navržen na návrhové zatížení ohybovým momentem $M_{Ed} = 44 \text{ kNm}$ a posouvající silou $V_{Ed} = 88 \text{ kN}$.

4.2 Materiálové charakteristiky a geometrie konstrukčních prvků

Šrouby M20 – 4.6	Ocel S235	Sloup HEB 220
$f_{yb} = 240 \text{ MPa}$	$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$A = 9100 \text{ mm}^2$
$f_{ub} = 400 \text{ MPa}$	$f_y = 235 \text{ MPa}$	$I = 8,09 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$
$A_S = 245 \text{ mm}^2$	Nosník IPE 300	
$A = 314 \text{ mm}^2$	$A = 5380 \text{ mm}^2$	
$d_0 = 22 \text{ mm}$	$I = 8,36 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$	
$L_{bu} = 50,3 \text{ mm}$		

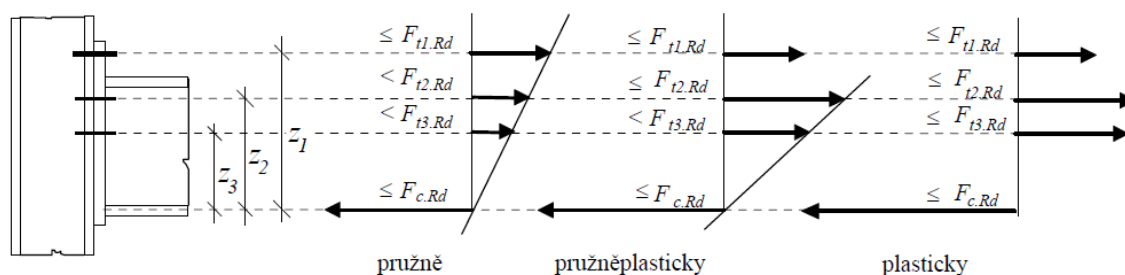


Obrázek 4.1 - Geometrie styčnicku nosníku se sloupem

4.3 Pružná globální analýza

4.3.1 Namáhání šroubů

Předpokládám pružné rozdělení sil ve šroubech. Síly ve šroubech jsou přímo úměrné vzdálenosti od myšleného středu tlaku. Pro jiné výpočty lze použít i další způsoby rozdělení sil ve šroubech [4].



Obrázek 4.2 - Pružné, pružněplastické a plastické rozdělení sil do šroubů

Pro šroubové připoje čelní deskou se má předpokládat, že je střed tlaku v úrovni střednice tlačené pásnice připojovaného prutu. Nejvíce namáhaná řada šroubů je horní řada. Řady šroubů čísujeme od nejvzdálenější řady šroubů od středu tlaku. Pro výpočet využívám metodu komponent.

Pokud znám velikost návrhového ohybového momentu, kterým zatěžuju konstrukci, jsem schopen zjistit, jak jsou namáhány šrouby v jednotlivých řadách [9]:

$$M_{Ed} = 2 \sum F_{Ed,i} r_i = 2(F_{Ed,1} r_1 + F_{Ed,2} r_2 + F_{Ed,3} r_3), \quad (4.1)$$

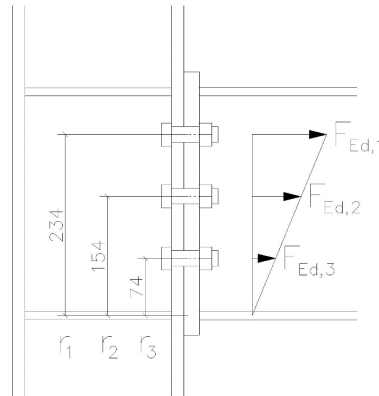
$$\frac{F_{Ed,2}}{r_2} = \frac{F_{Ed,1}}{r_1}, \quad \frac{F_{Ed,3}}{r_3} = \frac{F_{Ed,1}}{r_1},$$

$$F_{Ed,2} = \frac{r_2 F_{Ed,1}}{r_1}, \quad F_{Ed,3} = \frac{r_3 F_{Ed,1}}{r_1},$$

$$M_{Ed} = 2 \left(\frac{r_3^2 F_{Ed,1}}{r_1} + \frac{r_2^2 F_{Ed,1}}{r_1} + F_{Ed,1} r_1 \right), \quad (4.2)$$

$$M_{Ed} = 2 \left(\frac{0,074^2 F_{Ed,1}}{0,234} + \frac{0,154^2 F_{Ed,1}}{0,234} + 0,234 F_{Ed,1} \right), \quad (4.3)$$

$$M_{Ed} = 2 F_{Ed,1} 0,359. \quad (4.4)$$



Obrázek 4.3 - Lineární rozdělení sil ve šroubech

Únosnost jednoho šroubu M20 - 4.6 v tahu je

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4.5)$$

4.3.2 Rotační tuhost styčnicku

Hlavní komponenty, které se podílejí na výpočtu rotační tuhosti styčnicku, jsou:

- stěna sloupu v tahu (k_3),
- pásnice nosníku v ohybu (k_4),
- čelní deska v ohybu (k_5),
- šrouby v tahu (k_{10}).

V příloze této práce je výpočet součinitelů tuhosti těchto komponent. Výpočet se řídí tabulkou 6.11 v normě [1].

$$k_3 = \frac{0,7b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_c}$$

$$k_4 = \frac{0,9l_{eff}t_{fc}^3}{m^3}$$

$$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3}$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b}$$

Je určena počáteční rotační tuhost styčnicku a na základě jeho hodnoty je styčnick následně zatříděn. Při klasifikaci styčnicků se zohledňuje, jestli je daná rámová konstrukce vyztužená ve vodorovném směru. Abych si ulehčil práci v SW ANSYS a oba modely byly co nejpodobnější, navrhuju je bez vodorovného ztužení. Potom se klasifikace řídí podle (2.9), kde $k_b = 25$ a styčnick tak spadá do kategorie polotuhých s rotační tuhostí

$$S_j = 2,373 \cdot 10^7 Nm.$$

4.4 Numerická analýza v SW ANSYS

V této kapitole je popsán podrobný postup modelování dané konstrukce v prostředí SW ANSYS. Pro tento model jsou použity prvky *SHELL181*, *LINK180*, *CONTA174* a *TARGE 170*. Profily sloupu a nosníku jsou modelovány prvkem *SHELL181*. Pomocí *Sections* je těmto prvkům přiřazena tloušťka. Mírné odchylky od reálného tvaru profilu jsou v místech zaoblení v patě stojiny. Svary čelní desky nemodeluji. Jejich vliv neberu jako podstatný.

Pro šrouby byl pro zjednodušení zvolen prvek o dvou uzlech. Prvek *BEAM188* má v uzlu 6 stupňů volnosti (rotace kolem os a posuvy v těchto osách). Tím pádem by bylo v uzlech, kde je prvek připojen k prvku *SHELL181*, bráněno rotacím a šroub by se jevil jako vetknutý. Šroub takto nefunguje. V reálné konstrukci se šroub může volně otáčet kolem své osy. Ovšem až po překročení třecí síly mezi šrouby a přilehlými povrchy. *LINK180* má v každém uzlu bráněno pouze posuvům a pro modelování šroubů se jeví jako nejideálnější řešení. Navíc v jeho nastavení můžeme zadat způsob namáhání (tlak nebo tah).

Prvku *LINK180* je možné nastavit počáteční stav napětí pomocí příkazu *INISTATE*. Šrouby pevnostní třídy 4.6 nemají žádnou předepsanou hodnotu utahovacího momentu. Avšak na stavbě se všechny šrouby běžně utahují na určitý utahovací moment a počáteční napětí ve šroubu vzniká. V případě utahování skupiny šroubů, kdy se šrouby utahují

postupně je možné, že ve chvíli utahování posledního šroubu je ten první už nedotažený. Nicméně, šroubový spoj by měl fungovat z principu i s neutaženými maticemi. Vzhledem ke všem těmto vlivům, jsem se rozhodl neaplikovat do šroubů jakékoliv počáteční napětí. Prvek *LINK180* může být namáhán pouze v jeho ose. Tím pádem nám nepřenáší žádná smyková zatížení. Prvku *LINK180* lze pomocí *Sections* nastavit průřezová plocha, ale tvar průřezu prvku už ne. Když si nechám vykreslit skutečný tvar prvku, vykreslí se mi průřez ve tvaru čtverce. Pro výpočet nás zajímá především plocha, do které se roznáší výsledné napětí. Špatný tvar prvku by neměl mít na výsledky vliv.

Kontaktní prvky *CONTA174* pokrývají oblast celé čelní desky a prvky *TARGE170* o něco větší oblasti přilehlé pásnice sloupu. Větší oblast cílového povrchu volím z důvodu možného klouzání čelní desky po pásnici sloupu v důsledku zatížení.

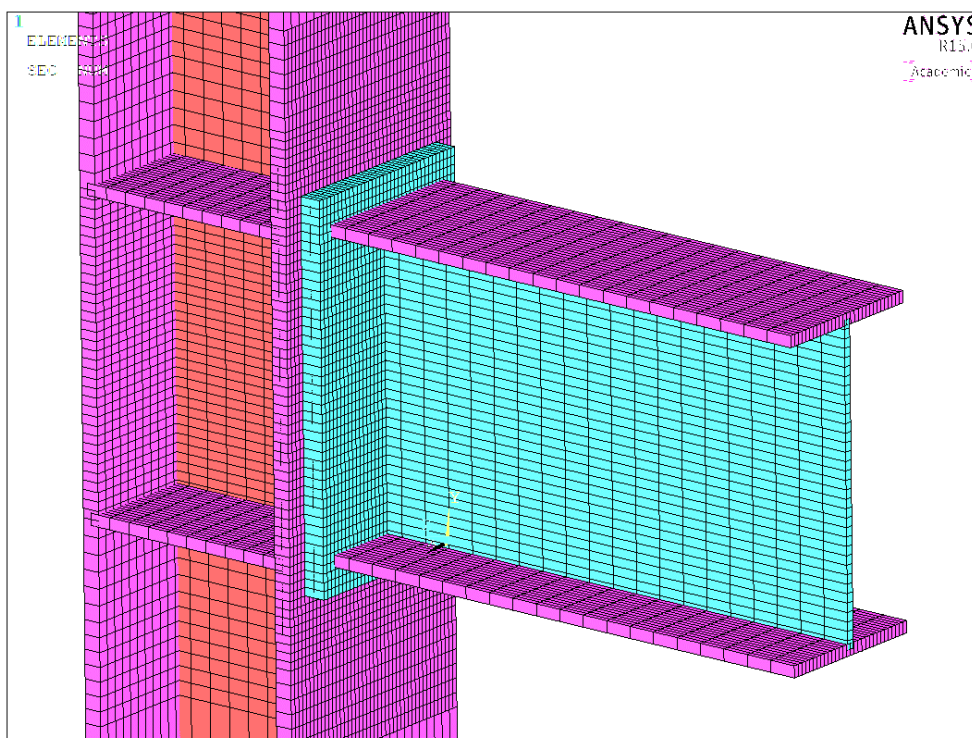
Materiálové charakteristiky oceli jsem nastavil v SW ANSYS jako materiál, který se chová lineárně, je pružný a má izotropní vlastnosti:

- Youngův modul pružnosti – $E = 2,1 \cdot 10^{11} Pa$,
- Poissonovo číslo – $\nu = 0,3$,
- hustota – $\rho = 7850 kgm^{-3}$,
- součinitel tření – $f = 0,15$.

Tvorba sítě konečných prvků probíhá v nástroji *Meshtool*. Zde jde volit různá nastavení síťování. Na základě použitých konečných prvků a prostorového uspořádání *solid modelu* zvolíme způsob generace sítě. Lze nastavit tvar konečného prvku jako trojúhelníkový nebo čtvercový. Pro můj model jsem zvolil tvar čtvercový. Síť konečných prvků lze nastavit jako mapovanou nebo volnou. Pro mapovanou síť musíme nejdříve pomocí *Meshtool* rozdělit všechny *line* na mnou zvolený počet částí. Na základě počtu těchto částí se potom vytvoří příslušný počet konečných prvků. Pokud nastavíme volnou síť konečných prvků, ANSYS sám vysítuje model. Vzniká tak síť velice nepravidelná se spoustou konečných prvků, které mají různé tvary. Pro kvalitu a rychlost výpočtu je důležité se snažit vytvářet mapované sítě konečných prvků. Tento model je zcela z mapované sítě. U některých modelů nejde vždy vytvořit mapovanou síť. Platí to zejména pro trojrozměrné modely vytvořené prvky typu *SOLID*. Ve vyšetřovaných místech jsem zvolil hustější síť konečných prvků, aby byly výsledky přesnější. Mezi tyto místa patří nejbližší oblasti šroubů a kontaktní oblast čelní desky.

Vzhledem k tomu, že analyzuji pouze chování konstrukce v místě styčnicku, nemusím vytvářet *FE model* celé rámové konstrukce. Můj model je tvořen dostatečně dlouhým sloupem, který je vetknut na obou koncích. Uprostřed výšky sloupu se nachází styčnick. Sloup je dostatečně dlouhý, aby vetknutí neomezovalo jeho natočení v místě styčnicku. Natočení sloupu v těchto místech ovlivňuje tuhost styčnicku. Vzhledem k tomu, že pro analýzu tuhosti styčnicku mi stačí vyšetřovat závislost ohybového momentu v místě styčnicku a jeho natočení, není nutné modelovat celý připojovaný nosník. Stačí pouze

rozumně dlouhá konzola, na kterou budu aplikovat sílu, která bude na rameni r od styčnicku, aby vyvozovala příslušné ohybové momenty.



Obrázek 4.4 - Konečněprvkový (FE) model

Dalším krokem je nastavení okrajových podmínek. To probíhá pomocí záložky *Loads* v hlavním menu. Tato záložka se nachází jak v části *Preprocessor*, tak v části *Solution*. Je to z toho důvodu, že některá část uživatelů tvrdí, že okrajové podmínky jako je zatížení a podporové reakce jsou součástí geometrického zadání konstrukce. Druhá část uživatelů si myslí, že okrajové podmínky jsou součástí analýzy konstrukce v části *Solution*. Okrajové podmínky stačí nastavit v jedné z těchto záložek.

Abychom mohli na *FE model* aplikovat okrajové podmínky, musíme určit druh analýzy. Moje analýza je typu statická. Na model je možné aplikovat síly, momenty, napětí, teplotu a gravitační zrychlení. Druhy uložení modelu se nastavují v záložce *Displacement*. Pro můj model je zadána hodnota gravitačního zrychlení

$$g = 9,81ms^{-2}.$$

Ze zadaného gravitačního zrychlení a hustoty materiálu ANSYS sám dopočítá vlastní tíhu modelu. Na rozdíl od numerického modelu, vlastní tíha není v pružnostním modelu uvažována.

V části *Solution* jsem nastavil typ analýzy jako statickou. V ovládacích prvcích řešiče (v *Sol,n Controls*) jsem všechna nastavení nechal, podle doporučení výrobce.

5 KOTVENÍ SLOUPU

Postup analýzy je podobný jako u příkladu styčnicku nosníku se sloupem. Pružnou globální analýzou zjistím tuhost a momentovou únosnost styčnicku a namáhání šroubů. Tyto hodnoty poté porovnám s numerickým modelem.

V příloze této práce je podrobný výpočet návrhové momentové únosnosti a rotační tuhosti. Je stanovena návrhová únosnost dvou kotevních šroubů na tažené straně patní desky a únosnost konzoly desky v ohybu na tažené straně patky.

5.1 Konstrukční uspořádání a návrhové zatížení

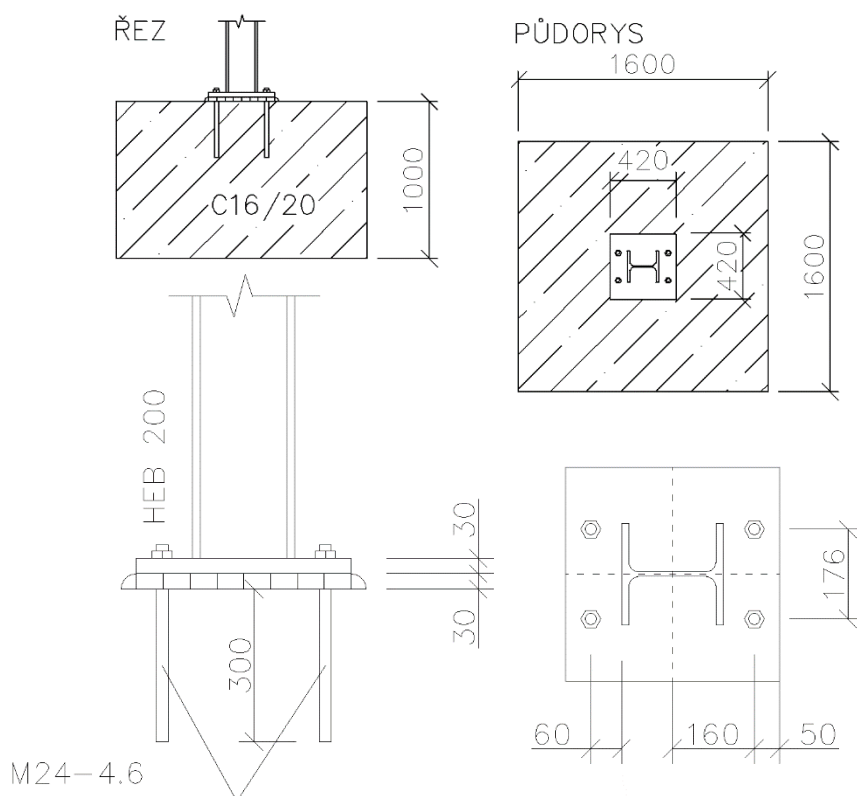
Sloup vysoký 4 m je z profilu HEB 200. V místě paty je přivařen k patnímu plechu, ve kterém jsou čtyři otvory pro kotevní šrouby. Patní plech má tloušťku 30 mm. Kotevní šrouby M24 pevnostní třídy 4.6 spojují sloup s betonovou patkou. Kotevní šrouby jsou osazeny do betonové patky do hloubky 300 mm. Jsou vloženy do předvrtaných vyčištěných otvorů, do kterých se navíc aplikuje chemické lepidlo. Geometrie otvorů pro šrouby odpovídá normativním předpisům pro minimální rozteče a vzdálenosti od konce a od okraje. Sloup s patním plechem je uložen na vrstvu malty tloušťky 30 mm. Malta by měla mít větší pevnost než beton základu.

