



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

Aplikace tensegrity konstrukcí

Application of tensegrity structures

Diplomová práce

Studijní program: SI – Stavební inženýrství
Studijní obor: K – Konstrukce a dopravní stavby
Vedoucí práce: Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Jiří Nerad

Praha 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Nerad Jméno: Jiří Osobní číslo: _____
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Aplikace tensegrity konstrukcí
Název diplomové práce anglicky: Application of tensegrity structures

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

- přehled současného stavu v tensegrity konstrukcích,
- numerické modelování tensegrity konstrukcí,
- aplikaci tensegrity principu na reálné konstrukci (návrh, numerické řešení, výkresovou dokumentaci),
- zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Gómez-Jáuregui, V.: Tensegrity structures and their application to architecture. PUBLICAN – Ediciones de la Universidad de Cantabria, 2010, 285 p.
- 2) Zhang, J. Y., Ohsaki, M.: Tensegrity structures. Springer Japan, 2015, 300 s.
- 3) Články ve světové literatuře.

Jméno vedoucího diplomové práce: Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc.

Datum zadání diplomové práce: 18.2.2019

Termín odevzdání diplomové práce: 19.5.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

14.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT:

Úkolem této diplomové práce bylo zkusit aplikovat tensegrity konstrukci jako nosnou konstrukci stavby, která vyhovuje na mezní stavy únosnosti a použitelnosti. Protože chování tensegrity konstrukcí je velmi odlišné od chování normálních konstrukcí, bylo nutné před návrhem reálné konstrukce udělat výzkum statického působení tensegrity konstrukcí. Poznatky získané výzkumem byly použity při návrhu 52,2 m vysoké tensegrity věže, která má sloužit jako nosná konstrukce rozhledny. Bylo provedeno zjednodušené statické posouzení této konstrukce, kterým bylo dokázáno, že konstrukci lze nadimenzovat tak, aby vyhověla.

KLÍČOVÁ SLOVA:

tensegrity, simplex, infinitezimální mechanismus, tensegrity konstrukce, tensegrity věž, věž, rozhledna, needle tower, rostock tower, předpětí, předpjaté konstrukce, ocelové konstrukce, nosná konstrukce, statický výpočet

ABSTRACT:

The aim of this diploma thesis was to try to apply tensegrity construction as a load-bearing structure of a building which satisfies the ultimate and serviceability limit states. Because the behavior of tensegrity structures is very different from the behavior of normal structures, it was necessary to do a research of static behavior of tensegrity structures before designing a real structure. The research findings were used to design a 52,2 m high tensegrity tower, which will serve as a load-bearing structure of an observation tower. A simplified static assessment of this structure has been performed to demonstrate that the structure can be designed to satisfy.

KEYWORDS:

tensegrity, simplex, infinitesimal mechanism, tensegrity structure, tensegrity tower, tower, observation tower, needle tower, rostock tower, prestressing, prestressed structures, steel constructions, load-bearing structure, static calculation

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně a pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Prof. Ing. Josefa Macháčka, DrSc. a konzultací s Ing. Jiřím Lahodným, Ph.D.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 17. 5. 2019

.....

podpis autora

Jiří Nerad

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě chci poděkovat Prof. Ing. Josefovi Macháčkovi, DrSc. za vedení mé práce, za dobré rady, podporu a za všechno, co mě naučil.

Dále chci poděkovat Ing. Jiřímu Lahodnému, Ph.D. za konzultace ohledně dynamiky, zatížení větrem a mezních stavů použitelnosti.

Na tomto místě chci také napsat, že NEděkuji tvůrcům programu SCIA Engineer za všechny problémy, které mi způsobily chyby a nedostatky v tomto programu, za jejich nezodpovědnost, a za to, že dopláčím na jejich chyby.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	REŠERŠE	9
2.1	Teorie	9
2.1.1	Definice „tensegrity konstrukce“	9
2.1.2	Historie.....	9
2.1.3	Infinitezimální mechanismy a výpočetní metody.....	9
2.1.4	Simplexy a soustavy simplexů.....	10
2.2	Příklady zrealizovaných konstrukcí	12
2.3	Výhody a nevýhody tensegrity konstrukcí.....	16
3	ZJEDNODUŠENÝ VÝZKUM STATICKÉHO PŮSOBENÍ TENSEGRITY KONSTRUKCÍ S PARAMETRICKOU STUDIÍ KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ PRO ZVÝŠENÍ TUHOSTI	17
3.1	Infinitezimální mechanismy	18
3.2	Simplexy	23
3.2.1	Předpětí.....	27
3.2.2	Stabilita	39
3.2.3	Zatížení.....	40
3.2.3.1	Svislé zatížení třemi silami (svislý tlak/tah)	44
3.2.3.2	Kroucení trojicí sil	66
3.2.3.3	Vodorovné zatížení třemi silami (zkosení, smyk)	87
3.2.3.4	Ohyb	93
3.2.3.5	Vodorovné zatížení jednou silou (ztráta stability zkroucením).....	99
3.2.3.6	Vodorovné roztažení horní podstavy třemi silami	105
3.2.3.7	Stlačení horního vodorovného táhla	111
3.2.3.8	Stlačení svislého táhla	118
3.2.3.9	Zatížení teplotními změnami.....	124
3.2.4	Dynamika	125
3.3	Soustavy simplexů.....	127
3.3.1	Věže.....	127
3.3.1.1	Nalezení způsobu, jak spojovat simplexy	127
3.3.1.2	Výběr nejvhodnějšího konstrukčního řešení.....	129
3.3.1.3	Nalezení maximální výšky.....	137

4 ZJEDNODUŠENÝ NÁVRH A POSOUZENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE TENSEGRITY	
ROZHLEDNY	142
4.1.1 Návrh.....	142
4.1.1.1 Dispozice.....	142
4.1.1.2 Materiály	142
4.1.1.3 Průřezy.....	142
4.1.2 Zatížení (charakteristické hodnoty)	142
4.1.2.1 Zatěžovací stavy.....	142
4.1.2.2 Kombinace zatížení.....	145
4.1.3 Vnitřní síly, deformace a reakce	152
4.1.4 Posouzení.....	153
4.1.5 Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání	154
4.1.6 Závěr	155
5 ZÁVĚR	157
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	158
6.1 Seznam použité literatury	158
6.2 Seznam použitých internetových zdrojů.....	159

1 ÚVOD

Práce je rozdělena do 3 částí.

V první části (kapitola 2) je rešerše.

Ve druhé části (kapitola 3) je zjednodušený výzkum statického působení tensegrity konstrukcí s parametrickou studií pro nalezení vhodného konstrukčního řešení pro zvýšení tuhosti tensegrity konstrukcí. Nejdříve se v této části zkoumá statické působení infinitezimálních mechanismů, dále tensegrity simplexů, a nakonec chování složitějších tensegrity konstrukcí (soustav simplexů).

Ve třetí části (kapitola 4) je zjednodušený návrh a posouzení reálné tensegrity konstrukce, která vyhoví na mezní stavy únosnosti a použitelnosti. K tomuto návrhu jsou využity důležité poznatky získané v předchozích kapitolách.

Protože se všechny informace nedají vytisknout na dvojrozměrné papíry, je k této práci přiloženo CD s výpočetními modely, na které se odkazují v textu.

2 REŠERŠE

Úkolem této rešerše je zjistit vše z toho, co se o tensegrity konstrukcích na světě ví, co mi pomůže splnit zadání této práce, abych na to nemusel znova přicházet, vymýšlet něco, co už někdo vymyslel atd. Při studiu literatury jsem narazil na spoustu mylných informací. Když jsem toto zjistil, rozhodl jsem se věnovat rešerši minimum času a zaměřil jsem se v této práci především na vypracování kapitol 3 a 4. Je nemožné pouze studiem literatury rozlišit, co je správně a co správně není. Proto jsem musel pravdivost informací získaných rešerší ověřit v kapitole 3.

2.1 Teorie

2.1.1 Definice „tensegrity konstrukce“

V literatuře je definic více, takže neexistuje žádná jednoznačná definice. Stejně je to jen slovíčkaření, které není v praxi při navrhování konstrukcí užitečné.

Obecně platí, že tensegrity konstrukce se skládá pouze z tažených a tlačných prvků, tlačné prvky se navzájem nedotýkají a jsou obaleny kontinuálním tahem.

Konstrukce, které toto splňují, se nazývají „čisté tensegrity konstrukce“. Tento termín jsem našel v knize [2].

Pokud jsou čisté tensegrity konstrukce upraveny tak, že se tlačné prvky navzájem dotýkají a/nebo jsou ohýbané, jedná se o nečistou tensegrity konstrukci.

2.1.2 Historie

Termín tensegrity poprvé použil Fuller v roce 1948.

Důležití lidé – Fuller, Snelson a další

Významné patenty – [10], [11].

2.1.3 Infinitesimální mechanismy a výpočetní metody

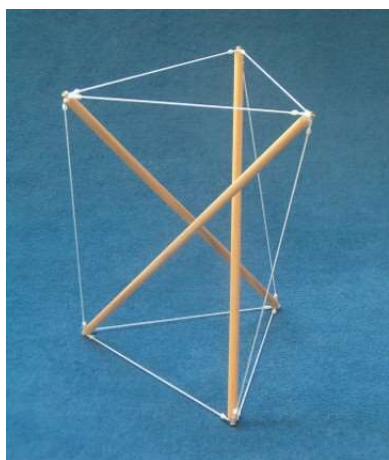
Pro pochopení, z čeho vychází statické působení tensegrity konstrukcí, je potřeba pochopit **rozšířené Maxwellovo pravidlo** týkající se statické neurčitosti konstrukcí. Nebudu to zde citovat a vysvětlovat, viz [1] – kapitola 2 nebo [3] – kapitola 2.3.

Po prostudování rozšířeného Maxwellova pravidla Vám bude následující text dávat smysl. Statické působení tensegrity konstrukcí, které jsou odvozené ze staticky určitých konstrukcí, vychází ze statického působení infinitesimálních mechanismů. Vše je vysvětleno v knize [1]. Myslím, že je zbytečné tady citovat všechny informace z té knihy.

Každému, kdo chce navrhovat tensegrity konstrukce, doporučuji její prostudování. Dále viz kapitola 3.1 této diplomové práce.

V knize [1] je návod, jak používat tzv. „němé komponenty“ („dumb components“). Jsou to podpory nebo pruty se zanedbatelnou tuhostí, které zamezují pohybu infinitezimálního mechanismu a tím způsobí, že počáteční matice tuhosti konstrukce není singulární. Díky tomu je možné tensegrity konstrukci spočítat. Je potřeba ověřit, zda mají němé komponenty dostatečně malou tuhost, aby neovlivňovaly výsledky, viz kapitola 3.1 této diplomové práce.

2.1.4 Simplexy a soustavy simplexů



Obr. 2.1 Simplex vycházející z trojbokého hranolu [102]

Viz [1] a [2] a kapitoly 3.2 a 3.3 této diplomové práce.

V knihách [1] a [2] jsou definovány simplexy. Jsou to nejjednodušší tensegrity konstrukce, které se dají dále spojovat do složitějších soustav.

V této diplomové práci budu pracovat se simplexem odvozeného z trojbokého hranolu. Tento simplex má tvar infinitezimálního mechanismu, když je úhel vzájemného pootočení podstav 30° . V takovém tvaru lze simplex předepnout, i přesto že se jedná o staticky určitou konstrukci (viz kapitola 2.1.3 a kapitola 3.1).

V knize [1] je způsob, jak ztuhit simplex přidáním dalších táhel tak, aby se stále jednalo o čistou tensegrity konstrukci. Tento způsob jsem použil v kapitole 3.2 u konstrukce „simplex se ztužujícími táhly“.

Dále jsou v knize [1] definovány „antihranoly“ („antiprisms“). Antihranol také zkoumám v kapitole 3.2.

V knize [1] jsou uvedeny způsoby, jak simplexy spojovat do složitějších soustav – střechy.

V knize [2] jsou uvedeny způsoby, jak simplexy spojovat do složitějších soustav – věže.

Aby tensegrity konstrukce odvozené ze staticky určitých konstrukcí bylo možné předeptnout, musí mít tvar infinitezimálního mechanismu. U složitějších konstrukcí může být obtížné tento tvar najít. Problematikou nalezení těchto tvarů se zabývá kniha [3].