Kotvení sloupu je navrženo na návrhové zatížení ohybovým momentem $M_{Ed} = 60 \text{ kNm}$ a tlakovou silou $N_{Ed} = 100 \text{ kN}$.

5.2 Materiálové charakteristiky a geometrie konstrukčních prvků

Všechny průřezové charakteristiky v této práci čerpám z [10].

Ocel S235	Šrouby M24 – 4.6
$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$	$f_{yb} = 240 \text{ MPa}$
$f_y = 235 \text{ MPa}$	$f_{ub} = 400 \text{ MPa}$
	$A_s = 353 \text{ mm}^2$
Sloup HEB 200	$A = 452 \text{ mm}^2$
$A = 7810 \text{ mm}^2$	$d_0 = 26 \text{ mm}$
$I = 5,7 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$	



Obrázek 5.1 - Geometrie kotvení sloupu

5.3 Pružná globální analýza

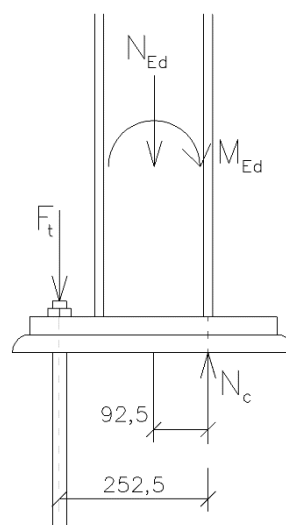
5.3.1 Namáhání šroubů

Pro výpočet tahových sil ve šroubech opět využijí pružné chování materiálu. Statický model uvažuje pouze s působením jedné řady šroubů v tahu (obr. 5.2). Druhá řada šroubů je bez účinku nebo je jeho účinek při výpočtu ohybového namáhání zanedbatelná. Podmínka rovnováhy je v tomto tvaru:

$$M_{Ed} = N_{Ed} \cdot 0,0925 + 2 \cdot 0,2525 \cdot F_t, \quad (5.1)$$

$$F_t = \frac{M_{Ed} - N_{Ed} \cdot 0,0925}{2 \cdot 0,2525}, \quad (5.2)$$

kde M_{Ed} je návrhový ohybový moment,
 N_{Ed} návrhová tlaková síla,
 F_t tahová síla v jednom šroubu.



Obrázek 5.2 - Statický model kotvení

5.3.2 Rotační tuhost

Hlavní komponenty, které se podílejí na výpočtu rotační tuhosti kotvení, jsou:

- beton v tlaku (k_{13}),
- patní deska v ohybu při tahu (k_{15}),
- kotevní šrouby v tahu (k_{16}).

$$k_{13} = \frac{E_c \sqrt{b_{eff} l_{eff}}}{1,275E}$$

$$k_{15} = \frac{0,85 l_{eff} t_p^3}{m^3}$$

$$k_{16} = 1,6 \frac{A_s}{L_b}$$

Podrobný výpočet se nachází v příloze této práce. Byla vypočtena rotační tuhost styčnicku S_j a následně byl styčnick klasifikován jako tuhý.

5.4 Numerická analýza v SW ANSYS

Pro vytvoření *FE modelu* jsou použity prvky *SOLID185*, *LINK180*, *TARGE170* a *CONTA174*. Model je kromě šroubů tvořen zcela prostorovými prvky *SOLID185*. Pomocí těchto prvků můžu snadno vymodelovat skutečný tvar konstrukce v řešených úlohách. Konstrukce je dvouose symetrická, takže mi při modelování stačilo vytvořit pouze čtvrtinu modelu a poté pomocí funkce *REFLECT* vytvořit zbylé části modelu.

Šrouby jsou stejně jako u modelu prvního příkladu modelovány pomocí prvku *LINK180*. Šroubům neaplikuji žádné počáteční napětí. Uzly, kterými je tento prvek zakončen, jsou na horním povrchu patního plechu a 300 mm pod úrovní betonu. Prvek *LINK180* má nastavenou reálnou konstantu tak, aby byl namáhán pouze tahem. Je to z toho důvodu, aby šroub nebránil patní desce ve stlačování se směrem do betonu.

Kontaktní prvky se nacházejí na styku patního plechu s vrstvou z malty. Prvky *CONTA174* jsou součástí patního plechu, který v tomto modelu představuje poddajnou část kontaktních povrchů. Prvky *TARGE170* jsou na horním povrchu malty. Nastavení *KEYOPTS* kontaktních prvků neměním.

Opět nemodeluji svary na patě sloupu. Jejich vliv zanedbávám.

Tato úloha má v modelu dva druhy materiálů. Je nastaveno tření mezi plechem a maltou podle [5].

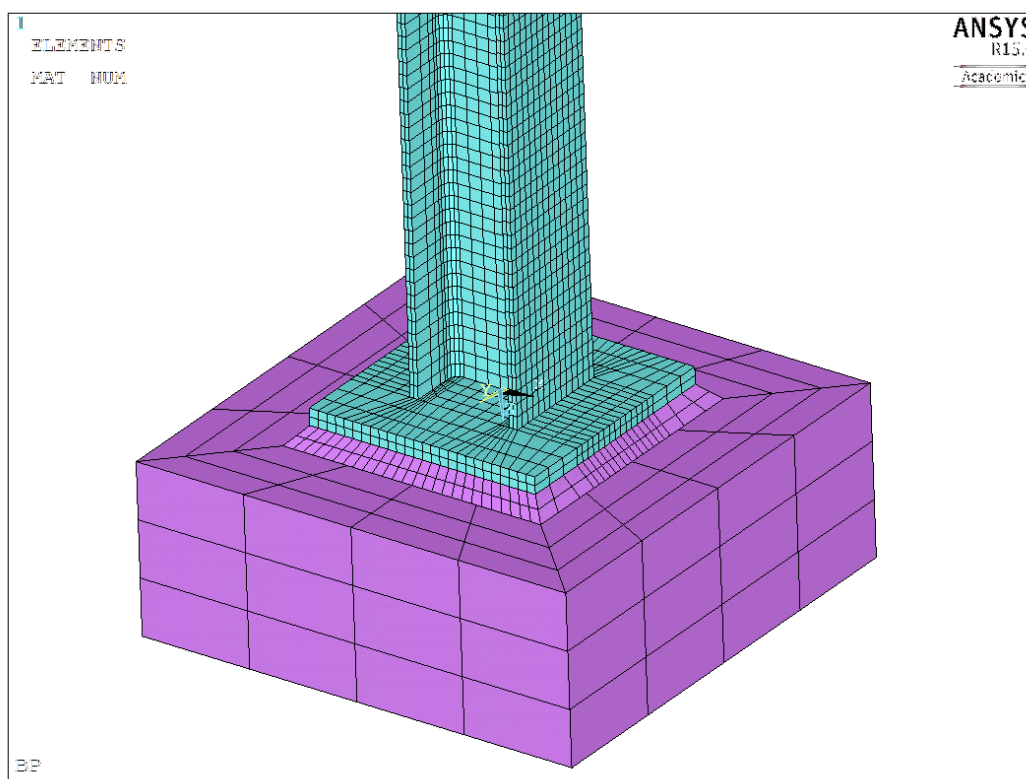
Beton:

- Youngův modul pružnosti – $E_{cm} = 2,75 \cdot 10^{10} Pa$,
- Poissonovo číslo – $\nu = 0,2$,
- hustota – $\rho = 2500 kgm^{-3}$,

Ocel:

- Youngův modul pružnosti $- E_c = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$,
- Poissonovo číslo $- \nu = 0,3$,
- hustota $- \rho = 7850 \text{ kgm}^{-3}$,
- součinitel tření $- f = 0,3$.

Při tvorbě konečněprvkového modelu jsem se snažil dodržovat mapovanou síť. Mapovaná síť je všude kromě místa zaoblení, kde se kříží pásnice se stojinou sloupu. Zde nešla vytvořit rozumná mapovaná síť a ANSYS si zde vytvořil síť automaticky. V místech největšího namáhání ocelové konstrukce je síť hustší. Mezi tato místa patří pásnice sloupu a blízká oblast šroubů. Díky tomu bych měl získat přesnější výsledky.



Obrázek 5.3 - Konečněprvkový (FE) model

Pro vyšetřování tahových sil ve šroubech a tuhosti kotvení nemusím modelovat celou konstrukci. Model je tvořen sloupem vysokým 1 m a patka má výšku 0,3 m.

Okrajové podmínky jsou nastaveny v části *Preprocessor*. Betonová patka je vetknutá ve své spodní části a zatížení aplikuju v místech hlavy sloupu. Jedná se o statický typ analýzy.

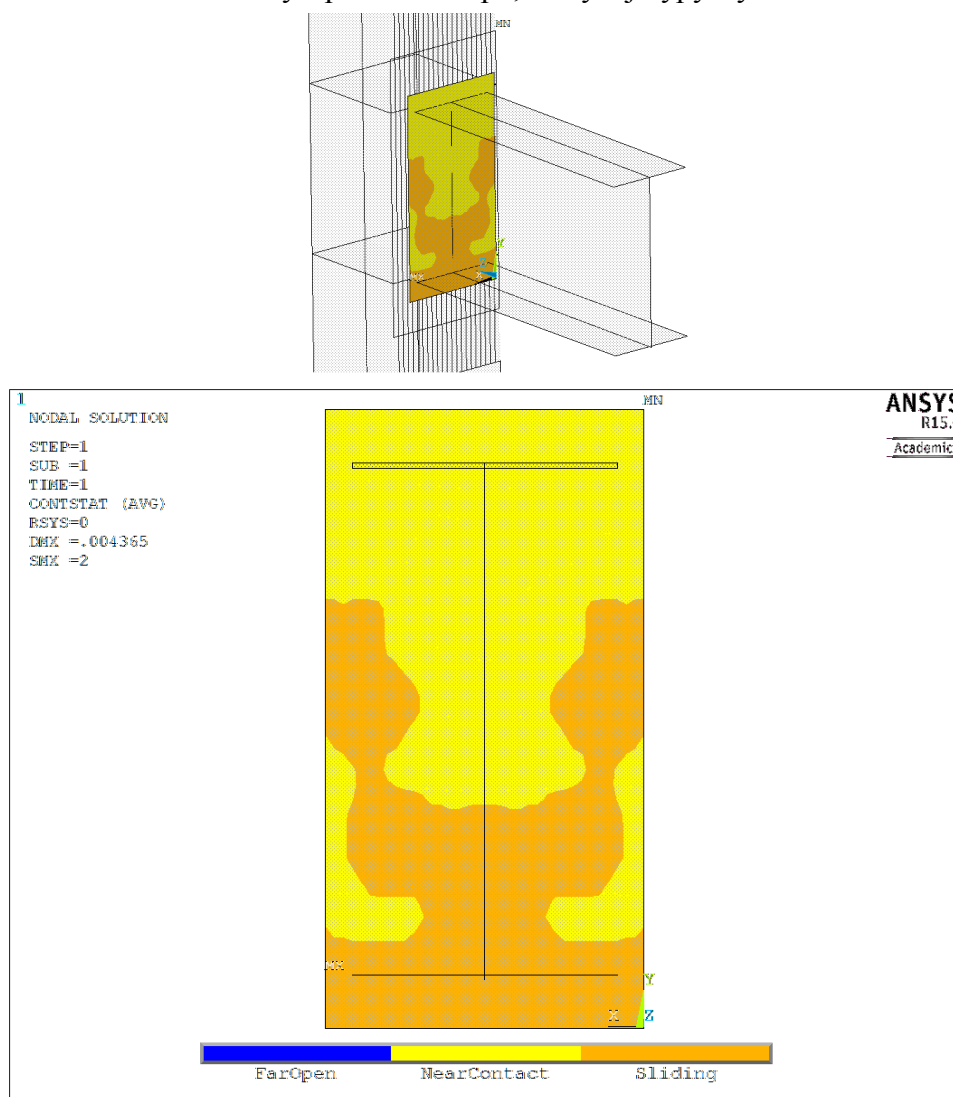
6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

V této kapitole budu porovnávat výsledky z pružné globální analýzy a z analýzy numerické. Postup výpočtů pro pružnostní analýzu vychází z normativních předpisů [1] a [2] a z učebního textu [11]. Tyto výpočty se nacházejí v příloze předkládané práce. Analýza numerická probíhá ve výpočetních programech ANSYS a Scia Engineer.

6.1 Styčník nosníku se sloupem

6.1.1 Namáhání šroubů

Podle pružnostní analýzy jsou šrouby namáhány jako je to na obr. 4.3. Podle tohoto obrázku jsou tahové síly ve šroubech přímo úměrné vzdálenosti od středu tlaku. Ve skutečnosti toto rozdělení nefunguje. Abych si dokázal lépe představit působení vnitřních sil v místě kontaktu čelní desky a pásnice sloupu, analyzuji typy styků v kontaktní oblasti.



Obrázek 6.1 - Situace v místě kontaktu

Na obrázku 6.1 lze vidět místa, kde se o sebe povrchy opírají a mírně po sobě kloužou (*sliding*). Pokud si dáme vykreslit místa, kde na čelní desce vznikají reakce, budou se nacházet právě v těchto místech. Takže oproti statickému modelu pružné analýzy, kde se v podmínkách rovnováhy počítá pouze s přispěním šroubů v tahu, v numerickém modelu jde vidět, že v místech spodní pásnice konzoly se nosník opírá o pásnici sloupu a nutně v těchto místech vznikají nemalé reakce, které se projeví v podmínkách rovnováhy. Tím pádem statický model oddělené části nosníku s čelní deskou vypadá jinak.

Tento rozdílný statický model má vliv na rozdělení a velikost sil ve šroubech, který se od pružného rozdělení sil ve šroubech výrazně liší (tab. 6.1). Rozdělení tahových sil ve šroubech je u numerického modelu nelineární.

Tabulka 6.1 - Tahové síly ve šroubech

Numerická analýza			
M_{Ed} [kNm]	30	40	50
$F_{Ed,1}$ [kN]	76,18	101,22	126,01
$F_{Ed,2}$ [kN]	32,95	41,67	48,96
$F_{Ed,3}$ [kN]	31,80	39,94	46,46
Pružná globální analýza			
M_{Ed} [kNm]	30	40	50
$F_{Ed,1}$ [kN]	41,78	55,71	69,64
$F_{Ed,2}$ [kN]	27,50	36,66	45,83
$F_{Ed,3}$ [kN]	13,21	17,62	22,02

Síly v první řadě šroubů jsou téměř dvakrát větší než síly ve šroubech z pružnostní analýzy. To by znamenalo, že se běžně tyto spoje poddimenzovávají. Dalšími kroky bude zjistit, co má na rozdělení sil do šroubů největší vliv. Jak bylo zjištěno dříve, na čelní desce vznikají nemalé reakce od pásnice sloupu, které přímo ovlivňují tahové síly ve šroubech. Pokusím se zjistit, co ovlivňuje velikost těchto reakcí.

Největší podíl na síly ve šroubech mají aplikovaná zatížení a výše zmíněné reakce v čelní desce. Zatížení je dáno a je stejné jako u pružnostního modelu. Mým úkolem je zjistit, co ovlivňuje reakce v čelní desce. Začnu například tuhostí desky. Tuhost desky je závislá na její tloušťce a materiálu. Materiál zatím nebudu měnit. V tabulce 6.2 jsou znázorněny síly ve šroubech při zatížení 40 kNm pro různé tloušťky desek.

Tabulka 6.2 - Vliv tloušťky čelní desky na namáhání šroubů

zatížení $M_{Ed} = 40 \text{ kNm}$				
t_e [mm]	10	20	25	35
$F_{Ed,1}$ [kN]	96,45	101,22	102,04	100,76
$F_{Ed,2}$ [kN]	45,44	41,67	41,55	42,69
$F_{Ed,3}$ [kN]	32,63	39,94	41,40	43,66

Vliv tloušťky desky se nezdá být dostatečně velký. Stále je mezi silami ve šroubech velký rozdíl. Vliv na reakce v čelní desce musí mít i pásnice sloupu, o kterou se čelní deska opírá. Pásnice sloupu jsou v těchto místech vyztuženy vodorovnými výztuhami. V dalším kroku zjišťuju, jak velký vliv má přítomnost výztuh na rozložení vnitřních sil na čelní desce a ve šroubech.