Kniha [3] se dále zabývá stabilitou tensegrity konstrukcí. Rozlišuje tři pojmy:

- **stability**
- **prestressed stability**
- **superstability**

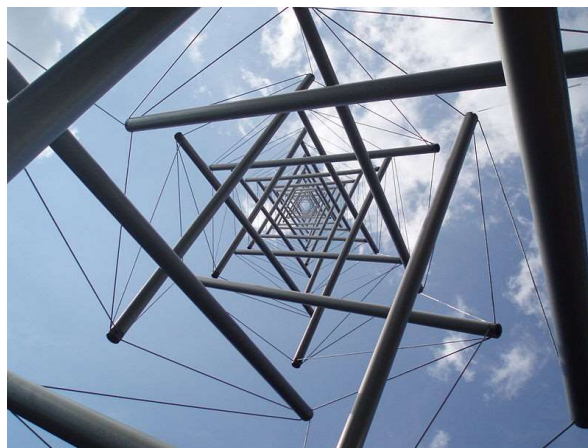
Tuto problematiku jsem nestihl pořádně prostudovat, protože to přesahuje rozsah této diplomové práce. Nicméně **před navrhováním reálných konstrukcí v praxi by bylo vhodné tuto problematiku nastudovat a pochopit, aby byla jistota, že posudky stability jsou správné a že vedou k návrhu bezpečných konstrukcí.**

2.2 Příklady zrealizovaných konstrukcí

Needle Tower II



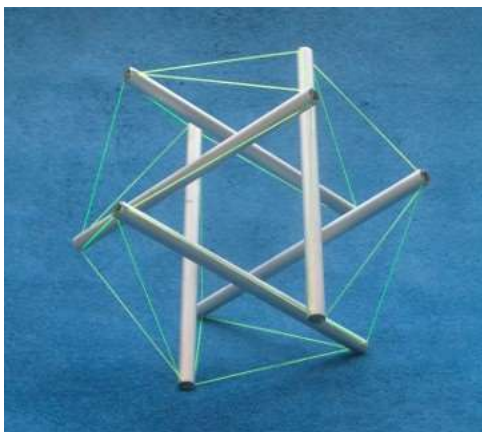
Obr. 2.2a Needle Tower II [103]



Obr. 2.2b Needle Tower II – pohled zdola [104]

Výška 30 m.

Je to čistá tensegrity konstrukce. Tato konstrukce vychází ze spojování simplexů vycházejících z trojbokého hranolu (viz obr. 2.1). Střídají se pravotočivé a levotočivé simplexu. Aby mohly být simplexu spojeny jako čistá tensegrity konstrukce, musí se společné trojúhelníkové podstavy změnit na šestiúhelníky. Aby simplexu byly spojeny, musí se zapustit do sebe (šestiúhelníková podstava není tvořena rovinnou křivkou, ale 3D křivkou) a musí se přidat další táhla (při připojení každého dalšího simplexu se přidá 6 spojovacích táhel, aby byla konstrukce staticky určitá). Všiml jsem si, že konektivita tohoto způsobu spojování simplexů je stejná jako u tensegrity icosahedronu (dvacetistěnu), viz obr. 2.2c.



Obr. 2.2c Tensegrity icosahedron (dvacetistěnu) [101]

Warnow Tower in Rostock



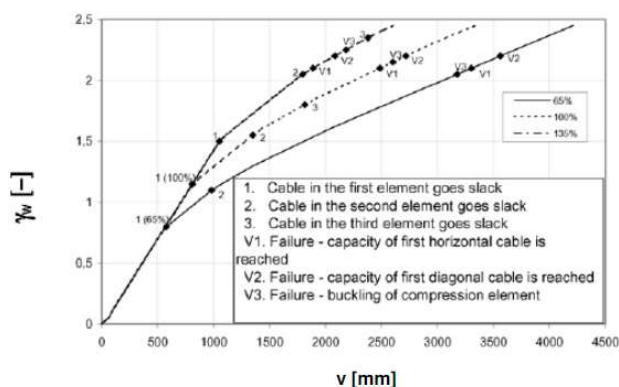
Obr. 2.3a Warnow Tower [105]



Obr. 2.3b Warnow Tower – detail [105]



Obr. 2.3c Warnow Tower – montáž, temporary stressing frame [4]



Obr. 2.3d Horizontal displacements of the tower top for dead load, pre-tensioning and wind loads [4]. γ_w je násobek očekávaného zatížení větrem

Výška 62,3 m [4]. Zatím se jedná o rekord ve výšce zrealizované tensegrity věže.

Počet simplexů je 6. Výška jednoho simplexu je 8,3 m [4]. Výška horních styčniců nejdříve umístěného simplexu je tedy $6 \times 8,3 = 49,8$ m. Výška 62,3 m je dosaženo přidáním antény, která zvětšuje celkovou výšku o dalších 12,5 m.

Hmotnost věže je 50 t. [4]

Je to nečistá tensegrity konstrukce. Vznikla spojováním simplexů vycházejících z trojbokého hranolu (viz obr. 2.1). Aby se eliminovaly deformace v kroucení, střídají se pravotočivé a levotočivé simplexu.

Předpětí v táhlech až 1100 kN. [4]

Průřezy: [4]

- vzpěry – TR273x12-40
- táhla – průměr 30-75 mm

Součinitele zatížení pro předpětí byly uvažovány 0,65 a 1,35. [4]

První vlastní frekvence kmitání je 0,6 Hz. Odpovídajícím vlastním tvarem je naklánění. [4]

Rozhodujícími zatíženími byly předpětí a vítr. [4]

Byly zde velmi nízké tolerance odchylek rozměrů při výrobě odpovídající strojnímu inženýrství. [4]

Simplexy mají společné podstavy. Aby se při montáži zajistila celistvost připojovaných simplexů, které ještě nemají dolní podstavu, byly silové účinky (předpětí) dolní podstavy nahrazeny tzv. temporary stressing frame (dočasným předpínacím rámem), viz obr. 2.3c. [4]

Z obrázku 2.3d vyplývá, že vodorovný posun nejvyššího bodu věže je 700 – 900 mm, tj. $H/89$ až $H/69$ (H je výška věže). Takto velké deformace nesplňují mezní stav použitelnosti, pokud by konstrukce měla sloužit jako nosná konstrukce rozhledny.

Lávka Kurilpa



Obr. 2.4a Lávka Kurilpa [106]



Obr. 2.4b Lávka Kurilpa [106]



Obr. 2.4c Lávka Kurilpa – realizace [106]

2.3 Výhody a nevýhody tensegrity konstrukcí

Výhody:

- zajímavý a krásný vzhled, průhlednost, variabilita tvaru
- nízká hmotnost
- u čistých tensegrity konstrukcí jsou prvky namáhány pouze v tlaku a tahu, žádné ohybové momenty
- s rostoucím předpětím roste tuhost

Nevýhody:

- náročné pro návrh a statický výpočet, nutno počítat GNA (geometricky nelineární analýzou)
- náročné pro výrobu a velké nároky na přesnost výroby
- malá tuhost, nutné velké předpětí
- špatná nebo žádná odolnost proti progresivnímu kolapsu

3 ZJEDNODUŠENÝ VÝZKUM STATICKÉHO PŮSOBENÍ TENSEGRITY KONSTRUKCÍ S PARAMETRICKOU STUDIÍ KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ PRO ZVÝŠENÍ TUHOSTI

Účelem této kapitoly je pochopit chování některých tensegrity konstrukcí v takovém rozsahu, aby to stačilo pro návrh reálné konstrukce v kapitole 4. Protože tensegrity konstrukce mají malou tuhost a to způsobuje, že nevyhovují na mezní stavy použitelnosti, slouží tato kapitola zároveň jako parametrická studie pro nalezení vhodného konstrukčního řešení pro zvýšení tuhosti zkoumaných tensegrity konstrukcí.

Dalším účelem této kapitoly je ověření pravdivosti informací získaných rešerší.

Tento výzkum bude proveden spíše inženýrským než vědeckým způsobem. Není zde prostor dělat složité matematické úvahy. Najdu způsob, jak tensegrity konstrukce počítat, a potom spočítám vše, co bude třeba. Není zde ani prostor ověřit výsledky výpočtů pomocí experimentů.

Všechny výpočty jsou prováděny v programu SCIA Engineer 18.1.2052 – studentská verze, dále jen program. Všechny výpočty jsou prováděny pružně, pokud není stanoveno jinak. Použitý materiál pro všechny pruty (táhla i vzpěry) je vždy ocel s modulem pružnosti $E = 210\,000\text{ GPa}$, pokud není stanoveno jinak. Mez kluzu a mez pevnosti nejsou pro pružné výpočty relevantní. Teplotní roztažnost oceli je $0,000012\text{ K}^{-1}$.

Pro výpočty týkající se zpracování výsledků z programu jsem použil Microsoft Excel.

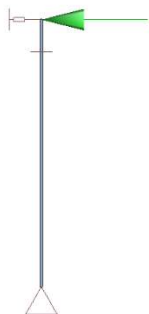
3.1 Infinitézimální mechanismy

Tato kapitola slouží ke zjištění základních věcí ohledně chování tensegrity konstrukcí a k nalezení způsobu, jak tyto konstrukce počítat, pomocí nejjednoduššího příkladu.

Z rešerše vyplývá, že chování tensegrity konstrukcí vychází z chování infinitézimálních mechanismů. Proto jsem v této kapitole prozkoumal chování jednoduchého infinitézimálního mechanismu a našel jsem způsob, jak takové konstrukce počítat. Získané poznatky využiju při výpočtech v následujících kapitolách.

Zkoumaný 2D infinitézimální mechanismus:

Viz obr. 3.1. Viz model DIP 001-02.



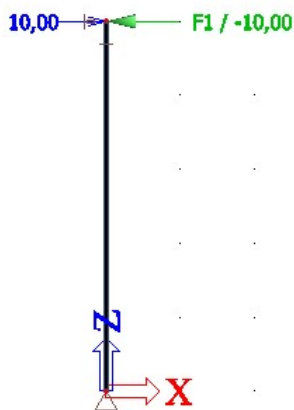
Obr. 3.1 Zkoumaný infinitézimální mechanismus

Konstrukci tvoří jedno svislé táhlo dlouhé 5 m. Průměr táhla je 50 mm. Dolní uzel je podepřený pevným kloubem. Horní uzel je podepřený posuvným kloubem, který ruší posun ve svislém směru a umožňuje posun ve vodorovném směru. Protože počáteční matice tuhosti takové konstrukce je singulární, nejde taková konstrukce spočítat lineárně ani nelineárně. Tento problém jsem vyřešil přidáním němé podpory do horního uzlu s velmi malou tuhostí, která uděluje velmi malý odpor proti posunu ve vodorovném směru. To, že je vliv němé podpory na výsledky zanedbatelný, se pozná podle toho, že v němé podpoře vznikne zanedbatelná reakce. Pokud bych o tuto reakci zvětšil nebo zmenšil zatížení, výsledky by se prakticky nezměnily. Tuhost němé podpory je 0,000001 MN/m.

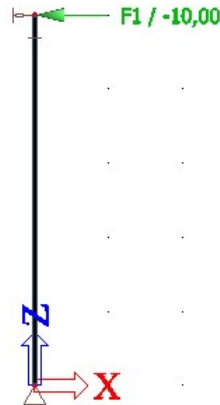
Další způsob, jak zjistit, zda němé podpory neovlivňují výsledky, je zvětšit o řád tuhost němých podpor a podívat se, zda se výsledky změnily. Pokud se výsledky nezměnily, je vše v pořádku.

Když jsem tento infinitézimální mechanismus spočítal lineárně (1. řád), vyšel nekonečně velký vodorovný posun a nulová normálová síla. To proto, že se jedná o výpočet podle teorie malých deformací. Pro správné výsledky je potřeba takovou konstrukci počítat nelineárně podle teorie velkých deformací (GNA nebo GNIA). V programu se to nazývá „3.

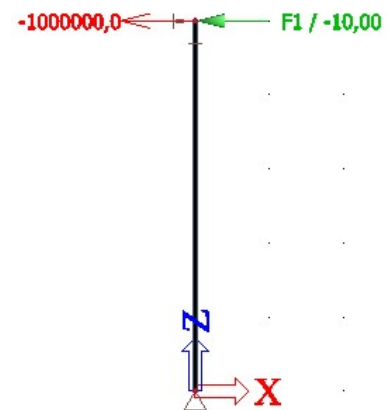
řád“. Podle teorie 2. řádu by nevyšly správné výsledky, protože se jedná o výpočet podle teorie malých deformací.