Z modelu jsem odstranil vodorovné výztuhy pásnice sloupu a zjistil, že jejich vliv je pro šrouby příznivý a zanedbatelný (tab. 6.3). Zvětšení tloušťky výztuhy změnila síly ve šroubech minimálně.

Tabulka 6.3 - Vliv výztuh sloupu na namáhání šroubů

Model	$F_{Ed,1}$ [kN]	$F_{Ed,2}$ [kN]	$F_{Ed,3}$ [kN]
S výztuhami	101,22	41,67	39,94
Bez výztuh	102,65	42,02	38,81
Výztuhy s větší tloušťkou	101,01	41,69	40,16

Další možný vliv, na který není v pružnostní analýze brán ohled, je tloušťka pásnice sloupu. V dalším kroku budu měnit tloušťku pásnice sloupu a budu analyzovat její vliv na daný problém.

Tabulka 6.4 - Vliv tloušťky pásnice sloupu na namáhání šroubů

t_{fc}	$F_{Ed,1}$ [kN]	$F_{Ed,2}$ [kN]	$F_{Ed,3}$ [kN]
10	95,17	42,17	36,35
16	101,22	41,67	39,94
30	104,96	43,92	43,12

Z tabulky 6.4 je zjevné, že čím větší je tloušťka pásnice, tím více jsou namáhány šrouby.

Další rozdíl mezi pružnostní a numerickou analýzou je působení vlastní tíhy. Ta je v systému ANSYS zohledněna. Její vliv je malý, protože naše konzola má délku 0,5 m a váží pouhých 21 kg. To je oproti svislému zatížení 80 kN zanedbatelná hodnota. Její vliv tedy nevyšetřuju.

Zatím jsem zjistil, že geometrický tvar konstrukce neovlivňuje síly ve šroubech natolik, aby v nich vznikaly téměř dvakrát větší síly než při analýze pružnosti. Pokud bych měl vyšetřovat jiné vlivy, napadly by mě okrajové podmínky. Můj model je vetknut v místě paty a hlavy sloupu. V dalším kroku budu analyzovat vliv způsobu aplikace okrajových podmínek (tab. 6.5).

Tabulka 6.5 - Vliv okrajových podmínek na namáhání šroubů

Okrajové podmínky	$F_{Ed,1}$ [kN]	$F_{Ed,2}$ [kN]	$F_{Ed,3}$ [kN]
Vetknutí na obou koncích	101,22	41,67	39,94
Vetknutí v patě sloupu	100,40	41,79	40,55
Kloubově v patě i hlavě sloupu	101,29	41,95	40,29

Vliv okrajových podmínek je také velmi malý. Vlivy změn geometrie a okrajových podmínek na modelu se zdají být malé. Reakce v čelní desce a tím i tahové síly ve šroubech musí ovlivňovat i tření mezi čelní deskou a pásnicí sloupu. Tření mezi těmito povrchy se dá do jisté míry ovlivňovat úpravou povrchu. V dalším kroku změním nastavené tření a zjistím, jaký to má vliv na vnitřní síly ve šroubech.

Tabulka 6.6 - Vliv tření na namáhání šroubů

Souč. tření	$F_{Ed,1}$ [kN]	$F_{Ed,2}$ [kN]	$F_{Ed,3}$ [kN]
0,15	101,22	41,67	39,94
0,30	97,02	18,29	6,64
0,50	96,62	16,15	0,99

Vliv na větší namáhání šroubů by mohly mít i vlastnosti prvku *LINK180*, který je charakterizován tím, že může být namáhán pouze ve směru své osy. V běžné konstrukci šrouby působí proti posouvajícím silám. Tím pádem musí, kromě osových sil, vznikat ve šroubu i vnitřní síly kolmé k podélné ose. V tomto kroku se podívám na to, jak dobře nahrazuje *LINK180* šrouby v konstrukci styčnicku.

V mém modelu působí proti posouvající síle pouze tření mezi pásnicí sloupu a čelní deskou. Šrouby se podílejí na přenosu posouvajících sil pouze malou mírou. Jakmile začne čelní deska klouzat směrem dolů po pásnici sloupu, dochází k mírnému pootočení prvku *LINK180*. Tím pádem se osová síla v prvku rozkládá na svislou a vodorovnou složku. Pootočení tohoto prvku je závislé na posuvu čelní desky směrem dolů. Hodnota posuvu čelní desky závisí na tření mezi povrchy čelní desky a pásnice sloupu. Tím pádem tření ovlivňuje i sílu ve šroubech. O jak velký vliv se jedná, je zobrazeno v tab. 6.6.

Jak se zvyšuje tření mezi deskami, dochází ke snižování tahových sil ve šroubech. K největšímu snížení dochází v té řadě šroubů, v jejichž blízkosti vzniká nejvíce třecích sil. Je to spodní část čelní desky v úrovni pásnice nosníku. Při součiniteli tření 0,50 spodní

řada téměř nepůsobí žádnou silou na konstrukci. Tření ve spodní části čelní desky nejméně ovlivňuje první řadu, tedy tu nejvíce namáhanou.

Na závěr této kapitoly zjistím, jaký vliv by měla kombinace těchto změn na modelu. Tloušťka pásnice sloupu a čelní desky je v obou případech zredukována na 10 mm. Tloušťka vodorovných výztuh je zvětšena na 20 mm. Součinitel tření je 0,30. Okrajové podmínky jsou nastaveny tak, aby v hlavě sloupu bylo bráněno pouze posuvům ve všech směrech a v patě sloupu bylo bráněno všem posuvům i rotacím (vetknutí). Takto změněnou konstrukci porovnám s původně navrženou konstrukcí numerické i pružnostní analýzy (tab. 6.7).

Tabulka 6.7 - Porovnání analýz a modelů

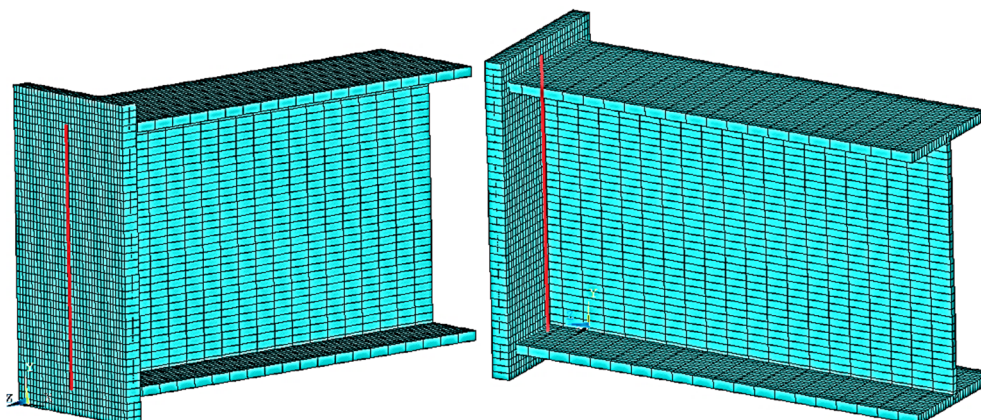
Analýza	$F_{Ed,1}$ [kN]	$F_{Ed,2}$ [kN]	$F_{Ed,3}$ [kN]
Numerická (původní kce)	101,22	41,67	39,94
Numerická (změněná kce)	90,19	33,19	6,71
Pružnostní	55,71	36,66	17,62

Postupnou úpravou modelu jsem byl schopen snížit tahová namáhání šroubů. Otázkou je, kolik těchto úprav je v mezích pravidel pro navrhování ocelových konstrukcí. Touto otázkou se zabývat nebudu, protože to není hlavní cíl práce.

Z výsledků je patrné, že při běžném navrhování (podle pružnostní analýzy) šroubového styčnicku čelní deskou se šrouby poddimenzovávají. Dokazuje to, že při běžném navrhování styčnicků se nepočítá se všemi vlivy, které se v místech styčnicku vyskytují. V tomto případě dochází k nadměrnému namáhání šroubů.

6.1.2 Rotační tuhost styčnicku

Pro analýzu rotační tuhosti styčnicku nosníku se sloupem je nutné zvolit řez, ve kterém naměříme působící ohybový moment a celková pootočení. Řez je veden stojinou nosníku v místě styku s čelní deskou (obr. 6.2).

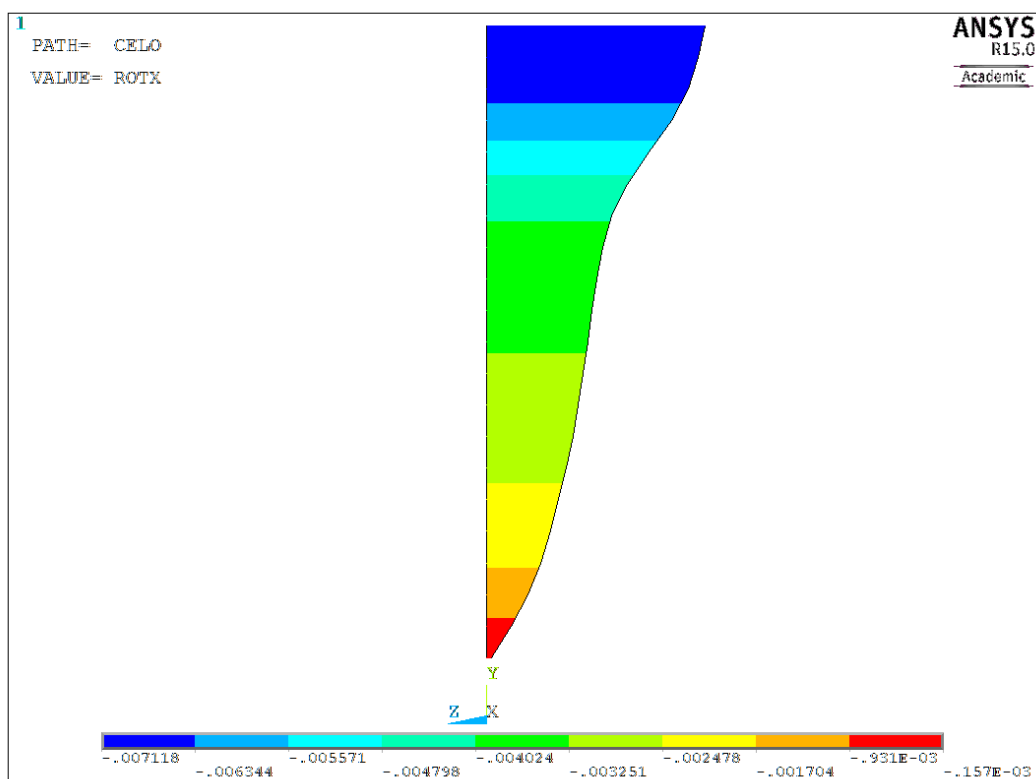


Obrázek 6.2 - Poloha vyšetřovaného řezu

Pokud se podíváme na průběh pootočení ve vyšetřovaném řezu, zjistíme, že jeho průběh není lineární (obr. 6.3). Pro další výpočty je nutné převést tuto nelineární funkci na funkci konstantní, se kterou se dá dál počítat. Pro zjednodušení uvažují průměrnou hodnotu pootočení v řezu. Bylo vypočteno pootočení pro hodnoty návrhového momentu 0, 5, 10, 20, 30 a 40 kNm. Pro výpočet rotační tuhosti použijí vztah:

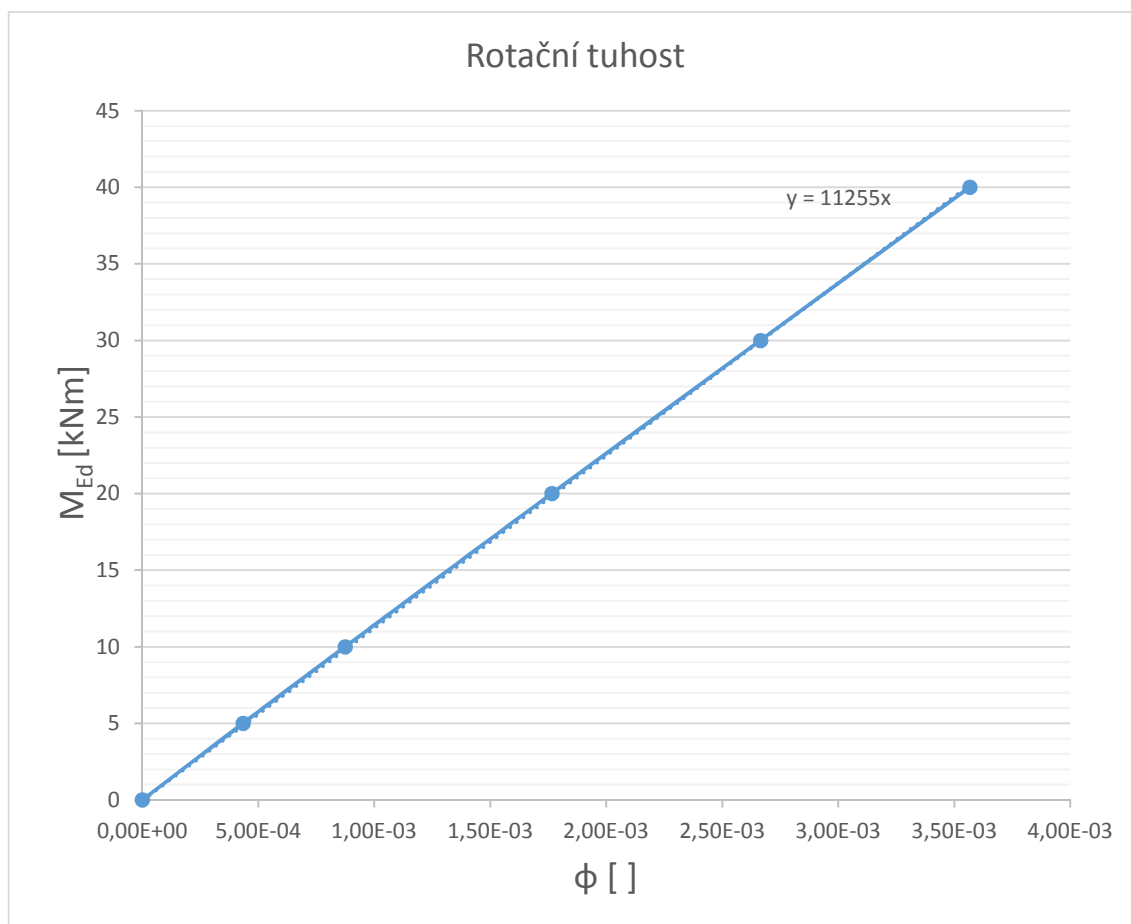
$$S_j = \frac{M_{Ed}}{\phi}, \quad (6.1)$$

kde M_{Ed} je návrhový ohybový moment v místě vyšetřovaného řezu,
 ϕ pootočení části konstrukce ve vyšetřovaném řezu.



Obrázek 6.3 - Průběh natočení nosníku po výšce průřezu

Tento grafický výstup z programu ANSYS lze velmi snadno exportovat v textové formě a následně s těmito daty pracovat v tabulkovém kalkulátoru (Excel apod.). Po vypočtení natočení v místě čelní desky pro dané ohybové momenty jsem schopen určit průběh funkce rotační tuhosti (obr. 6.4).



Obrázek 6.4 - Graf funkce rotační tuhosti

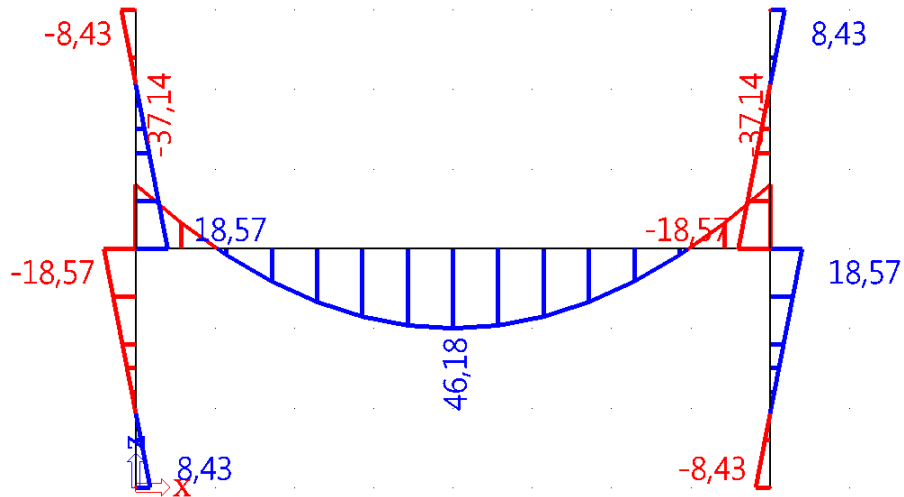
Výsledná rotační tuhost byla naměřena pro zatížení, které bylo menší nebo rovno návrhovému zatížení pro pružnosní analýzu. Závislost ohybového momentu na natočení styčnicku je lineární. V kapitole 1.2 je řečeno, že by tato závislost měla být nelineární. Tento rozdíl je způsoben lineárním chováním materiálu použitého v řešených příkladech. Mohou to způsobovat i relativně malá návrhová zatížení, kdy se nelinearita nestihne projevit a projeví se až při zatíženích, které způsobují plastizování materiálu. Rotační tuhost styčnicku $S_{j,num}$ je v tomto případě směrnice přímky funkce rotační tuhosti. Porovnáme-li rotační tuhosti z pružnosní analýzy S_j a z numerické analýzy $S_{j,num}$ zjistíme, že hodnoty se výrazně liší.

$$S_{j,num} = 1,1255 \cdot 10^4 \text{ kNm}$$

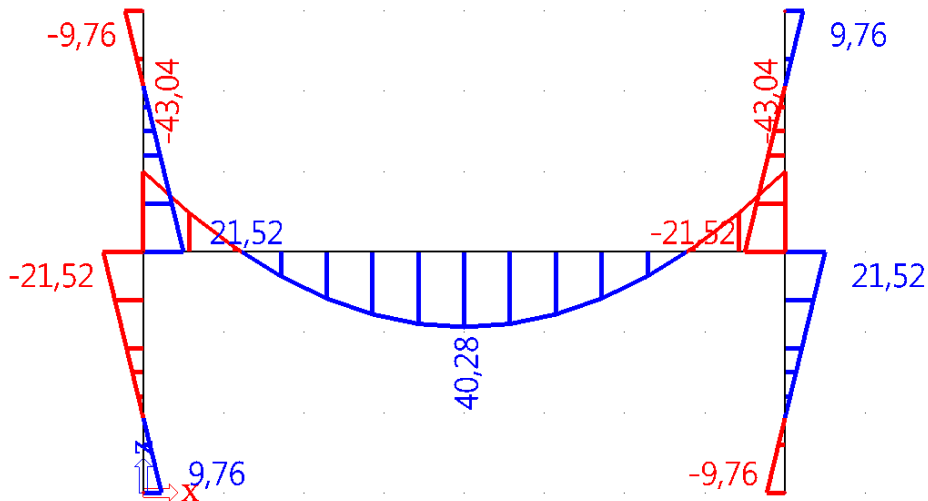
$$S_j = 2,373 \cdot 10^4 \text{ kNm}$$

Model pružné analýzy je tužší. Model numerické analýzy se za stejného zatížení pootočí v místě styčnicku o dvakrát větší úhel. Abych si dokázal představit, jaký to má vliv na přerozdělení vnitřních sil v konstrukci, provedu analýzu v programu Scia Engineer. Zde budu na konstrukci, která odpovídá zadání podle přílohy této práce,

aplikovat styčník jako pružinu s konkrétní rotační tuhostí. Budu pozorovat, jak se jednotlivé modely liší s hlediska momentů, které styčník přenáší a jak je namáhán zbytek ocelové konstrukce. Průřezové charakteristiky odpovídají zadání. Zatížení je tvořeno vlastní tíhou konstrukce a spojitým zatížením 10 kNm^{-1} po celé délce vodorovného nosníku. Konstrukce č. 1 má v místech styčníku pružinu o tuhosti odpovídající rotační tuhosti styčníku numerického modelu (obr. 6.5). Styčník konstrukce č. 2 odpovídá rotační tuhosti styčníku pružnostního modelu (obr. 6.6).



Obrázek 6.5 - Vnitřní síly na konstrukci 1 ($S_{j,num} = 11,255 \text{ MNm}$)



Obrázek 6.6 - Ohybové momenty na konstrukci 2 ($S_j = 23,730 \text{ MNm}$)

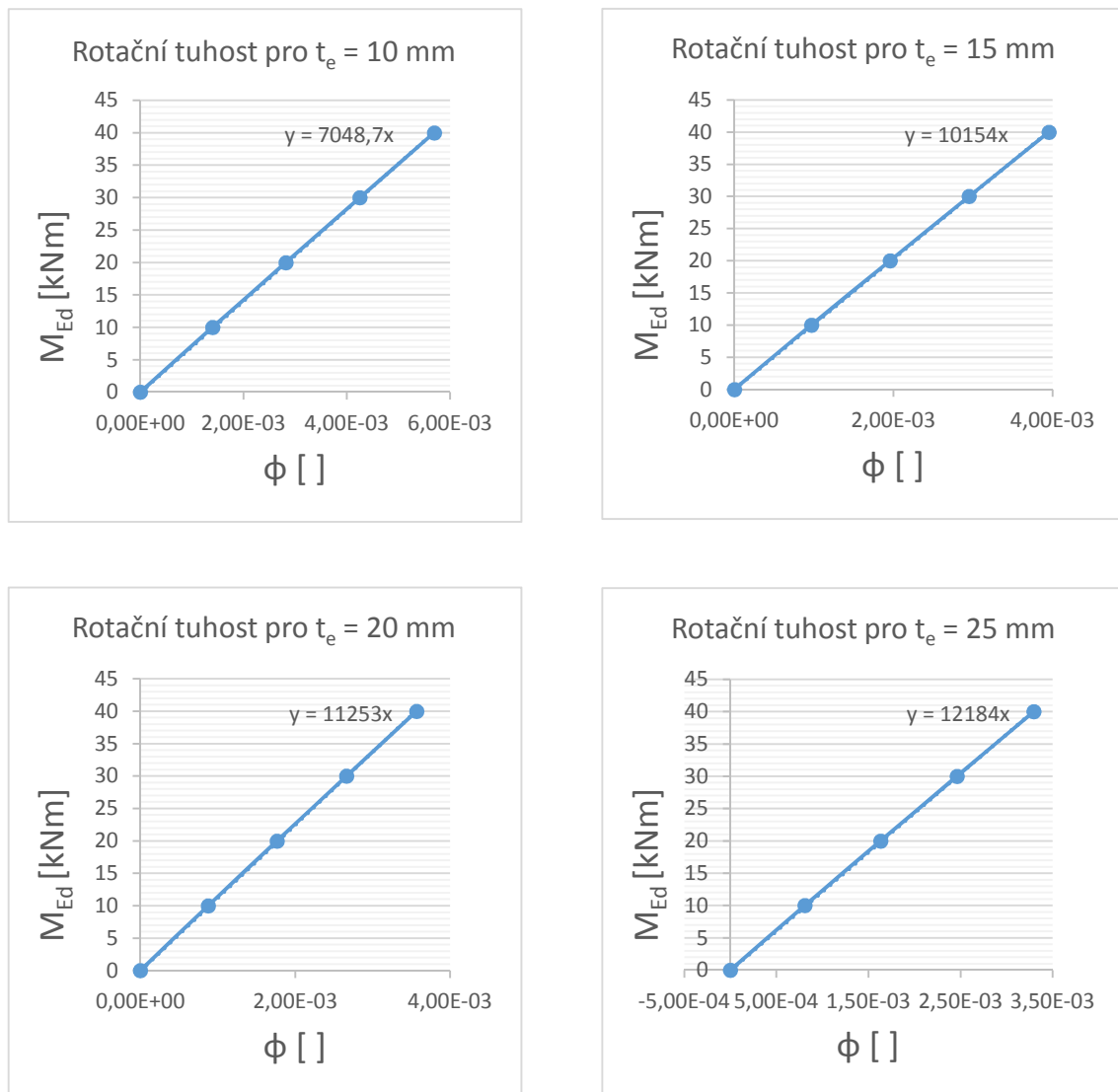
Nosník i sloup vyhoví na daná zatížení s velkou rezervou. Nejslabším místem konstrukce je zde styčník, jehož návrhová momentová únosnost je 44 kNm . Rozdíl v namáhání styčníku jednotlivých druhů analýz se liší o téměř 6 kNm . Ohybový moment v místě styčníku pružnostní analýzy se blíží své návrhové hodnotě. Styčník vycházející z numerické analýzy by vyhověl, i kdybychom zvýšili zatížení na nosníku o 2 kNm^{-1} .

Rozdílnost rozdělení vnitřních sil jednotlivých modelů styčnicků je patrný a mělo by se s ním při návrhu ocelových prutových konstrukcí počítat.

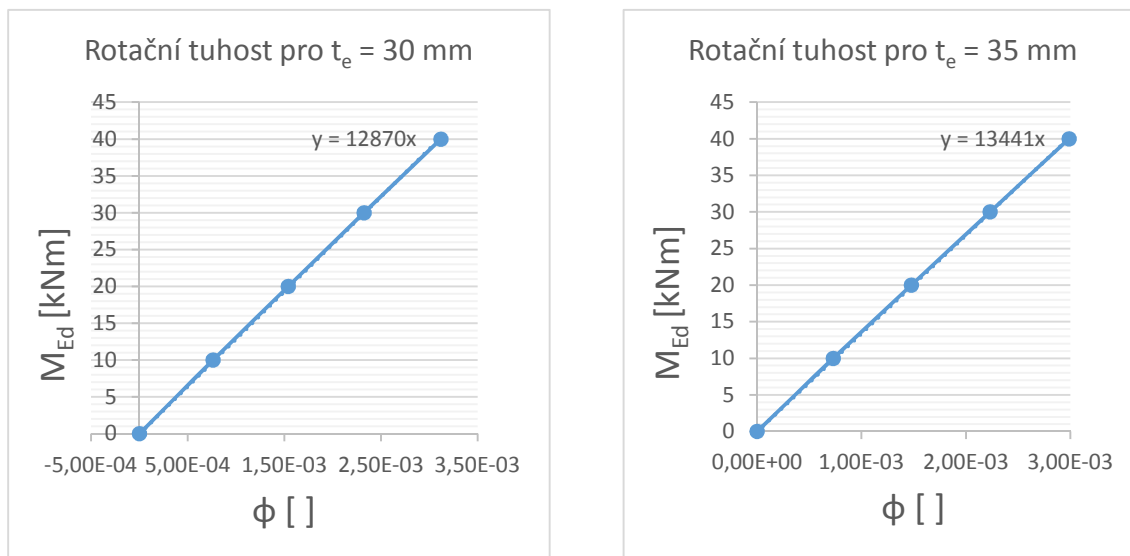
6.1.3 Vliv tloušťky čelní desky na rotační tuhosti styčnicku

V této krátké kapitole budu detailněji analyzovat vliv tloušťky čelní desky na tuhost styčnicku. Budu postupně měnit tloušťku desky a pro každý takový model určím celkovou rotační tuhost styčnicku. Postup získávání rotační tuhosti je totožný jako v kapitole 6.1.2. Modely zatěžuji postupně silami 20, 40, 60 a 80 kN na rameni 0,5 m. Měření probíhá pro tloušťky desky 10, 15, 20, 25, 30 a 35 mm.

V grafech (obr. 6.7 a 6.8) jsou znázorněny číselné hodnoty směrnice funkce, které určují velikost rotační tuhosti.

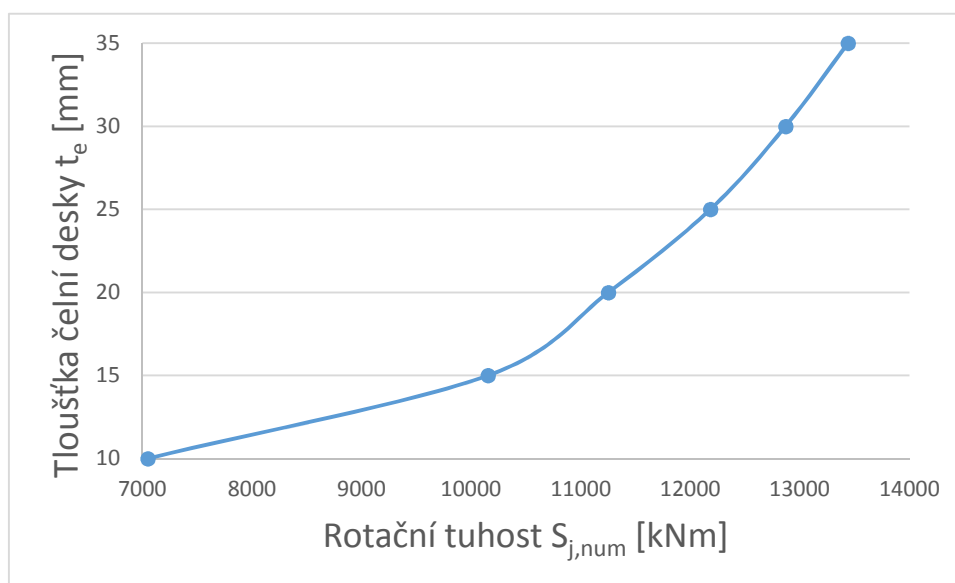


Obrázek 6.7 - Grafy funkce rotační tuhosti



Obrázek 6.8 - Grafy funkce rotační tuhosti

Průběhy funkcí rotační tuhosti jsou lineární. Rotační tuhost zvětšuje svou hodnotu se zvyšující se tloušťkou čelní desky. Na obr. 6.9 je znázorněná závislost tloušťky čelní desky na rotační tuhosti.



Obrázek 6.9 - Závislost tloušťky t_e na rotační tuhosti

Z průběhu funkce vidíme, že při postupném zvyšování tloušťky desky zpomaluje nárůst rotační tuhosti. Od určité hodnoty tloušťky čelní desky není vhodné nadále tloušťku snižovat, protože dochází k rychlému snižování rotační tuhosti. Z toho plyne, že bychom neměli navrhovat příliš tenké čelní desky a zároveň je zbytečné navrhovat desky příliš tlusté.

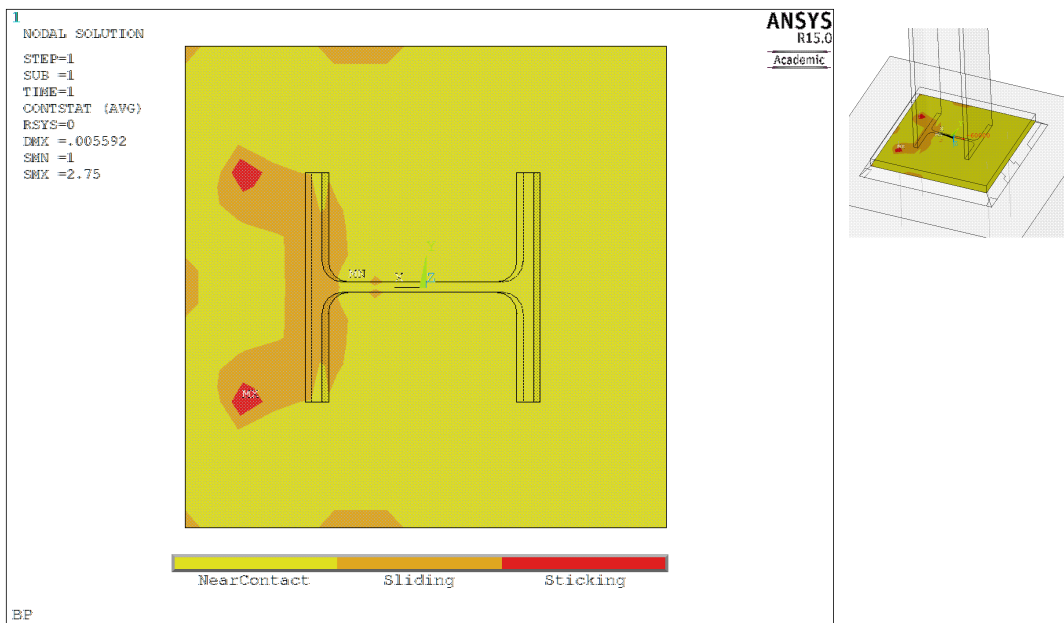
6.2 Kotvení sloupu

Oblast patního plechu zatěžují stejně jako u pružnostní analýzy. V ose sloupu působí svislá tlaková síla $N_{Ed} = 100 \text{ kN}$ a v místě patního plechu působí zatížení ohybovým momentem $M_{Ed} = 60 \text{ kN}$. Model je zatížen vlastní tíhou. Tlakovou sílu N_{Ed} roznesu na celou plochu řezu sloupu. Dělam to z toho důvodu, aby se síla rozložila rovnoměrně do celého sloupu a nedocházelo k lokálnímu namáhání. Namísto zatížení silou, zatěžuju sloup rovnoměrným napětím v průřezu sloupu:

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{100000}{7,81 \cdot 10^{-3}} = 1,2804 \cdot 10^7 \text{ Pa.} \quad (6.2)$$