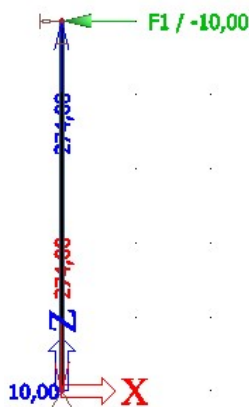
Obr. 3.2a Lineární výpočet – zatížení a reakce



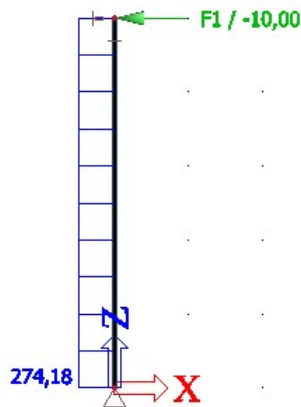
Obr. 3.2b Lineární výpočet – zatížení a Normálové síly



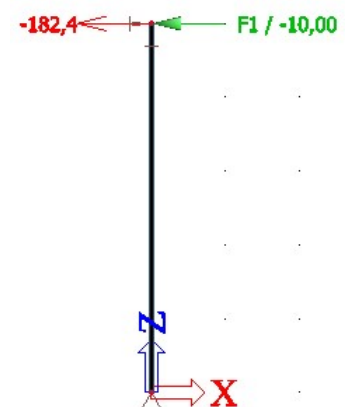
Obr. 3.2c Lineární výpočet – zatížení a posuny



Obr. 3.3a GNA – zatížení a reakce



Obr. 3.3b GNA – zatížení a normálové síly



Obr. 3.3c GNA – zatížení a posuny

Správné výsledky se poznají podle toho, že odpovídají skutečnému chování konstrukce. Popíšu zde skutečné chování tohoto infinitezimálního mechanismu. Když zatížím tuto konstrukci vodorovnou silou v horním uzlu, neklade tato konstrukce žádný odpor a horní uzel se dá do pohybu se zrychlením, které mu udělí vodorovná síla. Vodorovný posun horního uzlu se zvětšuje a tím se zvětšuje náklon svislého táhla. Svislý posun není umožněn, proto se při zvětšování náklonu podle pythagorovy věty táhlo prodlužuje a podle Hookova zákona v něm roste tahová normálová síla. Protože táhlo už není svislé, ale šikmé, působí normálová síla na horní i dolní uzel nejen svislou složkou, ale i vodorovnou složkou. Velikost vodorovné složky je normálová síla vynásobená sinem úhlu náklonu svislého táhla, se zvětšujícím se vodorovným posunem horního uzlu se tedy zvětšuje. Tato vodorovná složka normálové síly klade odpor dalšímu posunu. Rovnováha konstrukce nastane, když je vodorovný posun horního uzlu tak velký, že vodorovná složka normálové síly je rovna vodorovnému zatížení v horním uzlu. V tu chvíli se zastaví zvětšování posunu. Kontrola výsledků tedy spočívá v tom, že z vodorovného posunu,

délky táhla a normálové síly spočítám vodorovnou složku normálové síly, a pokud je stejně velká, jako vodorovné zatížení v horním uzlu, jsou výsledky správné.

Kontrola výsledků z obr. 3.3a-3.3c:

$$\text{Náklon táhla } \alpha = \arctg(u/L) = \arctg(182,4/5000) = 2,089224^\circ$$

$$\text{Vodorovná složka normálové síly } N_x = N \cdot \sin(\alpha) = 274,18 \cdot \sin(2,089224^\circ) = 9,995 \doteq 10 \text{ kN}$$

Z výše popsaného chování tohoto infinitezimálního mechanismu se dají odvodit následující tvrzení:

Počáteční tuhost je nulová.

Se zvětšujícím se zatížením a deformacemi se zvyšuje tuhost konstrukce a normálová síla v táhle.

Čím je větší normálová síla, tím je větší tuhost. Z toho vyplývá, že když zvětšíme normálovou sílu předpětím táhla, zvýší se tím tuhost konstrukce. To je důvod proč u tensegrity konstrukcí můžeme zvýšit jejich tuhost předpětím. Viz grafy 3.4a-3.4h.

Na grafech je vidět, že nepředpjatý infinitezimální mechanismus má pomalý náběh tuhosti a až při velkých deformacích se zatížením přirozeně předepne. Čím je větší zatížení, tím pomaleji narůstají další deformace a zvětšuje se tedy tuhost.

Čím je větší předpětí, tím rychlejší je náběh tuhosti.

Při velkých zatíženích (při větším poměru mezi zatížením a předpětím) už je vliv předpětí na tuhost konstrukce menší.

Tyto poznatky budou použity při počítání tensegrity konstrukcí v následujících kapitolách.

Tensegrity konstrukce tedy budu počítat nelineárně podle teorie velkých deformací, tedy GNA nebo GNIA, v programu se to nazývá 3. řád.

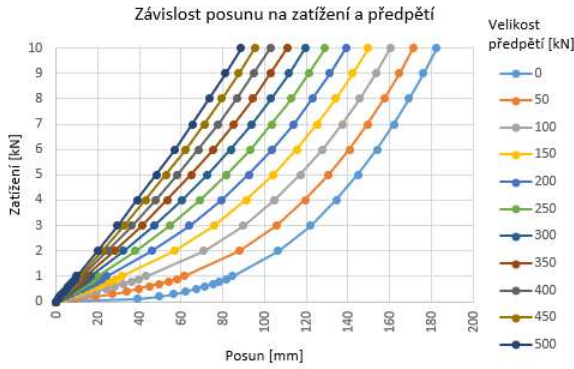
U této metody je v programu několik způsobů výpočtu:

- Newton-Raphson
- Modifikovaná Newton-Raphsonova metoda
- Picard
- Picard a Newton-Raphson

Po zvolení metody je ještě potřeba nastavit počet zatěžovacích kroků a počet iterací.

Všechny výpočty jsem prováděl metodou Newton-Raphson s 5 zatěžovacími kroky a 50 iteracemi. Program většinou využil max. 5 iterací, takže 50 je bezpečná hodnota. Pokud iterace nekonvergují, program na to upozorní, zruší výpočet a nedá žádné výsledky.

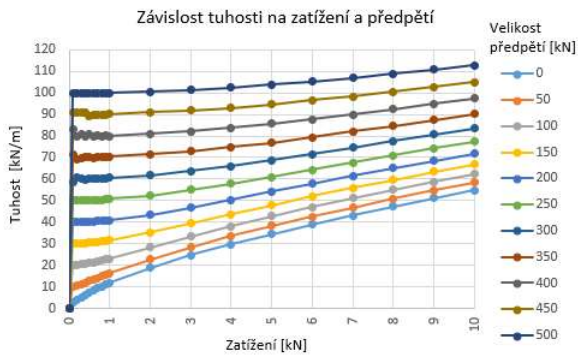
Zkratka: N – normálová síla



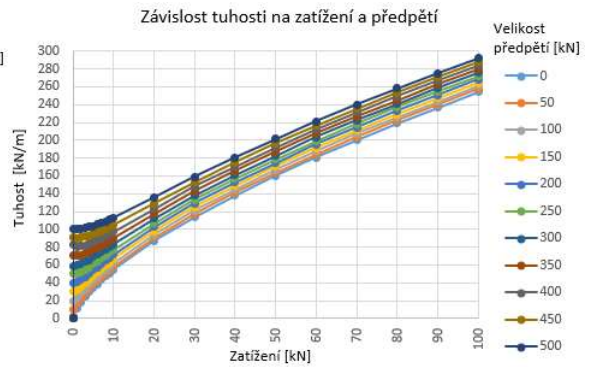
Obr. 3.4a Závislost posunu na zatížení a předpětí



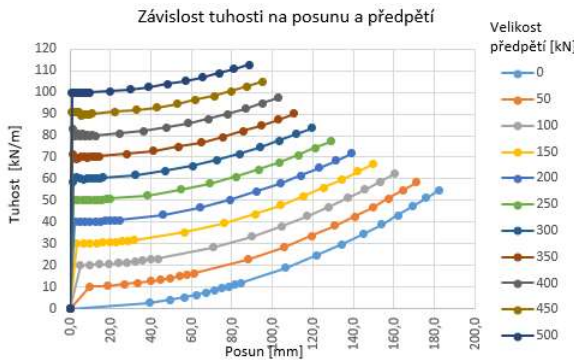
Obr. 3.4b Závislost posunu na zatížení a předpětí



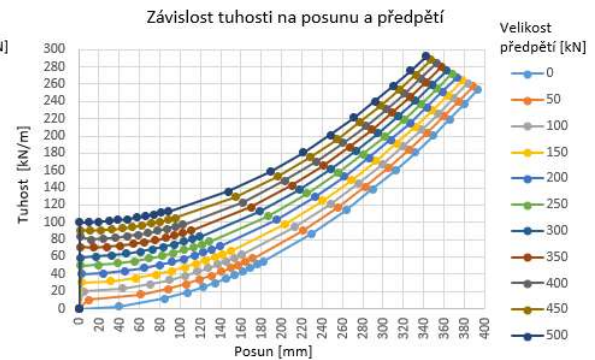
Obr. 3.4c Závislost tuhosti na zatížení a předpětí



Obr. 3.4d Závislost tuhosti na zatížení a předpětí



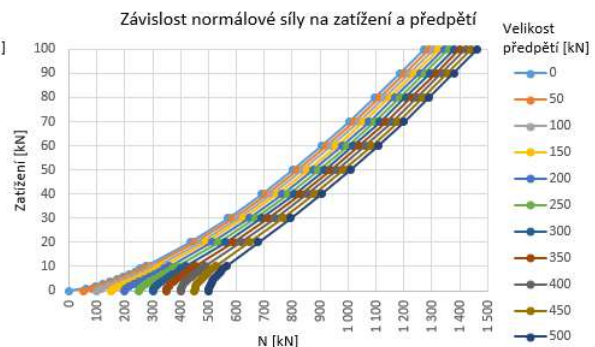
Obr. 3.4e Závislost tuhosti na posunu a předpětí



Obr. 3.4f Závislost tuhosti na posunu a předpětí



Obr. 3.4g Závislost N na zatížení a předpětí



Obr. 3.4h Závislost N na zatížení a předpětí

Přeskok:

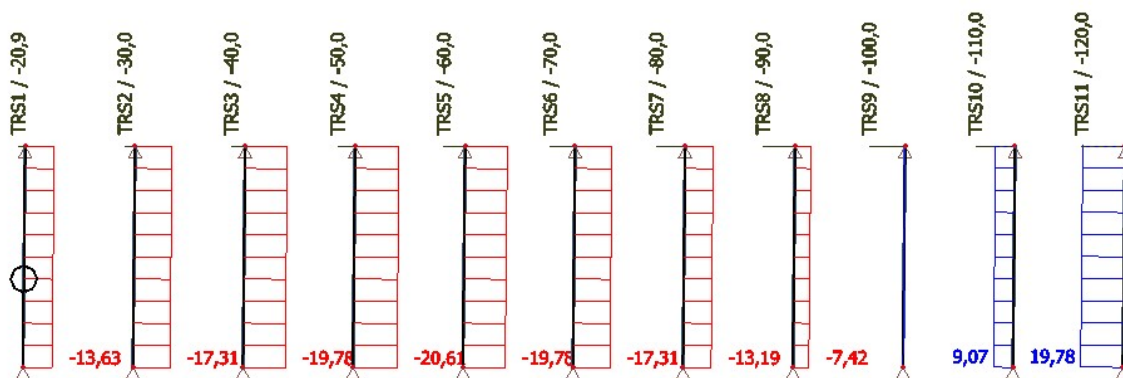
Kromě věcí uvedených výše jsem ještě zkoumal chování infinitezimálního mechanismu s imperfekcemi. Vlastně se už nejedná o infinitezimální mechanismy, ale o stabilní konstrukce, které se infinitezimálním mechanismům blíží.

Při počátečním vychýlení horního uzlu ve směru zatížení nebyl v ničem problém.

Při počátečním vychýlení horního uzlu proti směru zatížení je ale chování zajímavější. Táhlo se nejdříve stlačuje (pokud je schopno přenášet tlak), až dosáhne svislé polohy, a pak dojde k přeskoku. Posun se začne zvětšovat, aniž by se zvětšovalo zatížení (dokonce i kdyby zatížení bylo nulové) a uzel přeskočí na druhou stranu a uvolní se tlaková normálová síla. Přeskokem tak vznikne konstrukce, která má opačnou imperfekci než na začátku a další zatěžování už je bez problému.

Tyto přeskoky jsou nežádoucí u reálných konstrukcí a proto je potřeba u tensegrity konstrukcí pohlídat, aby k takovým přeskokům nedocházelo. Dalším problémem u přeskoku je, že při něm selže výpočet a nedá se spočítat stav konstrukce po přeskoku. Způsob, jak to obejít, je řídit zatěžování deformací (posunem) a ne silou (viz obr. 3.5).

Způsob, jak se vyhnout imperfekcím způsobující přeskoky, je předepnout konstrukci. Pokud tento „skoro infinitezimální mechanismus“ předepnu, dojde k vyrušení imperfekce a předpjaté táhlo zaujímá přesně tvar infinitezimálního mechanismu. To samé se děje se simplexem při předpínání v kapitole 3.2.1.



Obr. 3.5 Přeskok řízený deformací – posuny a normálové síly. Počáteční imperfekcí je posun horního uzlu o 50 mm doprava vůči spodnímu uzlu. Posun simulující zatížení působí směrem doleva.

3.2 Simplexy

V této kapitole budu zkoumat statické působení tensegrity simplexu vycházejícího z trojbokého hranolu. Z těchto simplexů budu v kapitole 3.3 skládat složitější konstrukce.

Existují i jiné simplexy, které vychází z vícebokých hranolů, ale ty nebudu při návrhu složitějších konstrukcí (soustav simplexů) používat, proto je nebudu v této práci zkoumat.

Protože tensegrity konstrukce mají malou tuhost a předpětí nedokáže zvýšit tuhost dostatečně, budu v této kapitole zároveň zkoumat simplexy/konstrukce s úpravami pro zvýšení tuhosti. Některé z těchto konstrukcí zůstanou čistými tensegrity konstrukcemi a některé ne.

Tento výzkum bude tedy zároveň sloužit jako parametrická studie konstrukčního řešení pro zvýšení tuhosti tensegrity simplexu. Výsledkem této parametrické studie má být nalezení nejvhodnějšího způsobu ztužení simplexu, který se následně použije u soustavy simplexu a u reálné konstrukce.

Zkratky prutů:

- TS táhlo svislé
- TŠ táhlo šikmé (jedná se o ztužující šikmá táhla, která se vyskytují u simplexu se ztužujícími táhly a u antihranolu)
- TV táhlo vodorovné (bez ohledu na to, zda je horní nebo dolní)
- TVH táhlo vodorovné horní
- TVD táhlo vodorovné dolní
- V vzpěra
- R rozpěra (pruty tvořící ztužující trojúhelník)

Definice zkoumaných konstrukcí:

Viz obr. 6a-9b.

Výška simplexu je 5 m. Délka strany trojúhelníku podstavy je 5 m.

U všech konstrukcí jsou použity stejné průřezy, pokud není stanoveno jinak – táhlo \emptyset 50 mm, vzpěra TR324x16.

Všechny konstrukce jsou podepřeny stejně. Podepření je symetrické a umožňuje symetrické smrštění konstrukce k její svislé ose. Toho je dosaženo tím, že směry vodorovných podpor jsou tečnami ke kružnici opsané trojúhelníku dolní podstavy.

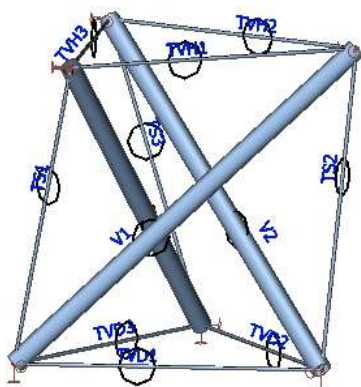
U všech konstrukcí jsou použity němé podpory ve styčnicích horní podstavy, které působí v obou vodorovných směrech a tím ruší infinitezimální mechanismus kroucení. Tuhost těchto podpor se pohybuje podle potřeby mezi 0,1 a 0,0001 MN/m. Ve výsledcích je vždy potřeba zkontrolovat, jak velké reakce v němých podporách vznikají a zamyslet se nad tím, zda jsou zanedbatelné. Bez němých podpor nešly konstrukce počítat lineárně ani

nelineárně, protože byla singulární počáteční matice tuhosti, stejně jako u infinitezimálního mechanismu v kapitole 3.1.

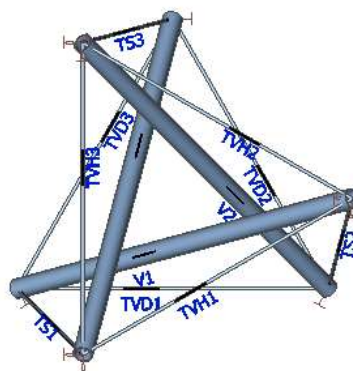
Barvy v názvech konstrukcí v následujícím textu odpovídají barvám čar v grafech v kapitole 3.2.3.

Simplex (neztužený simplex) – Jedná se o simplex bez přidání prutů pro zvýšení tuhosti. Je to čistá tensegrity konstrukce (žádné tlačené prvky se vzájemně nedotýkají a ve vzpěrách nevznikají ohybové momenty). Úhel pootočení horní podstavy je 30° . Při prvních výpočtech provedených na simplexu jsem měl problém se singulární maticí kvůli „nízké“ vzpěrné únosnosti vzpěr pro zatížení např. 120 000 kN, a tudíž jsem se nemohl dopočítat k vymizení tahu v táhlech za předpokladu, že by vzpěry měly dostatečnou vzpěrnou únosnost. Tento problém jsem vyřešil tím, že jsem všechny pruty v simplexu (táhla i vzpěry) modeloval FEM typem „pouze osové síly“. Tím z matice tuhosti zmizely ohybové tuhosti vzpěr a při nelineárních výpočtech přestalo docházet ke vzniku singulární matice při dosažení kritického zatížení pro vybočení vzpěr.

Simplex funguje i nepředpjatý. Při zatížení nepředpjatého simplexu vznikne tah v táhlech a dojde k přirozenému předepnutí simplexu, jako u infinitezimálního mechanismu v kapitole 3.1.



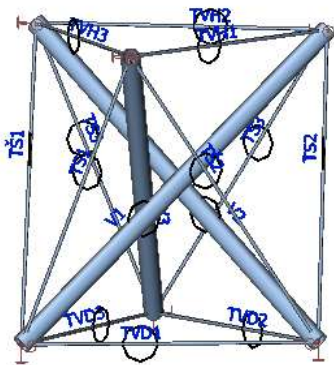
Obr. 6a Neztužený simplex – axonometrie



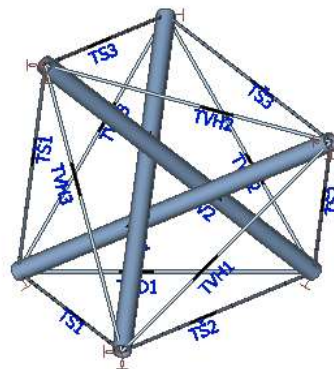
Obr. 6b Neztužený simplex – pohled shora

Následující konstrukce budu hromadně nazývat „ztužené simplex“.

Simplex se ztužujícími táhly – Jedná se o simplex, ke kterému jsou přidána tři ztužující šikmá táhla TŠ. I toto je čistá tensegrity konstrukce. Simplex ztužený ztužujícími táhly funguje, když je úhel pootočení horní podstavy mezi 30° a 60° . Výpočty jsem zjistil, že při úhlu 30° při zatížení rychle/okamžitě vymizí tah ve ztužujících táhlech. Čím je úhel větší, tím větší je zatížení, při kterém dojde k vymizení tahu ve ztužujících táhlech. U této konstrukce jsem nastavil úhel pootočení horní podstavy na 45° (přesně uprostřed mezi neztuženým simplexem a antihranolem). U této konstrukce jsou opět všechny pruty modelovány FEM typem „pouze osové síly“. Simplex se ztužujícími táhly funguje jen, když je předpjatý, jinak při zatížení okamžitě vzniká tlak v táhlech.



Obr. 7a Simplex se ztužujícími táhly – axonometrie

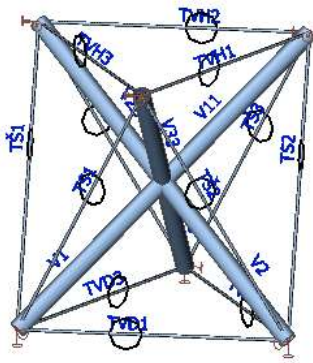


Obr. 7b Simplex se ztužujícími táhly – pohled shora

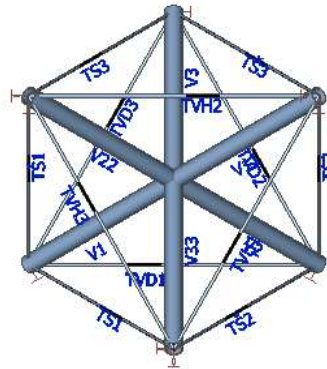
Antihranol – Když u simplexu se ztužujícími táhly zvětšíme úhel pootočení horní podstavy na maximum, tedy 60° , vzpěry se vzájemně protnou ve středech svých délek, a získáme tak antihranol. Toto už není čistá tensegrity konstrukce, protože vzpěry se dotýkají a vznikají v nich ohybové momenty. Je konstrukčně nemožné, aby vzpěry u antihranolu nebyly uprostřed spojené, proto jsem v průsečíku udělal spojení vzpěr. Spojením vzpěr se zamezí kroucení simplexu/antihranolu a ve vzpěrách vzniknou ohybové momenty. Proto musí být tyto pruty modelovány FEM typem „standard“ (tedy s ohybovou tuhostí v matici tuhosti konstrukce, nikoliv FEM typem „pouze osové síly“). Nejdříve jsem chtěl nechat jednu vzpěru průběžnou a ostatní k ní připojit kloubově, ale vycházela singulární matice tuhosti a já jsem nevěděl proč. Proto jsem v místě spojení vzpěr udělal vetknutí. Později jsem zjistil, že singulární matice vznikla proto, že průběžná vzpěra nebyla podepřená proti krouživému pohybu (styčnick tvořený táhly s FEM typem „pouze osové síly“ tomuto pohybu nebrání). Toto podepření nemusí být u prutů s FEM typem „pouze osové síly“, ale u prutů s FEM typem „standard“ už být musí, protože v matici tuhosti konstrukce se objeví příslušné stupně volnosti.

Pro příště bych problém mohl vyřešit změnou FEM typu táhel na „standard“, aby měly tuhost v kroucení, ale kvůli nízké vzpěrné únosnosti táhel bych nemohl zvyšovat zatížení až za vymizení tahu v táhlech a výpočtem tlaku v táhlech dokázat ono vymizení tahu (nevěděl bych s jistotou, že singulární matice nastává kvůli vybočení tlačných táhel). Další možné řešení by bylo přidat vetknutí s velmi malou tuhostí do němých podpor.

Antihranol funguje jen, když je předpjatý, jinak při zatížení okamžitě vzniká tlak v táhlech.

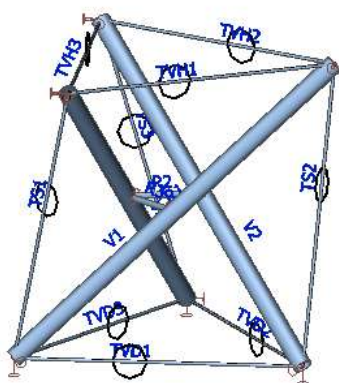


Obr. 8a Antihranol – axonometrie

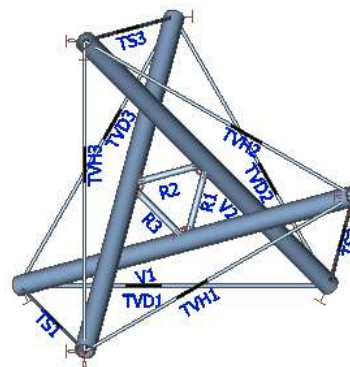


Obr. 8b Antihranol – pohled shora

Simplex ztužený trojúhelníkem – Jedná se o můj nápad, jak zvýšit tuhost simplexu. Do normálního simplexu s úhlem pootočení horní podstavy 30° se vloží trojúhelník propojující středy vzpěr (viz pohled shora). Při deformaci simplexu dochází k jeho zkroucení. Při kroucení dochází ke smršťování/roztahování tohoto trojúhelníku. Trojúhelník tedy klade odpor proti zkroucení a domnívám se, že tím klade odpor všem deformacím simplexu, tím se značně zvýší tuhost simplexu. Toto řešení jsem vymyslel, když jsem přemýšlel, jak do věže ze simplexů, která bude tvořit konstrukci rozhledny, umístím patra nebo podesty schodiště. Tyto ztužující trojúhelníky by sloužily jako patra nebo podesty a spirálovité schodnice schodiště by na nich byly uloženy. Pokud by se schodnice hodně prohýbaly, mohly by se ještě pomocí táhel zavěsit za styčníky tensegrity konstrukce. Nevýhodou ztužení simplexu trojúhelníkem je, že ve vzpěrách vznikají velké ohybové momenty. Spolupůsobení simplexu a trojúhelníku výrazně ovlivňuje statické chování celé konstrukce, je tedy nezanedbatelné, trojúhelník je součástí nosné konstrukce a nejedná se tedy o čistou tensegrity konstrukci. Protože jsou vzpěry ohýbané, musí mít FEM typ „standard“. Trojúhelník jsem mezi vzpěry přichytil kloubově. Stejně jako u antihranolu došlo ke vzniku singulární matice kvůli kroutivému pohybu vzpěr. Protože ani zde jsem nevěděl v čem je problém, vyřešil jsem to tím, že jsem kloubům, kterými je přichycen trojúhelník ke vzpěrám, zadal malou tuhost, která odpovídá tuhosti styčnickového plechu.