6.2.1 Oblast kontaktu

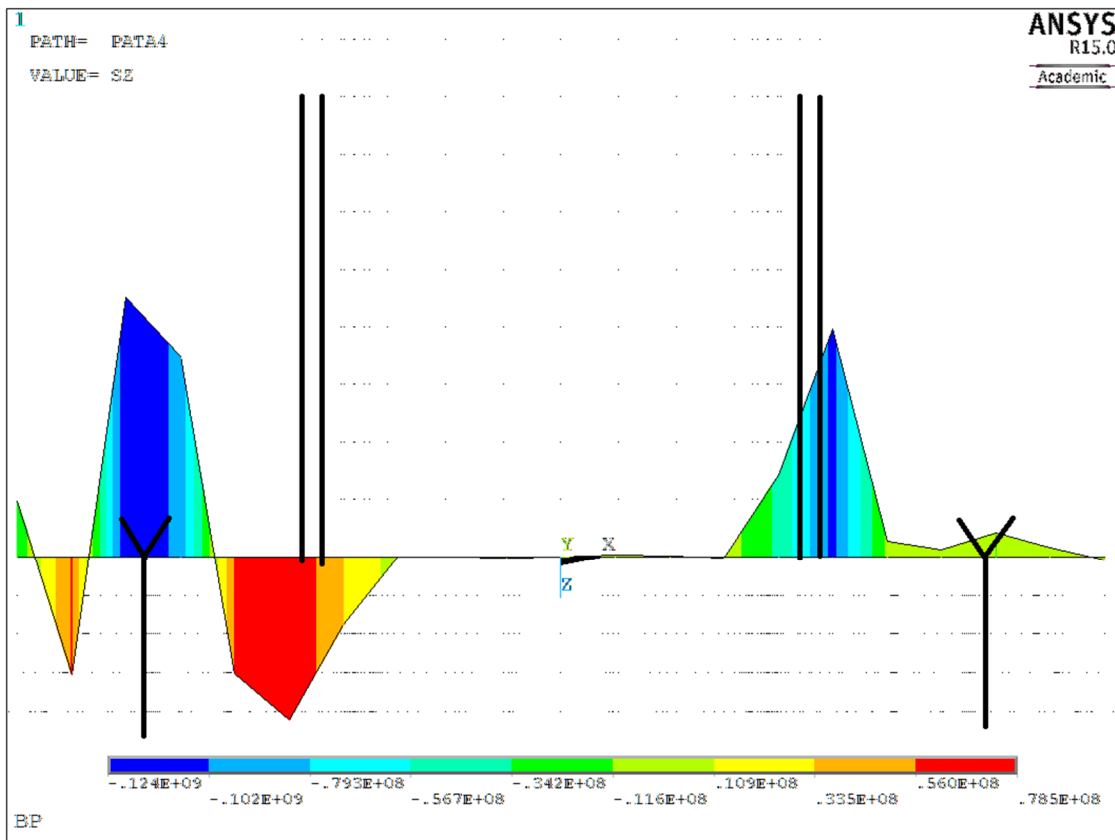
Podle situace v místě kontaktu jde vidět (obr. 6.10), že patní deska se dotýká malty po celém svém spodním povrchu. K žádnému zvedání patního plechu až k vytvoření mezery na straně tažených šroubů nedochází. Nejvíce se patní plech opírá o maltu v místech šroubů. Druhou oblastí stěžejního kontaktu je oblast pod tlačenu pásnicí sloupu. Celá tato oblast je pod tlakem ohýbaného patního plechu.



Obrázek 6.10 - Situace v místě kontaktu

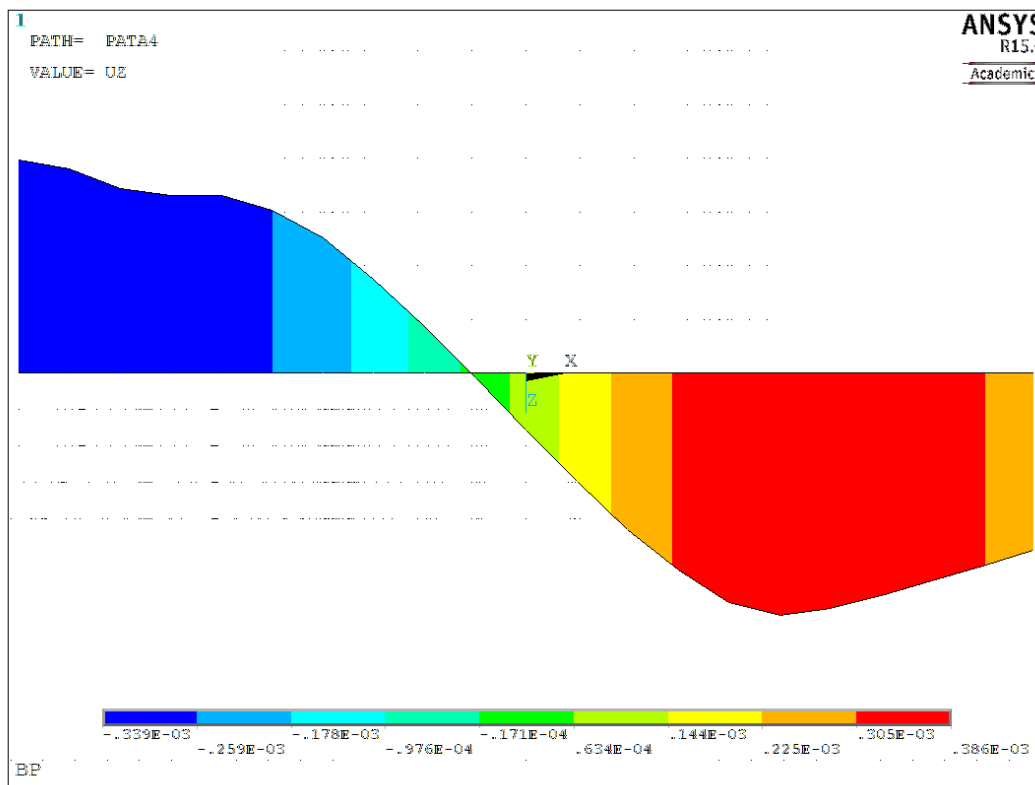
Abych si lépe představil, jakým způsobem je namáhaný patní plech, nechal jsem si vykreslit napětí ve směru osy z v řezu vedeným horním povrchem plechu v místech šroubů. Na obrázku 6.11 je schematicky naznačena poloha šroubů a pásnic sloupu. K největšímu namáhání horního povrchu patního plechu dochází v místech pásnic a

tažených šroubů. Šrouby na straně tlačného patního plechu nijak neovlivňují svislá napětí. Šrouby působí jen v tahu.



Obrázek 6.11 - Rozložení napětí v rovině z v místech šroubů

Ve stejném řezu vyšetřuju i svislé posuny. Které se pohybují pouze v řádech desetin milimetrů, ale dokáží pomoci si představit, jak se patní plech pod sloupem chová (obr. 6.12).



Obrázek 6.12 - Posuvy ve směru osy z v úrovni horního povrchu patního plechu

6.2.2 Namáhání šroubů

Když už vím, jaký vliv má namáhání ohybovým momentem na rozdělení napětí v místech šroubů, mohu začít vyšetřovat velikosti tahových namáhání ve šroubech. V mém modelu se uvažuje pouze s taženými šrouby. Pro oba druhy analýzy jsem použil stejná zatížení, kromě vlastní tíhy, kterou uvažuji pouze v numerickém modelu. Výpočet tahových sil ve šroubech pro pružnostní analýzu se provede podle výrazu (5.2). Pro numerickou analýzu se využije příkaz *ETABLE* v systému ANSYS, který vypíše osová namáhání prvku *LINK180*. Výsledky analýz jsou vypsány v tabulce 6.8.

Tabulka 6.8 - Namáhání šroubů

M_{Ed} [kNm]	50	60	70
N_{Ed} [kN]	100	100	100
$F_{t,num}$ [kN]	57,64	72,70	87,88
$F_{t,el}$ [kN]	80,69	100,50	120,30

Rozdíly mezi tahovými silami ve šroubech jsou opět u obou modelů značně rozdílné. Oproti předchozí úloze jsou šrouby pružnostní analýzy namáhány více. Navrhováním tohoto styčnicku na návrhové zatížení dle pravidel pružnostní analýzy se dopouštíme mírného předimenzování.

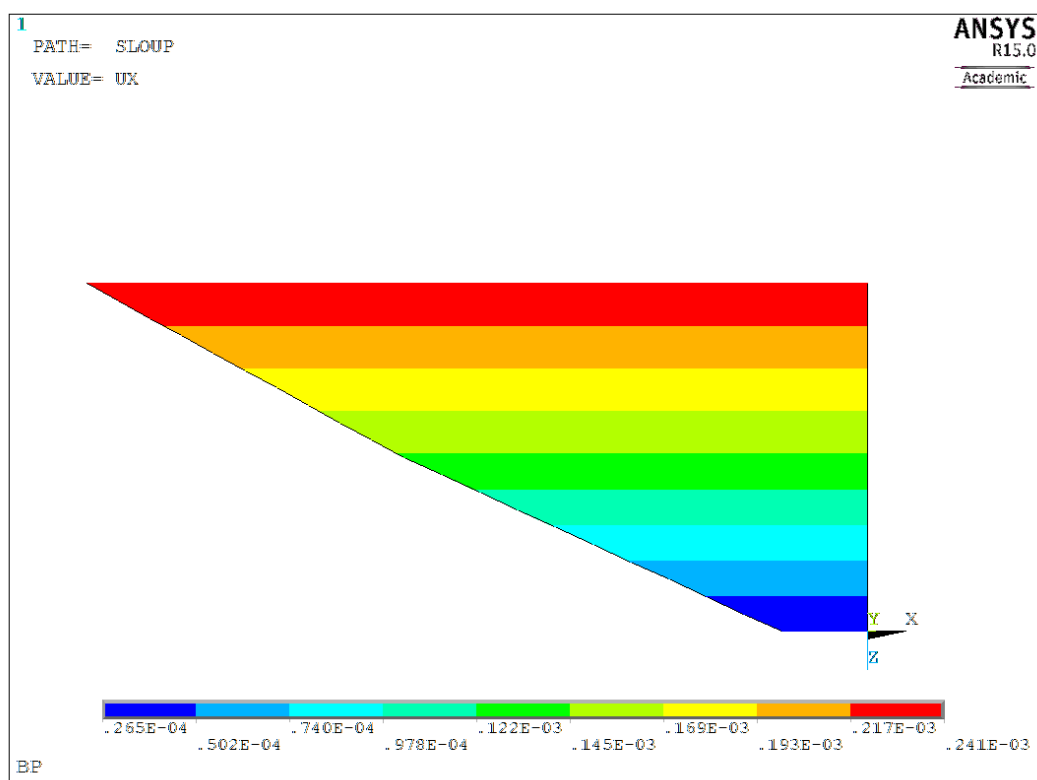
6.2.3 Rotační tuhost kotvení

Pro vyšetřování rotační tuhosti styčnicku, zatěžuju model pouze ohybovým momentem. Aplikuju postupně zatížení 10, 25, 40, 50, 60 a 70 kNm.

Jelikož se jedná o model skládající se z osmiuzlového prvku *SOLID185*, který má v každém uzlu pouze tři stupně volnosti (posuny v ose x , y a z), není možné jednoduše vykreslit rotace kolem osy. Postup získávání natočení styčnicku bude vypadat jinak. V ose sloupu zvolím dva uzly. Jeden bude v místě styku s patním plechem. Ten druhý bude vzdálen 44,4 mm od prvního uzlu. Velikost natočení se spočítá jako podíl rozdílu posuvů uzlů ve směru osy x a svislé vzdálenosti mezi oběma uzly. Rozdíl posuvů ve svislém směru se zanedbává, protože je oproti celkové vzdálenosti velmi malý.

$$\phi = \frac{dx_1 - dx_2}{L_z} \quad (6.3)$$

Na obrázku 6.13 je vykreslen průběh posuvů ve směru osy x na přímce mezi oběma uzly. Tyto posuvy jsou pro model zatížený ohybovým momentem 70 kNm.

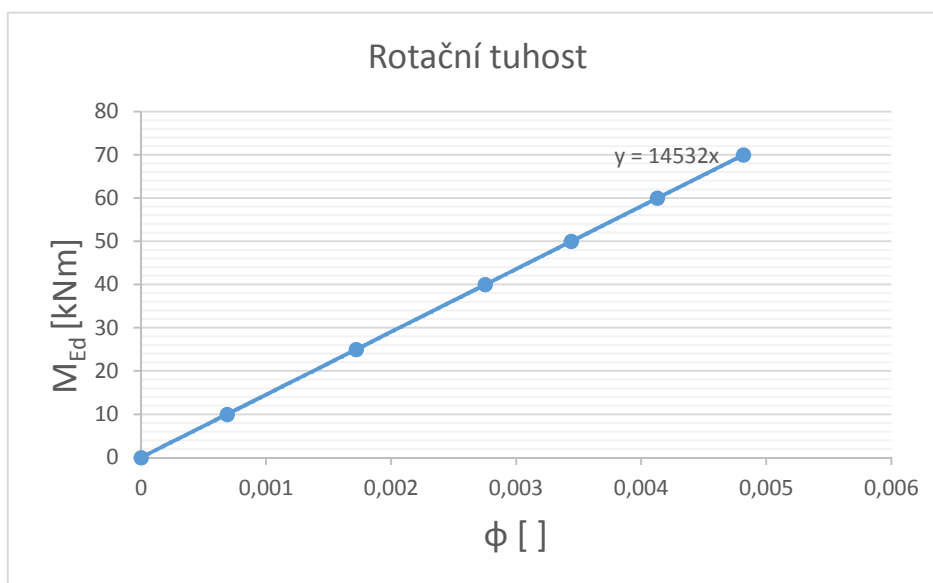


Obrázek 6.13 - Průběh posuvů v ose z pro výpočet natočení styčnicku

Pokud znám ohybový moment a natočení styčnicku (tab. 6.9) jsem schopen spočítat rotační tuhost. Průběh rotační tuhosti je v mezích návrhových zatížení lineární (obr. 6.14).

Tabulka 6.9 - Výpočet natočení pro daná zatížení ohybovým momentem

M_{Ed} [kNm]	10	25	40	50	60	70
L_z [m]	0,04444					
dx_1 [m]	3,435E-05	8,59E-05	1,37E-04	1,72E-04	2,06E-04	2,41E-04
dx_2 [m]	3,772E-06	9,43E-06	1,51E-05	1,89E-05	2,27E-05	2,65E-05
ϕ	6,88E-04	1,72E-03	2,75E-03	3,44E-03	4,13E-03	4,82E-03



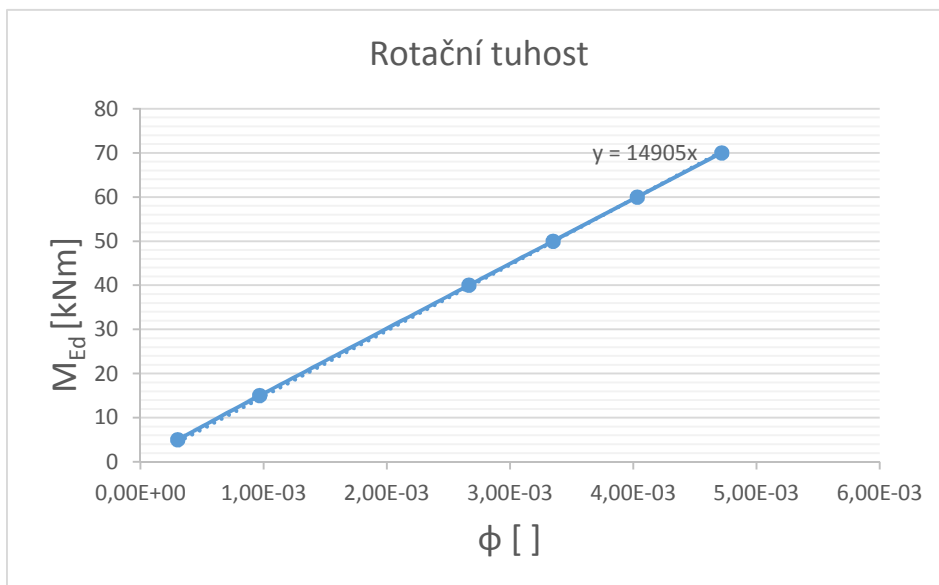
Obrázek 6.14 - Rotační tuhost kotvení sloupu

$$S_{j,num} = 1,4532 \cdot 10^4 \text{ kNm}$$

$$S_j = 1,0124 \cdot 10^4 \text{ kNm}$$

Průběh funkce rotační tuhosti je lineární. Kotvení v pružnostním modelu vyšlo jako tuhé. V numerickém modelu je tomu stejně, ale jeho rotační tuhost $S_{j,num}$ je o 45% větší než rotační tuhost modelu pružnostního S_j .

Model pro analýzu rotační tuhosti namáhám pouze ohybovým momentem. Teď se podívám, jaký vliv na rotační tuhost má osová síla ve sloupu. Model budu zatěžovat ohybovými momenty, ale navíc aplikuju osovou sílu do sloupu, stejně jako tomu bylo při analýze namáhání šroubů. Poté budu pozorovat rozdíly mezi rotačními tuhostmi obou modelů (obr. 6.15).



Obrázek 6.15 - Rotační tuhost kotvení sloupu

Došlo k pouze zanedbatelné hodnotě změny rotační tuhosti. Na chování styčnicku to má velmi malý vliv.