Obr. 9a Simplex ztužený trojúhelníkem – axonometrie



Obr. 9b Simplex ztužený trojúhelníkem – pohled shora

3.2.1 Předpětí

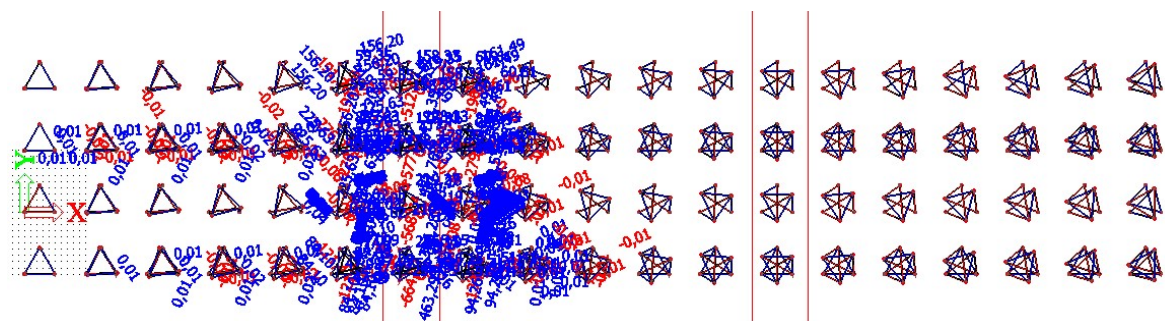
Účelem této kapitoly je zjistit, jak simplexy správně předpínat, aby fungovaly, jak mají, pochopit vzájemné ovlivňování táhel a skupin táhel, atd.

Předpětí ve výpočtech vyvolávám ochlazením táhel, které chci předepnout. Naladím teplotu ochlazení táhla tak, aby v táhle vyšla síla, na kterou chci táhlo předepnout.

Zopakuji zde základní věci, které je potřeba si uvědomit. U staticky určitých konstrukcí nevzniknou vnitřní síly při působení teplotních změn, nejdou tedy předepnout. Výjimku tvoří pouze infinitezimální mechanismy. Simplex vycházející z trojbokého hranolu je podle počtu stupňů volnosti a počtu odebraných stupňů volnosti staticky určitou konstrukcí. To znamená, že abychom mohli simplex předepnout, musí být infinitezimálním mechanismem. Pokud simplex nebude zaujímat přesný tvar infinitezimálního mechanismu, ale bude k němu blízko, dojde při předpínání ke změně tvaru do tvaru infinitezimálního mechanismu a následně k předpětí. Jinými slovy, když simplex nebude mít správný tvar, bude se jeho tvar při ochlazování táhel měnit, až dosáhne tvaru infinitezimálního mechanismu (do té doby nevznikají žádné vnitřní síly), a při dalším ochlazování táhel už dojde k předpětí. Pokud bude tvar simplexu příliš daleko od tvaru infinitezimálního mechanismu, nebude velikost teplotní změny stačit na tak velkou změnu tvaru, nedojde k dosažení tvaru infinitezimálního mechanismu a nedojde tedy k předpětí, nevzniknou žádné vnitřní síly.

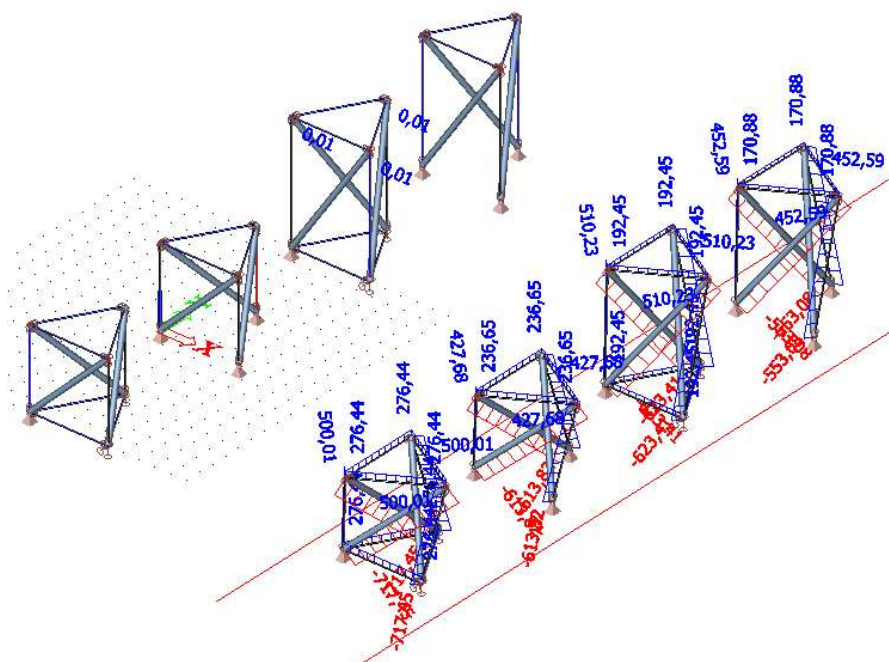
Abychom mohli simplex snadno předepnout, je tedy potřeba, aby byl jeho tvar co nejblíže k tvaru infinitezimálního mechanismu. U simplexu vycházejícího z trojbokého hranolu se jedná o tvar při pootočení horní podstavy o 30° . Způsob, jak ověřit správnost tohoto úhlu, je zkusit předepnout simplexy s různými úhly (viz obr. 3.10 a model DIP_M_00_005_02). Úhel, u kterého vyjdou největší vnitřní síly a nejmenší deformace, je ten správný. Na obr. 3.10 je vidět, že když se úhel liší o 5° , tak také dojde k předpětí, ale předpětí je menší, než u správného úhlu, protože část teplotní změny se spotřebovala na změnu tvaru konstrukce (pootočení horní podstavy o 5° pro dosažení tvaru infinitezimálního mechanismu).

Pohybem s nulovým počátečním odporem definujícím tento infinitezimální mechanismus je kroucení simplexu (otáčení horní podstavy vůči dolní podstavě v půdorysné rovině).



Obr. 3.10 Ověření správného úhlu pootočení horní podstavy. Na obrázku jsou normálové síly. Ve směru x se zleva doprava zvětšuje úhel od 0° do 90° po 5° . Ve směru y se simplexy liší v podepření a svojí výškou, aby bylo dokázáno, že tyto parametry nemají na správný úhel vliv.

Na obr. 3.11 je vidět, jak se liší vnitřní síly od předpětí v závislosti na podepření a výšce simplexu. Viz model DIP 002-02 všechna zatížení – zkouška.



Obr. 3.11 Vliv podepření a výšky simplexu na rozložení sil od předpětí a porovnání se stabilní staticky určitou konstrukcí, u které úhel pootočení horní podstavy = 0°. Ve směru x vlevo jsou stabilní staticky určité konstrukce, ve směru x vpravo jsou tensegrity simplexu. Ve směru y zleva doprava se střídá podepření umožňující smrštění dolní podstavy a neumožňující smrštění dolní podstavy. Nižší konstrukce mají výšku 5 m, vyšší konstrukce mají výšku 7,5 m.

Hledání správného poměru předpětí:

Viz modely DIP 002-02-01.

Abych pochopil vzájemné ovlivňování táhel v simplexu při předpínání, udělal jsem matici vzájemného ovlivňování táhel. Matice je vytvořena následujícím způsobem. Předepnul jsem vždy jedno táhlo na sílu přibližně 100 kN. Tato síla je v matici na diagonále. Doplnil jsem do stejného řádku síly, které vznikly v ostatních táhlech a ve vzpěrách. Tento postup jsem provedl pro všechna táhla (všechny řádky matice). Vytvořil jsem matici vzájemného ovlivňování táhel z nelineárních i lineárních výpočtů, abych je mohl porovnat. Viz tab. 3.1a, tab. 3.1b.

Tab. 3.1a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – nenormovaná (síly jsou v kN) – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	100,00	99,79	99,79	55,33	55,24	55,21	55,21	55,24	55,33	-143,41	-143,26	-143,41
TS2	99,79	100,00	99,79	55,21	55,33	55,24	55,33	55,21	55,24	-143,41	-143,41	-143,26
TS3	99,79	99,79	100,00	55,24	55,21	55,33	55,24	55,33	55,21	-143,26	-143,41	-143,41
TVH1	180,96	180,25	180,44	100,35	99,61	99,61	99,20	100,40	99,42	-259,04	-258,83	-259,11
TVH2	180,44	180,96	180,25	99,61	100,35	99,61	99,42	99,20	100,40	-259,11	-259,04	-258,83
TVH3	180,25	180,44	180,96	99,61	99,61	100,35	100,40	99,42	99,20	-258,83	-259,11	-259,04
TVD1	180,25	180,96	180,44	99,20	99,42	100,40	100,35	99,61	99,61	-259,04	-259,11	-258,83
TVD2	180,44	180,25	180,96	100,40	99,20	99,42	99,61	100,35	99,61	-258,83	-259,04	-259,11
TVD3	180,96	180,44	180,25	99,42	100,40	99,20	99,61	99,61	100,35	-259,11	-258,83	-259,04

Tab. 3.1b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – nenormovaná (síly jsou v kN) – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	99,88	99,88	99,88	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	-143,35	-143,35	-143,35
TS2	99,88	99,88	99,88	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	-143,35	-143,35	-143,35
TS3	99,88	99,88	99,88	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	55,25	-143,35	-143,35	-143,35
TVH1	180,48	180,48	180,48	99,84	99,83	99,83	99,84	99,83	99,84	-259,04	-259,04	-259,04
TVH2	180,48	180,48	180,48	99,83	99,84	99,83	99,84	99,84	99,83	-259,04	-259,04	-259,04
TVH3	180,48	180,48	180,48	99,83	99,83	99,84	99,83	99,84	99,84	-259,04	-259,04	-259,04
TVD1	180,48	180,48	180,48	99,84	99,84	99,83	99,84	99,83	99,83	-259,04	-259,04	-259,04
TVD2	180,48	180,48	180,48	99,83	99,84	99,84	99,83	99,84	99,83	-259,04	-259,04	-259,04
TVD3	180,48	180,48	180,48	99,84	99,83	99,84	99,83	99,83	99,84	-259,04	-259,04	-259,04

Protože předpínací síly na diagonále nejsou úplně stejné (je obtížné je ochlazováním táhla naladit přesně), je vhodné řádky matice normovat podle diagonály, viz tab. 3.2a, tab. 3.2c.

A abychom mohli porovnat poměry sil v jednotlivých táhlech ve všech řádcích matice, je vhodné normovat řádky matice podle jednoho sloupce, viz tab. 3.2b, tab. 3.2d.

Tab. 3.2a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9979	0,9979	0,5533	0,5524	0,5521	0,5521	0,5524	0,5533	-1,4341	-1,4326	-1,4341
TS2	0,9979	1,0000	0,9979	0,5521	0,5533	0,5524	0,5533	0,5521	0,5524	-1,4341	-1,4341	-1,4326
TS3	0,9979	0,9979	1,0000	0,5524	0,5521	0,5533	0,5524	0,5533	0,5521	-1,4326	-1,4341	-1,4341
TVH1	1,8033	1,7962	1,7981	1,0000	0,9926	0,9926	0,9885	1,0005	0,9907	-2,5814	-2,5793	-2,5821
TVH2	1,7981	1,8033	1,7962	0,9926	1,0000	0,9926	0,9907	0,9885	1,0005	-2,5821	-2,5814	-2,5793
TVH3	1,7962	1,7981	1,8033	0,9926	0,9926	1,0000	1,0005	0,9907	0,9885	-2,5793	-2,5821	-2,5814
TVD1	1,7962	1,8033	1,7981	0,9885	0,9907	1,0005	1,0000	0,9926	0,9926	-2,5814	-2,5821	-2,5793
TVD2	1,7981	1,7962	1,8033	1,0005	0,9885	0,9907	0,9926	1,0000	0,9926	-2,5793	-2,5814	-2,5821
TVD3	1,8033	1,7981	1,7962	0,9907	1,0005	0,9885	0,9926	0,9926	1,0000	-2,5821	-2,5793	-2,5814

Tab. 3.2b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9979	0,9979	0,5533	0,5524	0,5521	0,5521	0,5524	0,5533	-1,4341	-1,4326	-1,4341
TS2	1,0000	1,0021	1,0000	0,5533	0,5545	0,5536	0,5545	0,5533	0,5536	-1,4371	-1,4371	-1,4356
TS3	1,0000	1,0000	1,0021	0,5536	0,5533	0,5545	0,5536	0,5545	0,5533	-1,4356	-1,4371	-1,4371
TVH1	1,0000	0,9961	0,9971	0,5545	0,5505	0,5505	0,5482	0,5548	0,5494	-1,4315	-1,4303	-1,4319
TVH2	1,0000	1,0029	0,9989	0,5520	0,5561	0,5520	0,5510	0,5498	0,5564	-1,4360	-1,4356	-1,4344
TVH3	1,0000	1,0011	1,0039	0,5526	0,5526	0,5567	0,5570	0,5516	0,5503	-1,4360	-1,4375	-1,4371
TVD1	1,0000	1,0039	1,0011	0,5503	0,5516	0,5570	0,5567	0,5526	0,5526	-1,4371	-1,4375	-1,4360
TVD2	1,0000	0,9989	1,0029	0,5564	0,5498	0,5510	0,5520	0,5561	0,5520	-1,4344	-1,4356	-1,4360
TVD3	1,0000	0,9971	0,9961	0,5494	0,5548	0,5482	0,5505	0,5505	0,5545	-1,4319	-1,4303	-1,4315

Tab. 3.2c Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TS2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TS3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TVH1	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVH2	1,8077	1,8077	1,8077	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	0,9999	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVH3	1,8077	1,8077	1,8077	0,9999	0,9999	1,0000	0,9999	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD1	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD2	1,8077	1,8077	1,8077	0,9999	1,0000	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD3	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	0,9999	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946

Tab. 3.2d Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TS2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TS3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4352	-1,4352	-1,4352
TVH1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5531	0,5531	0,5532	0,5531	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5531	0,5532	0,5531	0,5532	0,5532	0,5531	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5531	0,5531	0,5532	0,5531	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5531	0,5532	0,5531	0,5531	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5531	0,5532	0,5532	0,5531	0,5532	0,5531	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5531	0,5532	0,5531	0,5531	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353

Na maticích normovaných podle prvního sloupce je vidět, že ve všech řádcích jsou prakticky stejné poměry sil v táhlech. To znamená, že předepnutím jakéhokoliv táhla dojde ke vzniku sil ve všech prutech simplexu vždy ve stejném poměru. Znamená to, že teoreticky můžeme celý simplex předepnout pomocí jakéhokoliv táhla nebo jakékoliv kombinace táhel, a vždy vzniknou síly ve stejném poměru. Poměr sil závisí jen na geometrii simplexu. Tím se dostávám k rozílu mezi výsledky nelineárních a lineárních výpočtů. U lineárních výpočtů vyšly u normované matice podle sloupce všechny řádky naprosto stejné (naprosto stejné poměry sil pro předpínání jakýmkoliv táhlem), protože lineární výpočet nezohledňuje změnu tvaru simplexu (a tím narušení jeho symetrie) při předpětí. Když zkrátím jen jedno táhlo, a ostatní ne, změní se nesymetricky tvar simplexu a tím se změní poměry sil od předpětí. Proto v matici vytvořené nelineárním výpočtem nejsou poměry naprosto přesné. Tento jev je silnější při předpínání na větší síly, viz tab. 3.3a-3.3d, ve kterých se předpínalo na sílu přibližně 10 000 kN. Zde už jsou deformace hodně velké.

Tab. 3.3a Matice vzájemného ovlivňování táhel – 100x větší síly – simplex bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,8233	0,8233	0,5661	0,4893	0,4611	0,4611	0,4893	0,5661	-1,3283	-1,2070	-1,3283
TS2	0,8233	1,0000	0,8233	0,4611	0,5661	0,4893	0,5661	0,4611	0,4893	-1,3283	-1,3283	-1,2070
TS3	0,8233	0,8233	1,0000	0,4893	0,4611	0,5661	0,4893	0,5661	0,4611	-1,2070	-1,3283	-1,3283
TVH1	1,6618	1,2674	1,2763	1,0000	0,6963	0,6174	0,4363	0,9566	0,5396	-2,0201	-1,8014	-1,9140
TVH2	1,2763	1,6618	1,2674	0,6174	1,0000	0,6963	0,5396	0,4363	0,9566	-1,9140	-2,0201	-1,8014
TVH3	1,2674	1,2763	1,6618	0,6963	0,6174	1,0000	0,9566	0,5396	0,4363	-1,8014	-1,9140	-2,0201
TVD1	1,2674	1,6618	1,2763	0,4363	0,5396	0,9566	1,0000	0,6174	0,6963	-2,0201	-1,9140	-1,8014
TVD2	1,2763	1,2674	1,6618	0,9566	0,4363	0,5396	0,6964	1,0000	0,6174	-1,8014	-2,0201	-1,9140
TVD3	1,6618	1,2763	1,2674	0,5396	0,9566	0,4363	0,6174	0,6963	1,0000	-1,9140	-1,8014	-2,0201

Tab. 3.3b Matice vzájemného ovlivňování táhel – 100x větší síly – simplex bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,8233	0,8233	0,5661	0,4893	0,4611	0,4611	0,4893	0,5661	-1,3283	-1,2070	-1,3283
TS2	1,0000	1,2146	1,0000	0,5601	0,6875	0,5943	0,6875	0,5601	0,5943	-1,6134	-1,6134	-1,4660
TS3	1,0000	1,0000	1,2146	0,5943	0,5601	0,6875	0,5943	0,6875	0,5601	-1,4660	-1,6134	-1,6134
TVH1	1,0000	0,7627	0,7680	0,6017	0,4190	0,3715	0,2625	0,5757	0,3247	-1,2156	-1,0840	-1,1517
TVH2	1,0000	1,3021	0,9931	0,4838	0,7835	0,5456	0,4228	0,3419	0,7496	-1,4997	-1,5828	-1,4115
TVH3	1,0000	1,0070	1,3112	0,5494	0,4872	0,7890	0,7548	0,4257	0,3442	-1,4213	-1,5101	-1,5939
TVD1	1,0000	1,3112	1,0070	0,3442	0,4257	0,7548	0,7890	0,4872	0,5494	-1,5939	-1,5101	-1,4213
TVD2	1,0000	0,9931	1,3021	0,7496	0,3419	0,4228	0,5456	0,7835	0,4838	-1,4115	-1,5828	-1,4997
TVD3	1,0000	0,7680	0,7627	0,3247	0,5757	0,2625	0,3715	0,4190	0,6017	-1,1517	-1,0840	-1,2156

Tab. 3.3c Matice vzájemného ovlivňování táhel – 100x větší síly – simplex bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TS2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TS3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH1	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVH2	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVH3	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD1	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD2	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946
TVD3	1,8077	1,8077	1,8077	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	-2,5946	-2,5946	-2,5946

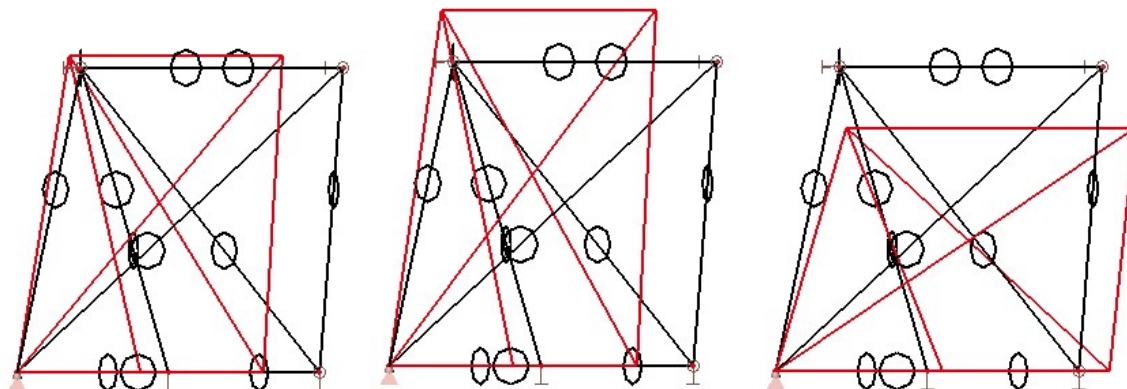
Tab. 3.3d Matice vzájemného ovlivňování táhel – 100x větší síly – simplex bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TS2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TS3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVH3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD1	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD2	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353
TVD3	1,0000	1,0000	1,0000	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	0,5532	-1,4353	-1,4353	-1,4353

Než udělám závěr ohledně toho, jak je vhodné simplexu předpínat, musím zde ještě vysvětlit, jak je ovlivňován tvar simplexu **předpínáním skupin táhel**. Viz modely DIP 002-07-01.

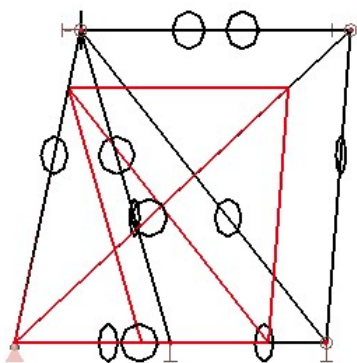
Předpínal jsem různé skupiny táhel a zjistil jsem následující:

- 1.) Když předepnu všechna táhla v simplexu ochlazením stejnou teplotou, dojde ke smrštění simplexu ve vodorovném směru a k roztažení simplexu ve svislém směru.
- 2.) Když předepnu všechna vodorovná táhla, dojde ke smrštění simplexu ve vodorovném směru a k roztažení simplexu ve svislém směru.
- 3.) Když předepnu všechna svislá táhla, dojde k roztažení simplexu ve vodorovném směru a ke smrštění simplexu ve svislém směru.



Obr. 3.12 Deformace od předpínání skupin táhel – pohled z boku. Vlevo: předepnutí všech táhel stejnou teplotou; Uprostřed: předepnutí všech vodorovných táhel; Vpravo: předepnutí všech svislých táhel.

Může se zdát překvapivé, že v případě 1.) nedošlo ke smrštění ve vodorovném i svislém směru (k symetrické deformaci se zachováním poměru délek všech prutů (pouze ke změně měřítka tvaru)). Je to proto, že vodorovná táhla mají větší vliv než svislá, tedy 2.) má větší vliv než 3.). Pro dosažení symetrické deformace a zachování poměru délek všech prutů (aby došlo pouze ke změně měřítka tvaru), **je potřeba předepnout (ochladit) vodorovná a svislá táhla ve správném poměru. Tento poměr najdeme v matici vzájemného ovlivňování táhel vytvořené lineárními výpočty.** Když předepneme (ochladíme) táhla ve stejných poměrech, jako jsou poměry sil v lineární matici, dosáhneme PŘESNĚ stejného poměru sil, a tím symetrické deformace se zachováním poměru délek prutů (pouze změny měřítka tvaru). Matice vytvořená nelineárními výpočty nemá při nesprávném poměru předpínání přesné poměry, kterých chceme dosáhnout, a jejich nepřesnost závisí na deformaci. Hledání poměru pro dosažení správné deformace maticí vytvořené nelineárními výpočty by byl iterační proces. Pouze u matice vytvořené lineárními výpočty se nevyskytuje vliv deformací a rovnou vidíme poměr sil, kterého se snažíme dosáhnout. Lineární výpočet je totiž proveden na tvaru, který chceme zachovat, dovolíme pouze změnu jeho měřítka, což nezmění poměr sil.



Obr. 3.13 Deformace od správného poměru předpětí – pohled z boku. Došlo k zachování tvaru, změnilo se jen měřítko tvaru.

Další pozorování:

Při předpínání neztuženého simplexu bez imperfekcí nedochází ke zkroucení simplexu.

Správný poměr předpětí nezávisí na velikosti předpětí.

Nejsem si jistý, zda poměr normálových tuhostí vzpěr a táhel ovlivňuje správný poměr předpětí. Toto jsem nestihl vyzkoušet. Logickou dedukcí ale docházím k tomu, že neovlivňuje, protože správný poměr předpětí závisí pouze na tvaru simplexu.

Imperfekce:

Vyzkoušel jsem, jak se změní matice vzájemného ovlivňování táhel při imperfekci v úhlu natočení horní podstavy $\pm 5^\circ$ (tedy při úhlech natočení 25° a 35°). Viz tab. 3.4a-3.5b.