ZÁVĚR

Při inženýrských aplikacích se v mnoha odvětvích běžně využívá pružnostní analýza. Tato analýza zahrnuje pružné chování materiálu a ideální geometrii konstrukce. Tato zjednodušení vedou k rychlému a efektivnímu řešení. Pokud navrhujeme styčník v prutových ocelových konstrukcích, velmi často ho idealizujeme pouze na kloubový nebo tuhý. Cílem této práce bylo zjistit, jestli tato idealizace nemá negativní vliv na navrhování ocelových prutových konstrukcí.

Při návrhu ocelových konstrukcí se klade důraz na to, aby byl použitý materiál namáhán co nejvíce, samozřejmě při dodržení spolehlivosti konstrukce. Tento přístup vede k hospodárnému návrhu konstrukce. Avšak právě chování styčnicků v konstrukci má největší vliv na způsobu rozdělení vnitřních sil v konstrukci. O jak velký vliv jde a jaké to má dopady na namáhání ocelových prutových konstrukcí, je předmětem této práce.

Pro analýzu styčnicků jsem zvolil dva přístupy. Jeden z nich je, už zmiňovaná, pružnostní analýza. Tento druh analýzy jsem porovnával s analýzou numerickou, která byla provedena metodou konečných prvků v prostředí SW ANSYS. Prostřednictvím numerické analýzy modeluji skutečné chování styčnicku. Snažil jsem se volit prvky tak, aby byl model co nejpodobnější reálné konstrukci styčnicku. Nicméně z důvodu usnadnění manipulace s modelem ve fázi analýzy výsledků, jsem byl nucen aplikovat na model některá zjednodušení. Tato zjednodušení nemají zásadní vliv na přesnost výsledků.

Zásadním rozdílem mezi zvolenými druhy modelování je jejich přístup k modelování styčnicku. V případě pružnostní analýzy konstrukce je styčník definován jako uzel, který má nějaké vlastnosti. Jeho dílčí vlastnosti nijak neřeším. Numerická analýza počítá se styčnickem jako s reálnou částí konstrukce, kde je každá jeho část modelována příslušnými konečnými prvky tak, aby co nejlépe vystihovala reálný model.

Numerická analýza byla přímo spjata s využitím kontaktních prvků. Tyto prvky se aplikují na povrchy konstrukce tam, kde dochází ke styku dvou různých povrchů (dvou různých těles). Díky kontaktním prvkům jsem byl schopen určit, jaké je rozdělení napětí v místech kontaktu, jestli dochází ke kontaktu nebo je mezi povrchy mezera a mohl jsem pomocí nich nastavit součinitel tření mezi povrchy.

Z výsledků obou analýz jsou patrné rozdíly v hodnotách rotační tuhosti i v namáhání šroubů. Rotační tuhost je hlavní charakteristika styčnicku a na základě její hodnoty klasifikujeme styčníky v pružné globální analýze. V případě řešeného spoje nosníku se sloupem je rozdíl hodnot rotační tuhosti dokonce více než dvojnásobný. V tomto řešeném příkladu dochází metodou pružnostní analýzy k návrhu poddimenzovaného spoje, protože šrouby jsou podle numerického modelu namáhány více než je tomu tak u analýzy pružnostní.

Oba řešené příklady jsou si modelově velmi podobné. Přesto jejich působení není podobné vůbec, naopak se výrazně liší. V případě spoje nosníku se sloupem jsou šrouby

namáhány více u numerického modelu než u pružnostního. Naopak je tomu u příkladu kotvení sloupu. S rotační tuhostí je to podobné. V případě spoje nosníku se sloupem vychází podle numerické analýzy více než dvakrát menší hodnota rotační tuhosti než podle pružnostní analýzy. U kotvení sloupu rotační tuhost vyšla větší v případě numerické analýzy.

Z výsledků usuzuji, že je vhodné uvážit v globální analýze skutečné chování styčnicků. Ne vždy se styčnick chová tak, jak by se dalo očekávat. V místech styčnicku se vyskytuje mnoho nelineárních jevů, které mohou mít negativní dopad na namáhání konstrukce. I zdánlivě podobné styčnický osazené do stejného typu konstrukce mohou mít výrazně jiný účinek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 1993-1-8. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: ČNI, 2006. Třídící znak 73 1401.
- [2] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006. Třídící znak 73 1401.
- [3] BAJER, Miroslav. *Analýza polotuhých styčníků v ocelových konstrukčních soustavách: The analysis of semi-rigid connections in steel structure systems : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2005, 40 s. ISBN 80-214-2988-7.
- [4] WALD, František. *Softwarová podpora návrhu ocelových a dřevěných konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 144 s. ISBN 978-80-01-04610-4.
- [5] *Odpovědi na otázky k navrhování styčníků ocelových konstrukcí podle evropských norem*. 2003. Editor František Wald. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 125 s. ISBN 80-010-2753-8.
- [6] TEPLÝ, Břetislav a Svatopluk ŠMIŘÁK. *Pružnost a plasticita II*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993, 199 s. ISBN 80-214-0498-1.
- [7] ANSYS® Help Viewer, Version 15.0, 2013, SAS IP, Inc.
- [8] <http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/kuzel/kontakt.htm>
- [9] RÖDER, Václav. *Spoje ocelových konstrukcí* [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://ocel.wz.cz/priklady/>
- [10] *OCELÁŘ.cz - ocelářské tabulky* [online]. © 2010 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.steelcalc.com/cs/>
- [11] WALD, František. *Prvky ocelových konstrukcí: příklady podle Eurokódu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, 159 s. ISBN 80-010-2722-8.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 - Tabulka součinitelů ξ a ζ pro jednotlivé druhy styčníků	16
Tabulka 2.2 - Hodnota součinitele ψ	17
Tabulka 2.3 - Modely styčníků	19
Tabulka 2.4 - Součinitel změny tuhosti η	20
Tabulka 6.1 - Tahové síly ve šroubech	44
Tabulka 6.2 - Vliv tloušťky čelní desky na namáhání šroubů	45
Tabulka 6.3 - Vliv výztuh sloupu na namáhání šroubů	45
Tabulka 6.4 - Vliv tloušťky pásnice sloupu na namáhání šroubů	45
Tabulka 6.5 - Vliv okrajových podmínek na namáhání šroubů	46
Tabulka 6.6 - Vliv tření na namáhání šroubů	46
Tabulka 6.7 - Porovnání analýz a modelů	47
Tabulka 6.8 - Namáhání šroubů	55
Tabulka 6.9 - Výpočet natočení pro daná zatížení ohybovým momentem	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 - Pracovní diagram oceli	12
Obrázek 1.2 - Pracovní diagram styčnicku.....	13
Obrázek 2.1 - Základní komponenty styčnicku.....	14
Obrázek 2.2 - Ramena vnitřních sil	19
Obrázek 2.3 - Rotační tuhost pro pružnou globální analýzu	20
Obrázek 2.4 - Klasifikace styčnicků podle rotační tuhosti.....	20
Obrázek 3.1 - Geometrie prvku SHELL 181	25
Obrázek 3.2 - Geometrie prvku SOLID185.....	26
Obrázek 3.3 - Geometrie prvku LINK180.....	27
Obrázek 3.4 - Geometrie prvku CONTA174	28
Obrázek 3.5 - Geometrie prvku TARGE170	29
Obrázek 3.6 - Schéma kontaktní úlohy.....	30
Obrázek 4.1 - Geometrie styčnicku nosníku se sloupem.....	34
Obrázek 4.2 - Pružné, pružněplastické a plastické rozdělení sil do šroubů.....	34
Obrázek 4.3 - Lineární rozdělení sil ve šroubech	35
Obrázek 4.4 - Konečněprvkový (FE) model.....	38
Obrázek 5.1 - Geometrie kotvení sloupu	40
Obrázek 5.2 - Statický model kotvení	40
Obrázek 5.3 - Konečněprvkový (FE) model.....	42
Obrázek 6.1 - Situace v místě kontaktu	43
Obrázek 6.2 - Poloha vyšetřovaného řezu	47
Obrázek 6.3 - Průběh natočení nosníku po výšce průřezu.....	48
Obrázek 6.4 - Graf funkce rotační tuhosti	49
Obrázek 6.5 - Vnitřní síly na konstrukci 1 ($S_{j,num} = 11,255$ MNm)	50
Obrázek 6.6 - Ohybové momenty na konstrukci 2 ($S_j = 23,730$ MNm).....	50
Obrázek 6.7 - Grafy funkce rotační tuhosti	51
Obrázek 6.8 - Grafy funkce rotační tuhosti	52
Obrázek 6.9 - Závislost tloušťky t_e na rotační tuhosti	52
Obrázek 6.10 - Situace v místě kontaktu	53
Obrázek 6.11 - Rozložení napětí v rovině z v místech šroubů	54
Obrázek 6.12 - Posuvy ve směru osy z v úrovni horního povrchu patního plechu	55
Obrázek 6.13 - Průběh posuvů v ose z pro výpočet natočení styčnicku	56
Obrázek 6.14 - Rotační tuhost kotvení sloupu.....	57
Obrázek 6.15 - Rotační tuhost kotvení sloupu.....	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

ALPD	násobitel hmotnostní matice pro tlumení
ALPX	sekantový součinitel tepelné roztažnosti
ALPY	sekantový součinitel tepelné roztažnosti
BETD	násobitel matice tuhosti pro tlumení
COHE	koheze kontaktu
CTEX	koeficient tepelné roztažnosti
DENS	hustota
EX	Youngův modul pružnosti
EY	Youngův modul pružnosti
EZ	Youngův modul pružnosti
FE	finite element - konečný prvek
FTOLN	faktor tolerance penetrace
GXY	smykový modul pružnosti
GXZ	smykový modul pružnosti
GYZ	smykový modul pružnosti
HGSTF	měřítka tuhosti
MAG	nastavení magnetických sil
MKP	metoda konečných prvků
MU	součinitel tření
PMAX	horní hranice přípustného počátečního proniknutí
PMIN	dolní hranice přípustného počátečního proniknutí
PRXY	Poissonův poměr
PRXZ	Poissonův poměr
PRYZ	Poissonův poměr
R1	reálná konstanta kontaktního prvku
R2	reálná konstanta kontaktního prvku
ROTX	pootočení
ROTY	pootočení
ROTZ	pootočení
TEMP	teplota
THSX	teplotní namáhání
UX	posun
UY	posun
UZ	posun

Symboly

A	plocha průřezu
A_s	Plocha jádra šroubu
b_{eff}	účinná šířka
$b_{eff,c,wc}$	účinná výška stěny sloupu
d_0	poloměr otvoru pro šrouby
d_{x1}	rozdíl souřadnic x
d_{x2}	rozdíl souřadnic x
E	Youngův modul pružnosti
e	excentricita styčnicku
E_{cm}	modul pružnosti betonu
E_s	modul pružnosti oceli
f	součinitel tření
$F_{c,fc,Rd}$	návrhová únosnost komponenty - pásnice a stěna sloupu v tlaku
$F_{c,pl,Rd}$	návrhová únosnost komponenty - beton v tlaku
$F_{C,r,Rd}$	návrhová únosnost v tlaku pravé strany styčnicku
f_{ck}	charakteristická pevnost betonu v tlaku
F_{ed}	návrhová osová síla
$F_{ed,i}$	osová síla ve šroubu
F_t	tahová síla ve šroubu
$F_{t,el}$	tahové síly ve šroubech pružnostní analýzy
$F_{T,l,Rd}$	návrhová únosnost v tahu levé strany styčnicku
$F_{t,num}$	tahové síly ve šroubech numerické analýzy
$F_{t,pl,Rd}$	návrhová únosnost komponenty - patní deska v ohybu
$F_{t,Rd}$	únosnost šroubu v tahu
$F_{t,wc,Rd}$	návrhová únosnost komponenty - stěna sloupu v tahu
f_u	mez pevnosti
f_{ub}	mez pevnosti šroubů
f_y	mez kluzu
f_{yb}	mez kluzu šroubů
G	modul pružnosti ve smyku
g	gravitační zrychlení
h_r	vzdálenost řady šroubů r ke středu tlaku
I	moment setrvačnosti
I_b	moment setrvačnosti nosníku
I_c	moment setrvačnosti sloupu
k_b	součinitel zahrnující vodorovné deformace
K_b	střední hodnota I_b/I_c pro všechny nosníky nad uvažovaným podlaží
K_c	střední hodnota I_c/I_c pro všechny sloupy v uvažovaném podlaží
$k_{C,r}$	součinitel tuhosti v tlaku
$k_{eff,r}$	účinný součinitel tuhosti

k_{eq}	náhradní součinitel tuhosti
k_i	pružný součinitel tuhosti
$k_{i,r}$	součinitel tuhosti představující komponentu i pro řadu šroubů r
$k_{T,l}$	součinitel tuhosti v tahu
L_b	rozpětí nosníku
L_{bu}	účinná délka šroubu
L_c	výška sloupu
l_{eff}	efektivní délka
l_{eff}	účinná délka
L_z	vzdálenost dvou bodů na ose z
m	vzdálenost šroubů od překážek
m_2	vzdálenost šroubů od překážek
M_{Ed}	návrhový ohybový moment
$M_{j,Ed}$	návrhový ohybový moment
$M_{j,Rd}$	návrhová momentová únosnost
$M_{j,Rd,app}$	momentová únosnost pro předběžný návrh
$M_{j,Sd}$	návrhový ohybový moment
M_{Rd}	návrhová momentová únosnost
N_{Ed}	návrhová osová síla
N_{Rd}	návrhová únosnost vyjádřená osovou silou
S_j	rotační tuhost
$S_{j,ini}$	počáteční rotační tuhost
$S_{j,ini,app}$	rotační tuhost pro předběžný návrh
$S_{j,num}$	rotační tuhost z numerického modelu
t_{fc}	tloušťka pásnice nosníku
t_p	tloušťka čelní nebo patní desky
t_{wc}	tloušťka stěny sloupu
V_{Ed}	návrhová posouvající síla
z	rameno vnitřních sil
$z_{C,r}$	rameno vnitřních sil
z_{eq}	náhradní rameno
$z_{T,l}$	rameno vnitřních sil
α	součinitel podle [1]
γ_{MO}	dílčí součinitel
η	součinitel změny tuhosti
λ_0	poměrná štíhlost
μ	poměr tuhostí
ν	Poissonovo číslo
ξ	součinitel pro předběžný návrh rotační tuhosti
ρ	objemová hmotnost
ς	součinitel pro předběžný návrh rotační tuhosti

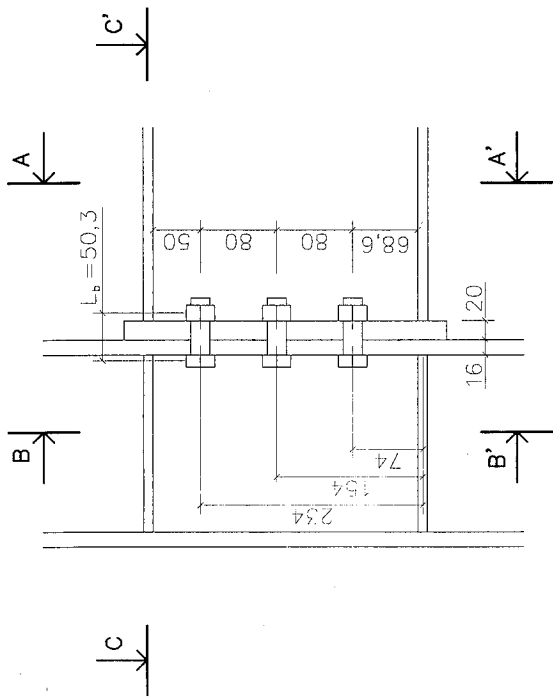
σ	napětí
σ_E	napětí na mezi pružnosti
σ_K	napětí na mezi kluzu
σ_P	napětí na mezi pevnosti
σ_U	napětí na mezi úměrnosti
ϕ	natočení
ψ	součinitel podle [1]
Π	celková potenciální energie
Π_e	potenciální energie vnitřních sil
Π_i	potenciální energie vnějších sil

SEZNAM PŘÍLOH

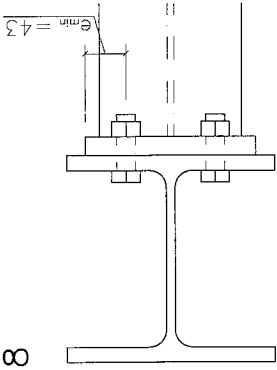
Příloha 1 – Šroubovaný přípoj čelní deskou – statický výpočet