Tab. 3.4a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex s imperfekcí -5° – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9894	0,9894	0,5608	0,5565	0,5549	0,5549	0,5565	0,5608	-1,4385	-1,4314	-1,4385
TS2	0,9894	1,0000	0,9894	0,5549	0,5608	0,5565	0,5608	0,5549	0,5565	-1,4385	-1,4385	-1,4314
TS3	0,9894	0,9894	1,0000	0,5565	0,5549	0,5608	0,5565	0,5608	0,5549	-1,4314	-1,4385	-1,4385
TVH1	1,7720	1,7504	1,7558	1,0000	0,9779	0,9777	0,9656	1,0011	0,9723	-2,5391	-2,5324	-2,5409
TVH2	1,7558	1,7720	1,7504	0,9777	1,0000	0,9779	0,9723	0,9656	1,0011	-2,5409	-2,5391	-2,5324
TVH3	1,7504	1,7558	1,7720	0,9779	0,9777	1,0000	1,0011	0,9723	0,9656	-2,5324	-2,5409	-2,5391
TVD1	1,7504	1,7720	1,7558	0,9656	0,9723	1,0011	1,0000	0,9777	0,9779	-2,5391	-2,5409	-2,5324
TVD2	1,7558	1,7504	1,7720	1,0011	0,9656	0,9723	0,9779	1,0000	0,9777	-2,5324	-2,5391	-2,5409
TVD3	1,7720	1,7558	1,7504	0,9723	1,0011	0,9656	0,9777	0,9779	1,0000	-2,5409	-2,5324	-2,5391

Tab. 3.4b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex s imperfekcí -5° – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9894	0,9894	0,5608	0,5565	0,5549	0,5549	0,5565	0,5608	-1,4385	-1,4314	-1,4385
TS2	1,0000	1,0107	1,0000	0,5609	0,5669	0,5625	0,5669	0,5609	0,5625	-1,4539	-1,4539	-1,4467
TS3	1,0000	1,0000	1,0107	0,5625	0,5609	0,5669	0,5625	0,5669	0,5609	-1,4467	-1,4539	-1,4539
TVH1	1,0000	0,9878	0,9909	0,5643	0,5519	0,5518	0,5449	0,5650	0,5487	-1,4329	-1,4292	-1,4340
TVH2	1,0000	1,0092	0,9969	0,5569	0,5695	0,5570	0,5538	0,5500	0,5702	-1,4472	-1,4462	-1,4424
TVH3	1,0000	1,0031	1,0123	0,5587	0,5586	0,5713	0,5719	0,5555	0,5517	-1,4468	-1,4517	-1,4506
TVD1	1,0000	1,0123	1,0031	0,5517	0,5555	0,5719	0,5713	0,5586	0,5587	-1,4506	-1,4517	-1,4468
TVD2	1,0000	0,9969	1,0092	0,5702	0,5500	0,5538	0,5570	0,5695	0,5569	-1,4424	-1,4462	-1,4472
TVD3	1,0000	0,9909	0,9878	0,5487	0,5650	0,5449	0,5518	0,5519	0,5643	-1,4340	-1,4292	-1,4329

Tab. 3.5a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex s imperfekcí $+5^\circ$ – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9900	0,9900	0,5463	0,5423	0,5408	0,5408	0,5423	0,5463	-1,4194	-1,4128	-1,4194
TS2	0,9901	1,0000	0,9901	0,5408	0,5463	0,5423	0,5463	0,5408	0,5423	-1,4196	-1,4196	-1,4129
TS3	0,9900	0,9900	1,0000	0,5423	0,5408	0,5463	0,5423	0,5463	0,5408	-1,4128	-1,4194	-1,4194
TVH1	1,8189	1,7976	1,8030	1,0000	0,9779	0,9777	0,9654	1,0014	0,9718	-2,5719	-2,5654	-2,5736
TVH2	1,8030	1,8189	1,7976	0,9777	1,0000	0,9779	0,9718	0,9654	1,0014	-2,5736	-2,5719	-2,5654
TVH3	1,7976	1,8030	1,8189	0,9779	0,9777	1,0000	1,0014	0,9718	0,9654	-2,5654	-2,5736	-2,5719
TVD1	1,7976	1,8189	1,8030	0,9654	0,9718	1,0014	1,0000	0,9777	0,9779	-2,5719	-2,5736	-2,5654
TVD2	1,8030	1,7976	1,8189	1,0014	0,9654	0,9718	0,9779	1,0000	0,9777	-2,5654	-2,5719	-2,5736
TVD3	1,8189	1,8030	1,7976	0,9718	1,0014	0,9654	0,9777	0,9779	1,0000	-2,5736	-2,5654	-2,5719

Tab. 3.5b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex s imperfekcí $+5^\circ$ – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

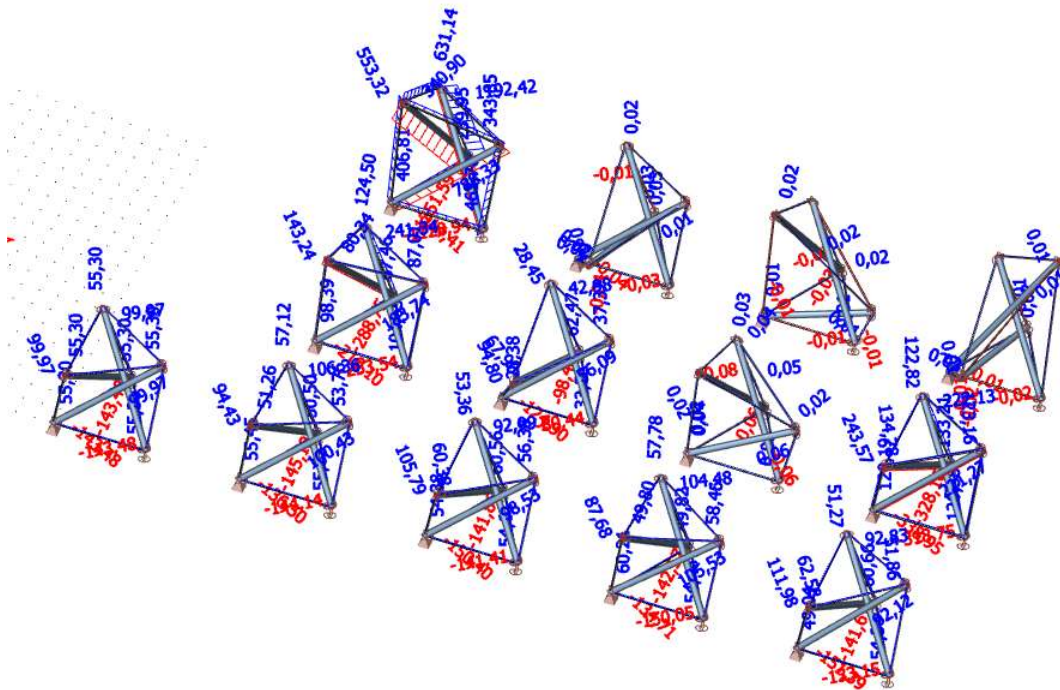
	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9900	0,9900	0,5463	0,5423	0,5408	0,5408	0,5423	0,5463	-1,4194	-1,4128	-1,4194
TS2	1,0000	1,0100	1,0000	0,5462	0,5518	0,5477	0,5518	0,5462	0,5477	-1,4338	-1,4338	-1,4270
TS3	1,0000	1,0000	1,0101	0,5477	0,5462	0,5518	0,5477	0,5518	0,5462	-1,4270	-1,4338	-1,4338
TVH1	1,0000	0,9883	0,9913	0,5498	0,5376	0,5375	0,5308	0,5506	0,5343	-1,4140	-1,4104	-1,4149
TVH2	1,0000	1,0088	0,9970	0,5422	0,5546	0,5424	0,5390	0,5354	0,5554	-1,4274	-1,4264	-1,4228
TVH3	1,0000	1,0030	1,0118	0,5440	0,5439	0,5563	0,5571	0,5406	0,5371	-1,4271	-1,4316	-1,4307
TVD1	1,0000	1,0118	1,0030	0,5371	0,5406	0,5571	0,5563	0,5439	0,5440	-1,4307	-1,4316	-1,4271
TVD2	1,0000	0,9970	1,0088	0,5554	0,5354	0,5390	0,5424	0,5546	0,5422	-1,4228	-1,4264	-1,4274
TVD3	1,0000	0,9913	0,9883	0,5343	0,5506	0,5308	0,5375	0,5376	0,5498	-1,4149	-1,4104	-1,4140

Došlo k tomu, že u nelineárních výpočtů se více změny poměry sil. Při předpínání s imperfekcí v úhlu natočení dochází nejdříve ke změně úhlu na 30° pro dosažení tvaru infinitezimálního mechanismu a až potom k předpětí. Na tuto změnu natočení se spotřebuje část teplotní změny, proto musíme táhlo více ochladit (zkrátit) a tím dosáhneme větší nesymetrie v deformacích a větší nesymetrie vnitřních sil.

Nicméně **imperfekce se předpínáním vyruší** stejně jako u infinitezimálního mechanismu v kapitole 3.1.

U lineárních výpočtů nevznikly žádné síly na těchto imperfektních konstrukcích, protože se nejedná o infinitezimální mechanismy, jsou to jen staticky určité konstrukce blízké se infinitezimálním mechanismům. Lineární výpočty nezohlední změnu tvaru při ochlazování táhel a dosažení tvaru infinitezimálního mechanismu, proto nedojde k předpětí. **Lineární výpočty tedy fungují pouze na přesné geometrii infinitezimálního mechanismu**, což může vést k problémům s hledáním správného poměru předpětí, pokud nemáme přesný tvar tensegrity konstrukce a spoléháme se, že přesného tvaru se dosáhne vyrušením imperfekcí předpětím.

Ještě jsem vyzkoušel, jaký vliv mají svislé imperfekce. Viz obr. 3.14 a model DIP 002-07-02 předpětí - svislé imperfekce.



Obr. 3.14 Normálové síly při malých i velkých svislých imperfekcích

To je vše k předpínání neztuženého simplexu.

Matice vzájemného ovlivňování táhel ztužených simplexů:

U těchto matic už nejsou stejné poměry pro předpínání jakýmkoliv táhlem, dokonce ani u čisté tensegrity konstrukce – simplexu se ztužujícími táhly, protože se už nejedná o staticky určitou konstrukci. To značně komplikuje hledání poměru předpětí pro zachování tvaru simplexu, je to iterační proces, poměr se musí „ladit“. Vnitřní síly zde nezávisí pouze na statických podmínkách rovnováhy. Navíc tato konstrukce nemá tvar infinitezimálního mechanismu (je zde jiný úhel pootočení horní podstavy). **Simplex se ztužujícími táhly lze předepnout, protože je to staticky neurčitá konstrukce. S infinitezimálním mechanismem nemá nic společného.**

Při předpínání simplexu se ztužujícími táhly dochází při nesprávném poměru předpětí ke zkroucení simplexu. Je potřeba nalézt správný poměr předpětí mezi svislými a šikmými táhly, aby ke zkroucení nedošlo. Tento poměr závisí na úhlu pootočení horní podstavy.

Podobné je to u antihranolu. U antihranolu jsou navíc vzpěry vetknuté do sebe a při nesprávném poměru předpětí v nich vznikají ohybové momenty. Při správném poměru předpětí nevzniknou ve vzpěrách ohybové momenty. To je ale jen teorie. V praxi se jednotlivá táhla předpínají postupně, takže dokud není předpínání hotové, ohybové momenty ve vzpěrách vznikají.

U simplexu se ztužujícími táhly a u antihranolu vznikají větší poměry mezi silami ve vzpěrách a silami v táhlech, protože je zde větší poměr mezi počtem táhel a počtem vzpěr. To je důvod, proč jsem u antihranolu zvolil menší předpětí, aby příliš brzy nevybočovaly vzpěry. U simplexu se ztužujícími táhly tento jev není tak velký jako u antihranolu, protože šikmá táhla zde působí méně. To, jak hodně šikmá táhla působí, závisí na úhlu pootočení horní podstavy mezi 30° a 60° (30° - žádné působení, 60° - maximální působení).

U simplexu ztuženého trojúhelníkem není předpínání příliš odlišné od předpínání neztuženého simplexu, trojúhelník má v tomto ohledu malý vliv. U simplexu ztuženého trojúhelníkem se tedy správný poměr předpětí najde stejně jako u neztuženého simplexu.