Příloha 2 – Kotvení sloupu – statický výpočet

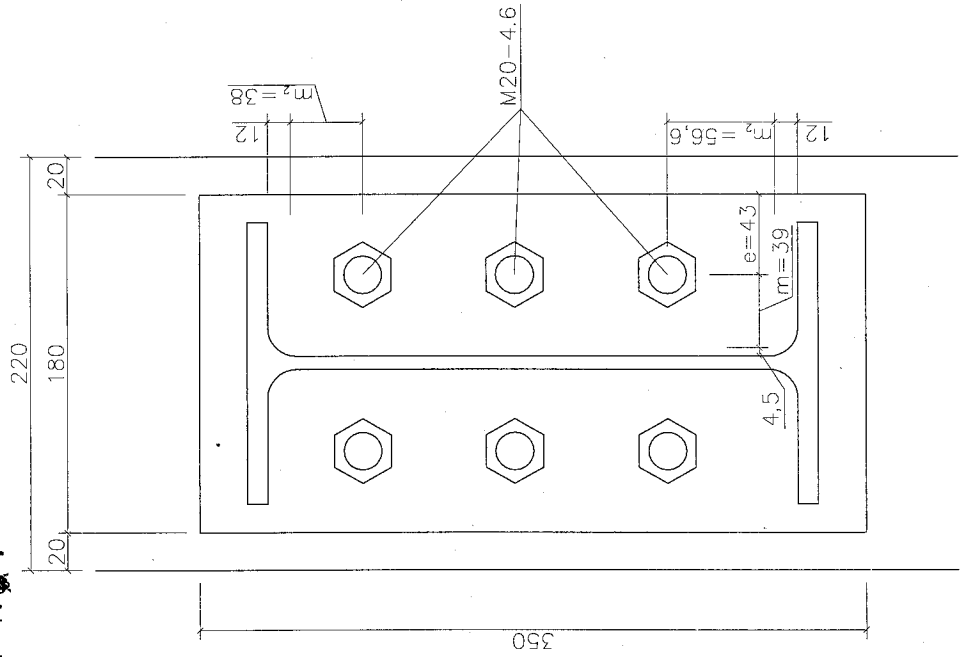
GEOMETRIE
M 1:8



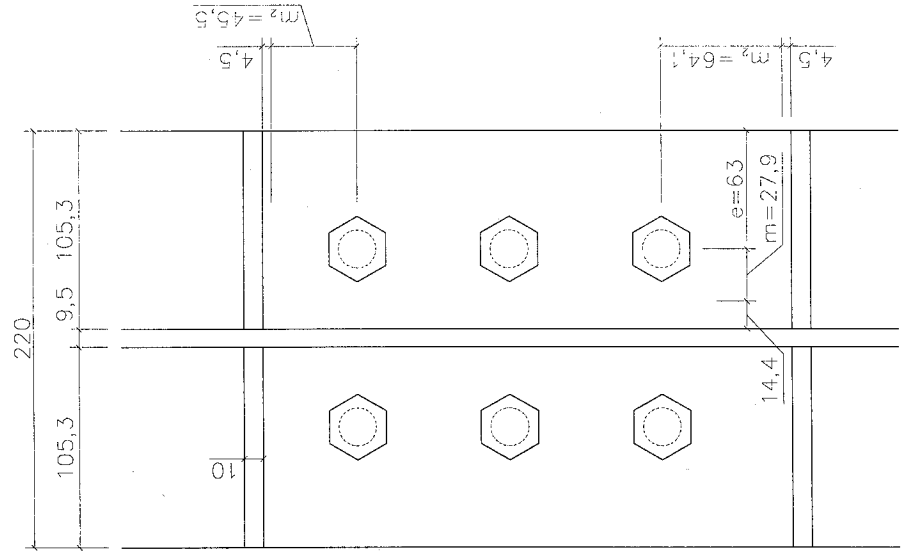
ŘEZ C-C'
M 1:8



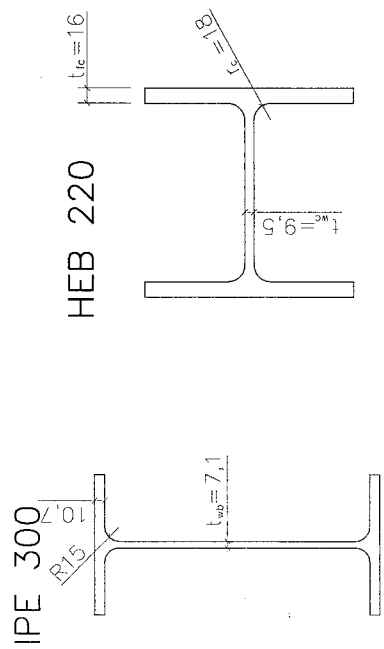
ŘEZ A-A'
M 1:4



ŘEZ B-B'
M 1:4



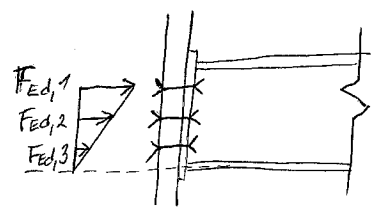
PROFYL
M 1:8



Kontrola geometrie:

otvory pro šrouby jsou navrženy tak, aby odpovídali minimálním hodnotám roztečí podle ČSN EN 1993

Průzná analýza:



1. Material

Ocel S235

$$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Šrouby M20 - 4.6

$$A_s = 245 \text{ mm}^2; A = 314 \text{ mm}^2; d_0 = 22 \text{ mm}$$

$$f_{yb} = 240 \text{ MPa}$$

$$f_{ub} = 400 \text{ MPa}$$

Profily prutu:

- Sloup HEB 220

$$A = 9100 \text{ mm}^2$$

$$I_c = 8,09 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

- Nosník IPE 300

$$A = 5380 \text{ mm}^2$$

$$I_b = 8,36 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

2. Klasifikace stěncek na základě tuhosti

Základní komponenty:

l_3 - stěna sloupu v tahu

l_4 - pásnice nosníku v ohybu

l_5 - čelní deska v ohybu

l_{10} - šrouby v tahu

$$S_j = \frac{E_{eq}^2}{\mu \sum \frac{1}{l_i}}$$

$l_i = \infty$... panel stěny je uztužený

$$l_{eq} = \frac{\sum l_{eff,r} \cdot h_r}{z_{eq}}$$

$$l_{eff,r} = \frac{1}{\sum \frac{1}{l_{i,r}}}$$

2.1 První řada šroubů

$$l_3 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc}}{d_c}$$

$$b_{eff,c,wc} = \min \left\{ \begin{matrix} 2t_{wc} \\ d_{wc} \end{matrix} \right\}$$

$$m = 27,9 \text{ mm}; m_2 = 45,5 \text{ mm}; e = 63 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = \frac{27,9}{27,9+63} = 0,31$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{45,5}{27,9+63} = 0,50$$

$$\alpha = 6,9$$

$$l_{\text{eff},c,wc} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi \cdot 27,9 \\ 6,9 \cdot 27,9 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 192,5 \end{array} \right\} = 175,3 \text{ mm}$$

$$L_3 = \frac{0,7 \cdot 175,3 \cdot 9,5}{152} = \underline{\underline{7,67}}$$

$$L_4 = \frac{0,9 \cdot l_{\text{eff}} \cdot t_c^3}{m^3}$$

$$l_{\text{eff}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ \alpha m \\ \pi m + p \\ 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi \cdot 27,9 \\ 6,9 \cdot 27,9 \\ \pi \cdot 27,9 + 80 \\ 0,5 \cdot 80 + 6,9 \cdot 27,9 - (2 \cdot 27,9 + 0,625 \cdot 63) \end{array} \right\}$$

$$m = 27,9 \text{ mm}; m_2 = 45,5 \text{ mm}; e = 63 \text{ mm}; p = 80 \text{ mm}; \alpha = 6,9$$

$$l_{\text{eff}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 192,5 \\ 167,7 \\ 137,3 \end{array} \right\} = 137,3 \text{ mm}$$

$$L_4 = \frac{0,9 \cdot 137,3 \cdot 16^3}{27,9^3} = \underline{\underline{23,31}}$$

$$L_5 = \frac{0,9 \cdot l_{\text{eff}} \cdot t_p^3}{m^3}$$

$$l_{\text{eff}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ \alpha m \\ \pi m + p \\ 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) \end{array} \right\}$$

$$m = 39 \text{ mm}; m_2 = 38 \text{ mm}; e = 43 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{39}{39+43} = 0,48$$

$$\lambda_2 = \frac{38}{39+43} = 0,46$$

$\Rightarrow \alpha = 6$

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ d_m \\ \pi m + p \\ 0,5p + d_m - (2m + 0,625e) \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20 \cdot 39 \\ 6 \cdot 39 \\ \pi \cdot 39 + 80 \\ (0,5 \cdot 80 + 6 \cdot 39 - (2 \cdot 39 + 0,625 \cdot 43)) \end{array} \right\}$$

$$m = 39 \text{ mm}; m_2 = 38 \text{ mm}; e = 43 \text{ mm}$$

~~39~~
~~38~~

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 245,0 \\ 234,0 \\ 202,5 \\ 169,1 \end{array} \right\} = 169,1 \text{ mm}$$

$$l_3 = \frac{0,9 \cdot 169,1 \cdot 20^3}{39^3} = \underline{\underline{20,52}}$$

$$l_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b}$$

$$l_{10} = 1,6 \frac{245}{50,3} = \underline{\underline{7,79}}$$

Pozn.: Postup výpočtu u 2. a 3. řady je totožný jako u 1. řady. Liší se pouze výpočet účinných délek.

2.2 Druhá řada stoupu

$$l_{3} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ 4m + 1,25e \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 4 \cdot 27,9 + 1,25 \cdot 63 \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 190,4 \end{array} \right\} = 175,3 \text{ mm}$$

$$l_3 = \frac{0,7 \cdot 175,3 \cdot 9,5}{152} = \underline{\underline{7,67}}$$

(24)

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ 4m + 1,25e \\ 2p \\ p \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 190,4 \\ 2 \cdot 80 \\ 80 \end{array} \right\} = 80 \text{ mm}$$

$$l_4 = \frac{0,7 \cdot 175,3 \cdot 9,5}{152} = \underline{\underline{7,67}}$$

(25)

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 200 \text{ mm} \\ 4m + 1,25e \\ 2p \\ p \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2039 \\ 4 \cdot 39 + 1,25 \cdot 43 \\ 2 \cdot 80 \\ 80 \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 145,0 \\ 209,8 \\ 160 \\ 80 \end{array} \right\} = 80 \text{ mm}$$

$$l_5 = \frac{0,9 \cdot 80 \cdot 20^3}{393} = \underline{\underline{9,71}}$$

(210)

$$l_{10} = \underline{\underline{7,79}}$$

2.3 Třetí řada stoupců

(23)

$$l_{eff, c, wc} = \min \left\{ \begin{array}{l} 200 \text{ mm} \\ d_{st} \end{array} \right\}$$

$$m = 27,9 \text{ mm}; m_2 = 64,1 \text{ mm}; c = 63 \text{ mm}$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{27,9}{27,9 + 63} = 0,31 \\ \lambda_2 = \frac{64,1}{27,9 + 63} = 0,71 \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = 6,76$$

$$l_{eff, c, wc} = \min \left\{ \begin{array}{l} 200 - 27,9 \\ 6,76 \cdot 27,9 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 188,6 \end{array} \right\} = 175,3 \text{ mm}$$

$$l_3 = \frac{0,7 \cdot 175,3 \cdot 9,5}{152} = \underline{\underline{7,67}}$$

(24)

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 200 \text{ mm} \\ d_{st} \\ \pi m + p \\ 0,5p + d_{st} - (2m + 0,625e) \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 200 \\ 279 \\ 6,76 \cdot 27,9 \\ \frac{\pi \cdot 27,9 + 80}{0,5 \cdot 80 + 6,76 \cdot 27,9 - (2 \cdot 27,9 + 0,625 \cdot 63)} \end{array} \right\}$$

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 188,6 \\ 167,7 \\ 133,4 \end{array} \right\} = 133,4 \text{ mm}$$

$$l_4 = \frac{0,9 \cdot 133,4 \cdot 16^3}{27,9^3} = \underline{\underline{22,64}}$$

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ 4m + 1,25e \\ m + p \\ 2m + 0,625e + 0,5p \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi \cdot 39 \\ 4 \cdot 39 + 1,25 \cdot 43 \\ \pi \cdot 39 + 80 \\ 2 \cdot 39 + 0,625 \cdot 43 + 0,5 \cdot 80 \end{array} \right\}$$

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 188,6 \\ 167,7 \\ 133,4 \end{array} \right\} = 133,4 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 245,0 \\ 209,8 \\ 202,5 \\ 144,9 \end{array} \right\} = 144,9 \text{ mm}$$

$$l_5 = \frac{0,9 \cdot 144,9 \cdot 20^3}{39^3} = 175,9$$

$$l_{10} = 7,79$$

2.4 Rotační tuhost

$$l_{eff,r,1} = \frac{1}{\frac{1}{l_3} + \frac{1}{l_4} + \frac{1}{l_5} + \frac{1}{l_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{7,67} + \frac{1}{29,31} + \frac{1}{20,52} + \frac{1}{7,79}} = 2,854$$

$$l_{eff,r,2} = \frac{1}{\frac{1}{7,67} + \frac{1}{13,58} + \frac{1}{9,71} + \frac{1}{7,79}} = 2,297$$

$$l_{eff,r,3} = \frac{1}{\frac{1}{7,67} + \frac{1}{22,64} + \frac{1}{17,59} + \frac{1}{7,79}} = 2,791$$

$$l_{eq} = \frac{2,854 \cdot 234 + 2,297 \cdot 154 + 2,791 \cdot 74}{184} = 6,675$$

$$z_{eq} = \frac{\sum l_{eff,r} \cdot h_r^2}{\sum l_{eff,r} \cdot h_r} = \frac{2,854 \cdot 234^2 + 2,297 \cdot 154^2 + 2,791 \cdot 74^2}{2,854 \cdot 234 + 2,297 \cdot 154 + 2,791 \cdot 74} = 184 \text{ mm}$$

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z_{eq}^2}{\mu \sum \frac{1}{d_i}} = \frac{21 \cdot 10^5 \cdot 184^2}{1,0 \cdot \frac{1}{6,675}} = 4,746 \cdot 10^{10} \text{ Nm}$$

$\mu = 1 \dots$ pro určení rotační tuhosti

2.5 Klasifikace stýpnů

Pro tuhé stýpně platí:

$$S_{j,ini} \geq \lambda_b \cdot E \frac{I_b}{L_b} = 25 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \frac{8,36 \cdot 10^7}{8000} = 5,4863 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}$$

$\lambda_b = 25 \dots$ pro soustružce, kterým není dostatečně bráněno ve vodorovných deformacích

$L_b \dots$ délka nosiču ($L_b = 8\text{m}$)

$$S_{j,ini} = \cancel{5,4863} 4,746 \cdot 10^{10} \neq 5,4863 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}$$

\hookrightarrow stýpně není tuhá

Pro kloubové stýpně platí:

$$S_{j,ini} \leq 0,5 E \frac{I_b}{L_b} = 0,5 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \frac{8,36 \cdot 10^7}{8000} = 1,0973 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$S_{j,ini} = 4,746 \cdot 10^{10} \text{ Nmm} \neq 1,0973 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

stýpně není ani kloubová

Požad nespadá stýpně do žádných z těchto dvou klasifikačních tříd, je stýpně polotuhá.

V globální pružné analýze lze pro zjednodušení uvažovat rotační tuhost pro všechny hodnoty $M_{j,ED}$ jako $\frac{S_{j,ini}}{\eta}$, kde $\eta = 2$.

$$S_j = S_{j,ini} / \eta = \frac{4,746 \cdot 10^{10}}{2} = 2,373 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}$$

3. Posouzení sloupce

Návrhové zatížení:

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

$$V_{Ed} = 88 \text{ kN}$$

3.1 Posouzení šroubovaného připoje na M_{Ed}

$$F_{t,Ed} = \frac{M_{Ed}}{2 \cdot 0,359} = \frac{44}{2 \cdot 0,359} = 61,28 \text{ kN} \leq F_{t,Rd} = 70,6 \text{ kN}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{f_{t,sub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 400 \cdot 245}{1,25} = 70,56 \text{ kN}$$

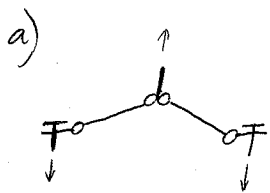
$$L_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m \\ 2m \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi \cdot 27,9 \\ 6,9 \cdot 27,9 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 175,3 \\ 192,5 \end{array} \right\}$$

$$L_{eff} = 175,3 \text{ mm}$$

$$M_{pl,Rd} = 0,25 L_{eff} \cdot t_f^2 \cdot f_y \frac{1}{\gamma_{M0}} = 0,25 \cdot 175,3 \cdot 16^2 \cdot 235 \frac{1}{1,0}$$

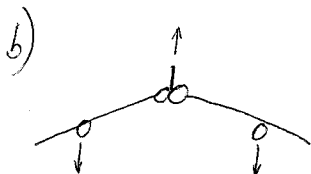
$$M_{pl,Rd} = 2,637 \text{ kNm}$$

3 druhy porušení:



a) pásuice sloupu

$$F_{cf,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 2,637}{0,0279} = 378 \text{ kN}$$



b) pásuice sloupu a šroubů

$$F_{cf,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd} + 2nF_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 \cdot 2,637 + 2 \cdot 0,043 \cdot 70,56}{0,0279 + 0,043}$$

$$n = e_{min} = 43 \text{ mm}$$

$$F_{cf,Rd} = 159,97 \text{ kN}$$

c) šrouby

$$F_{cf,Rd} = F_{t,Rd} = 70,56 \text{ kN}$$

↳ tento způsob porušení rozhoduje

$$F_{t,Ed} = 61,28 \text{ kN} \leq F_{cf,Rd} = 70,56 \text{ kN} \quad \text{Připoj v okyhu vyhoví.}$$

3.2 Posouzení sroubovaného přípoje ve smyku

Při pružném rozdělení sil ve sroubech se předpokládá, že všechny srouby přenesou stejnou souborovou sílu. Návrhová únosnost jednoho sroubu ve smyku v závitu sroubu se vypočte ze vztahu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 400 \cdot 245}{1,25} = 39,2 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{6} = \frac{88}{6} = 14,67 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{14,67}{39,20} = \underline{\underline{0,37}} \leq 1,0 \quad \text{Vyhovuje ve smyku}$$

3.3 Posouzení na kombinaci sřihu a tahu

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{14,67}{39,2} + \frac{61,28}{1,4 \cdot 70,56} = \underline{\underline{0,99}} \leq 1,0 \quad \text{Vyhovuje}$$

3.4 Posouzení přípoje v otláčení sroubů

$$F_{v,Ed} = 14,67 \text{ kN}$$

$$F_{3,Rd} = \frac{k_1 k_2 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$= \min \left(2,8 \frac{43}{22} - 1,7; 1,4 \frac{94,1}{22} - 1,7; 2,5 \right)$$

$$= \min (3,77; 4,29; 2,5) = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right) = \min \left(0,758; \frac{400}{360}; 1,0 \right) = 0,758$$

$$\alpha_d = \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{\beta_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \right) = \min \left(\frac{50}{3 \cdot 22}; \frac{80}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} \right)$$

$$\alpha_d = \min (0,758; 0,962) = 0,758$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,758 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 16}{1,25} = \underline{174,6 \text{ kN}}$$

$$\frac{F_{y,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{14,67}{174,6} = 0,08 \leq 1,0 \quad \text{Uhovuje na otláčení}$$

3.5 Posouzení zroubovaného přípoje v protlačení

$$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,6 \cdot \pi \cdot 32,3 \cdot 16 \cdot \frac{360}{1,25} = \underline{280,6 \text{ kN}}$$

$$\frac{F_{y,Ed}}{B_{p,Rd}} = \frac{61,28}{280,60} = 0,22 \leq 1,0 \quad \text{Uhovuje na protlačení}$$

Posouzení a návrh svarů není předmětem této práce

Přípoj uhlaví na zatížení ohybovým momentem

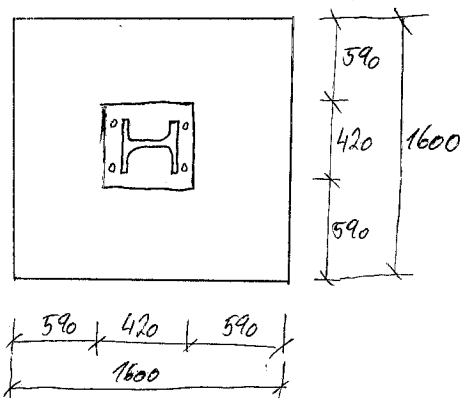
$M_{Ed} = 44 \text{ kNm}$ a posouvající silou $V_{Ed} = 88 \text{ kN}$.

1. Geometrie a průřezové charakteristiky

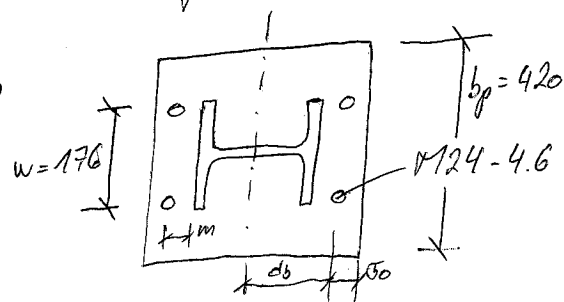
Návrhové zatížení:

$$M_{Ed} = 60 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 100 \text{ kNm}$$

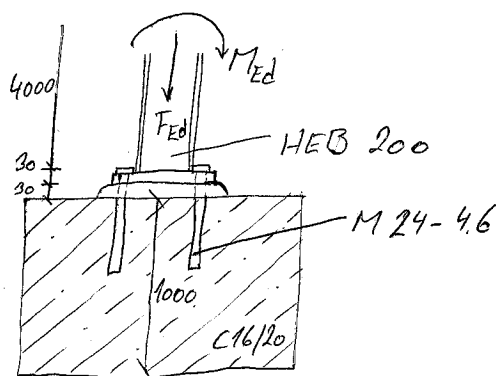


Detail patní desky:

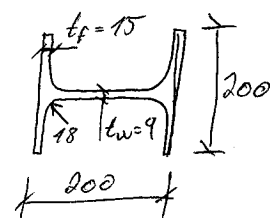


$$m = 60 \text{ mm}$$

$$d_b = 160 \text{ mm}$$



HEB 200



Sloup:

$$A = 7810 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,y} = 6,425 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = 5,7 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

2. Návrhová momentová únosnost $M_{j,Rd}$

$$z_{T,e} = 160 \text{ mm}$$

$$z_{C,r} = 92,5 \text{ mm}$$

$$z = 252,5 \text{ mm}$$

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{60}{-100} = -0,6 \text{ m}$$

$$M_{j,Rd} = \min \left(\frac{F_{T,e,Rd} \cdot z}{z_{C,r}/e + 1} ; \frac{-F_{C,r,Rd} \cdot z}{z_{T,e}/e - 1} \right)$$

$$a) \quad F_{T,e,Rd} = \min (F_{t,wc,Rd} ; F_{t,pl,Rd})$$

2.1 $F_{t,wc,Rd}$ - stěna sloupu v příčném tahu

$$\beta = 1 \Rightarrow \alpha = \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 (\beta e t_{wc} / A_{wc})^2}}$$

$$c_u = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 (201 \cdot 9 / 2485)^2}} = 0,769$$

$$A_{vc} = A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f = 7816 - 2 \cdot 200 \cdot 15 + (9 + 2 \cdot 18) \cdot 15 =$$

$$\underline{A_{vc} = 2485 \text{ mm}^2} \geq \eta \cdot b_w \cdot t_w = 1,2 \cdot 170 \cdot 9 = 1836 \text{ mm}^2 \quad \checkmark$$

$$b_{eff,c,wc} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2T_m \\ T_m + 2e_1 \\ 4m_x + 1,25e_x \\ 2m_x + 0,625e_x + e_1 \\ T_m + p \\ 2e_1 + p \\ 2m + 0,625e + 0,5p \\ e_1 + 0,5p \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 377 \\ 288 \\ 303 \\ 201 \\ 508 \\ 420 \\ 311 \\ 210 \end{array} \right\} = 201 \text{ mm}$$

$m = 60 \text{ mm}$
 $e_1 = 50 \text{ mm}$
 $e_x = 50 \text{ mm}$
 $p = 320 \text{ mm}$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{c_u \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,769 \cdot 201 \cdot 9 \cdot 235}{1,0} = 326,9 \text{ kN}$$

2.2 $F_{t,p1,Rd}$ - patník deska (bez prútičiek sít)

$$M_{p1,Rd} = \frac{0,25 \cdot \Sigma l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\Sigma l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2T_{mx} \\ T_{mx} + w \\ T_{mx} + 2e_x \\ 4m_x + 2e_x \\ e_x + 2m_x + 0,625e_x \\ 0,5 \cdot b_p \\ 0,5w + 2m_x + 0,625e_x \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2T \cdot 60 \\ T \cdot 60 + 176 \\ T \cdot 60 + 2 \cdot 50 \\ 4 \cdot 60 + 2 \cdot 50 \\ 50 + 2 \cdot 60 + 0,625 \cdot 50 \\ 0,5 \cdot 420 \\ 0,5 \cdot 176 + 2 \cdot 60 + 0,625 \cdot 50 \end{array} \right\}$$

$m_x = 60 \text{ mm}$
 $e_x = 50 \text{ mm}$

$w = 176 \text{ mm}$
 $b_p = 420 \text{ mm}$

$$\Sigma l_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 377,0 \\ 364,5 \\ 288,5 \\ 340,0 \\ 201,3 \\ 210,0 \\ 239,3 \end{array} \right\} = 201,3 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot 201,3 \cdot 30^2 \cdot 235}{1,0} = 10,64 \text{ kNm}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd}}{u} = \frac{2 \cdot 10,64}{0,06} = 354,6 \text{ kN}$$

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{L,Rd} = 2 \cdot 101,7 = 203,4 \text{ kN}$$

$$F_{L,Rd} = \frac{\lambda_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 400 \cdot 353}{1,25} = 101,7 \text{ kN}$$

$$F_{L,pl,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}) = \min(354,6; 203,4) = 203,4 \text{ kN}$$

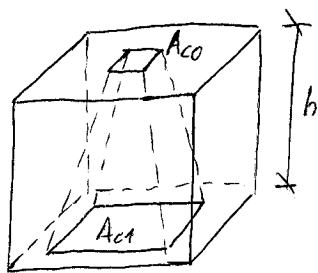
$$F_{T,e,Rd} = \min(F_{L,pl,Rd}; F_{T,wc,Rd}) = \min(203,4; 326,9)$$

$$F_{T,e,Rd} = 203,4 \text{ kN}$$

$$b) \boxed{F_{C,r,Rd} = \min(F_{C,pl,Rd}; F_{C,fc,Rd})}$$

2.3 $F_{C,pl,Rd}$ - beton v hlaku pod pravou pásovicí stoupu

(str. 104 - 1992-1-1)



$$h \geq b_2 - b_1$$

$$h \geq d_2 - d_1$$

$$b_2 \leq 3b_1$$

$$d_2 \leq 3d_1$$

$$c = 1,25 \cdot \epsilon_p = 1,25 \cdot 30 = 37,5 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 2c + t_f = 2 \cdot 37,5 + 15 = 90 \text{ mm} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} A_{co} = 24750 \text{ mm}^2$$

$$l_{eff} = b_f + 2c = 200 + 75 = 275 \text{ mm} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} A_{c1} = 250 \cdot 750 = 187500 \text{ mm}^2$$

$$b_1 = 90 \text{ mm} \quad h \geq 250 - 90 = 160 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$d_1 = 275 \text{ mm} \quad h \geq 750 - 275 = 475 \text{ mm} \quad \checkmark$$

$$b_2 = 250 \text{ mm} \quad h = 1 \text{ m}$$

$$d_2 = 750 \text{ mm} \quad 250 \leq 3 \cdot 90 = 270 \quad \checkmark$$

$$750 \leq 3 \cdot 275 = 750 \quad \checkmark$$

$$F_{Rdu} = A_{co} \cdot f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{co}}} \leq 3,3 A_{co} \cdot f_{cd}$$

$$= 0,02475 \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{1,5} \sqrt{\frac{18750}{0,02475}} \leq 3,3 \cdot 0,02475 \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{1,5}$$

$$726 \text{ kN} \leq 871,2 \text{ kN} \quad \checkmark$$

$$f_{jd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{726 \cdot 10^3}{90 \cdot 275} = 19,56 \text{ MPa}$$

$$F_{c,r,Rd} = F_{cpl,Rd} = f_{jd} \cdot b_{eff} \cdot l_{eff} = 19,56 \cdot 10^3 \cdot 909 \cdot 0,275 = \underline{484,1 \text{ kN}}$$

2.4 $F_{c,fc,Rd}$ - pravá pásnice a stěna sloupu v tlaku

$$F_{c,fc,Rd} = M_{c,Rd} \cdot (h - t_{fb})^{-1}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{N_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{6,425 \cdot 10^{-4} \cdot 2,35 \cdot 10^5}{1,0} = 151 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fc,Rd} = \frac{151}{0,2 - 0,015} = \underline{816,0 \text{ kN}}$$

$$F_{c,r,Rd} = \min(F_{cpl,Rd}; F_{c,fc,Rd}) = \min(484,1; 816,0) = \underline{484,1 \text{ kN}}$$

$$M_{j,Rd} = \min \left(\frac{203,4 \cdot 0,2525}{\frac{0,0925}{-0,6} + 1} \quad ; \quad \frac{-484,1 \cdot 0,2525}{\frac{0,16}{-0,6} - 1} \right)$$

$$M_{j,Rd} = \min(60,7; 96,5) = \underline{60,7 \text{ kNm}}$$

Návrhová momentová únosnost lotvení je $60,7 \text{ kNm}$.

3. rotační tuhost

$$S_j = \frac{E I^2}{\gamma_{m0} \left(\frac{1}{l_{T,e}} + \frac{1}{l_{c,r}} \right)} \cdot \frac{e}{e + e_2}$$

$$e_2 = \frac{2 l_{c,r} \cdot l_{c,r} - 2 l_{T,e} \cdot l_{T,e}}{l_{T,e} + l_{c,r}}$$

$$l_{T,e} \dots l_{15}, l_{16}$$

$$l_{c,r} \dots l_{13}$$

$$l_{13} = \frac{E_c \sqrt{I_{eff} \cdot l_{eff}}}{1,275 \cdot E} = \frac{27,5 \cdot 10^3 \sqrt{90 \cdot 275}}{1,275 \cdot 2,1 \cdot 10^5} = 16,16$$

$$l_{15} = \frac{0,425 l_{eff} \cdot t_p^3}{m^3} = \frac{0,425 \cdot 275 \cdot 30^3}{60^3} = 14,61$$

$$l_{16} = 2,0 \frac{A_s}{L_b} = 2,0 \frac{353}{264,5} = 2,67$$

$$L_b = 8 \cdot 24 + 30 + 30 + 12,5 = 264,5 \text{ mm}$$

$$L_b \leq \frac{8,8 m^3 A_s}{l_{eff} \cdot t^3} = \frac{8,8 \cdot 60^3 \cdot 353}{275 \cdot 30^3} = 90,37 \text{ mm}$$

↳ Páčí síly nezrušují

$$l_{T,e} = l_{15} + l_{16} = 14,61 + 2,67 = 17,28$$

$$l_{cr} = 16,16$$

$$\frac{1}{l_{T,e}} = \frac{1}{l_{15}} + \frac{1}{l_{16}} = \frac{1}{14,61} + \frac{1}{2,67} = 0,443$$

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \left(\frac{1}{l_{T,e}} + \frac{1}{l_{cr}} \right)} \cdot \frac{e}{e + e_s} = \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 252,5^2}{2,894 \cdot (0,443 + \frac{1}{16,16})} = 9,163 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$e_s = \frac{z_{cr} \cdot l_{cr} - z_{T,e} \cdot l_{T,e}}{l_{T,e} + l_{cr}} = \frac{92,5 \cdot 16,16 - 160 \cdot 17,28}{17,28 + 16,16} = -37,98$$

$$\mu = \left(1,5 \frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^4 = \left(1,5 \frac{60}{60,72} \right)^4 = 2,894$$

Pozn.: v soustružci jsou vodorovné deformace omezeny na nejvýše 80%

Kotvení sloupu lze klasifikovat jako tuhé, pokud:

- $\bar{\lambda}_0 \leq 0,5$
- $0,5 < \bar{\lambda}_0 < 3,93$ a $S_{j,ini} \geq 7 (2\bar{\lambda}_0 - 1) E \frac{I_c}{L_c}$
- $\bar{\lambda}_0 \geq 3,93$ a $S_{j,ini} \geq 48 E \frac{I_c}{L_c}$

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{CR}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 5,7 \cdot 10^7}{4000^2} = 7,40 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{7810 \cdot 233}{7,40 \cdot 10^6}} = 0,51$$

$$S_{j,ini} = S_j \cdot \mu = 9,163 \cdot 10^9 \cdot 2,894 = 2,652 \cdot 10^{10} \text{ Nmm}$$

$$S_{j,ini} \geq 7 \cdot (2 \cdot 0,51 - 1) 2,1 \cdot 10^5 \frac{5,7 \cdot 10^7}{4000} = 4,1895 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$S_{j,ini} = 2,652 \cdot 10^{10} \text{ Nmm} \geq 4,1895 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

Kotvení sloupu je také.

Kotvení žroubky:

$$A_s = 353 \text{ mm}^2$$

$$f_{ub} = 400 \text{ MPa}$$

4. Návrhová ~~kotvení~~ únosnost kotvených žroubek v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 400 \cdot 353}{1,25} = 101,66 \text{ kN}$$

5. Únosnost konzoly desky v ohybu

$$F_{p,Rd} = \frac{2 I_{eff} \cdot E \cdot f_y}{6 m \gamma_{M0}}$$

$$I_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2I_m \\ I_m + 2e_x \\ I_m + p \\ 4m + 1,25e_x \\ 2m + 0,625e + e_x \\ 5 \cdot 0,5 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 2I_{60} \\ I_{60} + 2 \cdot 122 \\ I_{60} + 176 \\ 4 \cdot 60 + 1,25 \cdot 122 \\ 2 \cdot 60 + 0,625 \cdot 50 + 122 \\ 420 \cdot 0,5 \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 3770 \\ 432,5 \\ 964,3 \\ 392,5 \\ 273,3 \\ 210 \end{array} \right\} = 210 \text{ mm}$$

$$F_{p,Rd} = \frac{2 \cdot 210 \cdot 30^2 \cdot 235}{6 \cdot 60 \cdot 1,0} = 246,8 \text{ kN} \geq F_{t,Rd}$$

Únosnost konzoly neovlivní únosnost tažené části patky.