Tab. 3.6a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex se ztužujícími táhly – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,1395	0,1395	-0,1462	-0,1463	0,8144	0,7825	-0,0951	0,1401	0,1401	-0,0951	0,7825	-1,2079	-0,0123	-1,2080
TS2	0,1395	1,0000	0,1395	0,8143	-0,1462	-0,1463	0,1400	0,7824	-0,0951	0,7824	0,1400	-0,0951	-1,2080	-1,2079	-0,0123
TS3	0,1395	0,1395	1,0000	-0,1463	0,8143	-0,1462	-0,0951	0,1400	0,7824	-0,0950	0,7824	0,1400	-0,0123	-1,2079	-1,2079
TŠ1	-0,1855	1,0342	-0,1855	1,0000	-0,3640	-0,3640	-0,0497	0,8618	-0,3828	0,8618	-0,0497	-0,3828	-0,9857	-0,9857	0,7106
TŠ2	-0,1855	-0,1855	1,0342	-0,3640	1,0000	-0,3640	-0,3828	-0,0497	0,8618	-0,3828	0,8618	-0,0493	0,7106	-0,9857	-0,9857
TŠ3	1,0342	-0,1855	-0,1855	-0,3640	-0,3640	1,0000	0,8618	-0,3828	-0,0497	-0,0493	-0,3828	0,8618	-0,9857	0,7106	-0,9857
TVH1	1,1900	0,2140	-0,1439	-0,0581	-0,4575	1,0319	1,0000	-0,0920	-0,0929	0,2698	-0,3581	0,8978	-1,5795	0,2720	-1,0826
TVH2	-0,1439	1,1900	0,2139	1,0319	-0,0581	-0,4575	-0,0929	1,0000	-0,0920	0,8978	0,2698	-0,3581	-1,0826	-1,5795	0,2720
TVH3	0,2139	-0,1439	1,1900	-0,4575	1,0319	-0,0581	-0,0920	-0,0929	1,0000	-0,3581	0,8978	0,2698	0,2720	-1,0826	-1,5795
TVD1	0,2139	1,1900	-0,1438	1,0319	-0,4575	-0,0581	0,2698	0,8978	-0,3581	1,0000	-0,0930	-0,0920	-1,5794	-1,0827	0,2720
TVD2	-0,1439	0,2140	1,1900	-0,0581	1,0319	-0,4576	-0,3581	0,2698	0,8978	-0,0920	1,0000	-0,0929	0,2720	-1,5795	-1,0827
TVD3	1,1900	-0,1439	0,2139	-0,4574	-0,0581	1,0319	0,8978	-0,3581	0,2698	-0,0930	-0,0920	1,0000	-1,0826	0,2720	-1,5795

Tab. 3.6b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex se ztužujícími táhly – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,1395	0,1395	-0,1462	-0,1463	0,8144	0,7825	-0,0951	0,1401	0,1401	-0,0951	0,7825	-1,2079	-0,0123	-1,2080
TS2	1,0000	7,1703	1,0000	5,8389	-1,0484	-1,0488	1,0042	5,6102	-0,6816	5,6102	1,0042	-0,6816	-8,6615	-8,6607	-0,0885
TS3	1,0000	1,0000	7,1703	-1,0488	5,8389	-1,0484	-0,6816	1,0042	5,6102	-0,6811	5,6102	1,0038	-0,0885	-8,6611	-8,6607
TŠ1	1,0000	-5,5758	1,0000	-5,3912	1,9626	1,9626	0,2681	-4,6462	2,0637	-4,6462	0,2681	2,0637	5,3143	5,3143	-3,8308
TŠ2	1,0000	1,0000	-5,5758	1,9626	-5,3912	1,9626	2,0637	0,2681	-4,6462	2,0637	-4,6462	0,2659	-3,8308	5,3143	5,3143
TŠ3	1,0000	-0,1793	-0,1793	-0,3520	-0,3520	0,9669	0,8333	-0,3701	-0,0481	-0,0477	-0,3701	0,8333	-0,9531	0,6870	-0,9531
TVH1	1,0000	0,1798	-0,1209	-0,0489	-0,3844	0,8671	0,8403	-0,0773	-0,0781	0,2267	-0,3009	0,7544	-1,3273	0,2285	-0,9098
TVH2	1,0000	-8,2695	-1,4867	-7,1704	0,4040	3,1789	0,6459	-6,9489	0,6392	-6,2389	-1,8747	2,4885	7,5232	10,9757	-1,8899
TVH3	1,0000	-0,6728	5,5624	-2,1383	4,8230	-0,2718	-0,4299	-0,4344	4,6741	-1,6737	4,1965	1,2610	1,2712	-5,0604	-7,3827
TVD1	1,0000	5,5621	-0,6724	4,8231	-2,1385	-0,2716	1,2610	4,1965	-1,6737	4,6742	-0,4346	-0,4301	-7,3826	-5,0608	1,2715
TVD2	1,0000	-1,4872	-8,2709	0,4041	-7,1717	3,1801	2,4890	-1,8751	-6,2401	0,6395	-6,9503	0,6460	-1,8905	10,9777	7,5249
TVD3	1,0000	-0,1209	0,1797	-0,3844	-0,0488	0,8671	0,7544	-0,3009	0,2267	-0,0781	-0,0773	0,8403	-0,9097	0,2286	-1,3273

Tab. 3.6c Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex se ztužujícími táhly – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,1394	0,1394	-0,1463	-0,1463	0,8158	0,7825	-0,0954	0,1398	0,1398	-0,0954	0,7825	-1,2084	-0,0119	-1,2084
TS2	0,1394	1,0000	0,1394	0,8158	-0,1463	-0,1463	0,1398	0,7826	-0,0954	0,7825	0,1399	-0,0954	-1,2084	-1,2084	-0,0119
TS3	0,1394	0,1394	1,0000	-0,1463	0,8158	-0,1463	-0,0954	0,1398	0,7826	-0,0954	0,7825	0,1398	-0,0119	-1,2084	-1,2084
TŠ1	-0,1855	1,0347	-0,1855	1,0000	-0,3640	-0,3640	-0,0493	0,8618	-0,3828	0,8618	-0,0493	-0,3828	-0,9853	-0,9853	0,7106
TŠ2	-0,1855	-0,1855	1,0347	-0,3640	1,0000	-0,3640	-0,3828	-0,0493	0,8618	-0,3832	0,8618	-0,0493	0,7106	-0,9853	-0,9853
TŠ3	1,0347	-0,1855	-0,1855	-0,3640	-0,3640	1,0000	0,8618	-0,3828	-0,0493	-0,0493	-0,3832	0,8618	-0,9853	0,7106	-0,9853
TVH1	1,1887	0,2125	-0,1449	-0,0593	-0,4588	1,0322	1,0000	-0,0937	-0,0937	0,2709	-0,3606	0,9023	-1,5790	0,2752	-1,0822
TVH2	-0,1449	1,1887	0,2125	1,0322	-0,0593	-0,4588	-0,0937	1,0000	-0,0937	0,9022	0,2709	-0,3606	-1,0822	-1,5790	0,2752
TVH3	0,2125	-0,1449	1,1887	-0,4588	1,0322	-0,0593	-0,0937	-0,0937	1,0000	-0,3606	0,9023	0,2709	0,2752	-1,0822	-1,5790
TVD1	0,2125	1,1886	-0,1448	1,0322	-0,4589	-0,0592	0,2708	0,9022	-0,3606	1,0000	-0,0937	-0,0938	-1,5789	-1,0823	0,2752
TVD2	-0,1449	0,2125	1,1887	-0,0593	1,0322	-0,4589	-0,3606	0,2709	0,9023	-0,0937	1,0000	-0,0937	0,2752	-1,5790	-1,0822
TVD3	1,1887	-0,1449	0,2124	-0,4588	-0,0592	1,0322	0,9023	-0,3606	0,2709	-0,0938	-0,0937	1,0000	-1,0822	0,2752	-1,5791

Tab. 3.6d Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex se ztužujícími táhly – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,1394	0,1394	-0,1463	-0,1463	0,8158	0,7825	-0,0954	0,1398	0,1398	-0,0954	0,7825	-1,2084	-0,0119	-1,2084
TS2	1,0000	7,1746	1,0000	5,8534	-1,0497	-1,0497	1,0033	5,6149	-0,6842	5,6145	1,0038	-0,6842	-8,6700	-8,6696	-0,0852
TS3	1,0000	1,0000	7,1746	-1,0497	5,8534	-1,0493	-0,6842	1,0033	5,6149	-0,6842	5,6145	1,0033	-0,0852	-8,6700	-8,6696
TŠ1	1,0000	-5,5780	1,0000	-5,3912	1,9626	1,9626	0,2659	-4,6462	2,0637	-4,6462	0,2659	2,0637	5,3121	5,3121	-3,8308
TŠ2	1,0000	1,0000	-5,5780	1,9626	-5,3912	1,9626	2,0637	0,2659	-4,6462	2,0659	-4,6462	0,2659	-3,8308	5,3121	5,3121
TŠ3	1,0000	-0,1793	-0,1793	-0,3519	-0,3519	0,9665	0,8329	-0,3700	-0,0477	-0,0477	-0,3704	0,8329	-0,9523	0,6868	-0,9523
TVH1	1,0000	0,1787	-0,1219	-0,0499	-0,3860	0,8683	0,8412	-0,0788	-0,0788	0,2278	-0,3033	0,7590	-1,3284	0,2315	-0,9104
TVH2	1,0000	-8,2047	-1,4664	-7,1245	0,4091	3,1668	0,6469	-6,9021	0,6469	-6,2274	-1,8694	2,4887	7,4696	10,8986	-1,8992
TVH3	1,0000	-0,6821	5,5950	-2,1595	4,8584	-0,2790	-0,4411	-0,4411	4,7068	-1,6971	4,2468	1,2748	1,2952	-5,0937	-7,4321
TVD1	1,0000	5,5948	-0,6817	4,8584	-2,1598	-0,2788	1,2748	4,2467	-1,6971	4,7069	-0,4411	-0,4413	-7,4319	-5,0941	1,2954
TVD2	1,0000	-1,4669	-8,2061	0,4094	-7,1259	3,1678	2,4892	-1,8698	-6,2289	0,6470	-6,9035	0,6468	-1,9000	10,9007	7,4712
TVD3	1,0000	-0,1219	0,1787	-0,3859	-0,0498	0,8683	0,7590	-0,3033	0,2278	-0,0789	-0,0788	0,8412	-0,9104	0,2315	-1,3284

Tab. 3.7a Matice vzájemného ovlivňování táhel – antihranol – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	-0,0981	-0,0981	-0,1025	-0,1026	0,9320	0,8250	-0,0882	-0,0842	-0,0842	-0,0882	0,8250	-1,1628	0,2645	-1,1134
TS2	-0,0981	1,0000	-0,0981	0,9320	-0,1025	-0,1025	-0,0842	0,8250	-0,0882	0,8250	-0,0842	-0,0882	-1,1134	-1,1627	0,2644
TS3	-0,0981	-0,0981	1,0000	-0,1025	0,9320	-0,1024	-0,0882	-0,0842	0,8250	-0,0882	0,8250	-0,0842	0,2645	-1,1134	-1,1628
TŠ1	-0,1022	0,9299	-0,1022	1,0000	-0,0977	-0,0977	-0,0880	0,8236	-0,0843	0,8236	-0,0880	-0,0843	-1,1626	-1,1107	0,2640
TŠ2	-0,1022	-0,1022	0,9299	-0,0977	1,0000	-0,0977	-0,0843	-0,0880	0,8236	-0,0843	0,8236	-0,0880	0,2640	-1,1626	-1,1107
TŠ3	0,9299	-0,1022	-0,1022	-0,0977	-0,0977	1,0000	0,8236	-0,0843	-0,0880	-0,0880	-0,0843	0,8236	-1,1107	0,2640	-1,1626
TVH1	1,0964	-0,1123	-0,1170	-0,1170	-0,1124	1,0964	1,0000	-0,1023	-0,1023	-0,0989	-0,0989	0,9349	-1,2894	0,2994	-1,2894
TVH2	-0,1170	1,0964	-0,1124	1,0964	-0,1170	-0,1124	-0,1023	1,0000	-0,1023	0,9349	-0,0989	-0,0989	-1,2894	-1,2893	0,2994
TVH3	-0,1124	-0,1170	1,0964	-0,1123	1,0964	-0,1170	-0,1023	-0,1023	1,0000	-0,0989	0,9349	-0,0989	0,2994	-1,2894	-1,2894
TVD1	-0,1123	1,0963	-0,1169	1,0964	-0,1124	-0,1169	-0,0989	0,9348	-0,0989	1,0000	-0,1023	-0,1023	-1,3296	-1,3297	0,3108
TVD2	-0,1169	-0,1123	1,0964	-0,1170	1,0964	-0,1124	-0,0989	-0,0989	0,9349	-0,0989	-0,1023	1,0000	-0,1022	0,3108	-1,3297
TVD3	1,0964	-0,1170	-0,1124	-0,1123	-0,1169	1,0964	0,9349	-0,0989	-0,0989	-0,1023	-0,1022	-0,1022	1,0000	-1,3297	0,3108

Tab. 3.7b Matice vzájemného ovlivňování táhel – antihranol – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	-0,0981	-0,0981	-0,1025	-0,1026	0,9320	0,8250	-0,0882	-0,0842	-0,0842	-0,0882	0,8250	-1,1628	0,2645	-1,1134
TS2	1,0000	-10,1963	1,0000	-9,5025	1,0451	1,0451	0,8580	-8,4117	0,8994	-8,4117	0,8580	0,8994	11,3525	11,8556	-2,6963
TS3	1,0000	1,0000	-10,1957	1,0451	-9,5025	1,0444	0,8994	0,8586	-8,4117	0,8994	-8,4117	0,8586	-2,6963	11,3519	11,8556
TŠ1	1,0000	-9,1022	1,0000	-9,7883	0,9562	0,9562	0,8613	-8,0620	0,8248	-8,0620	0,8613	0,8248	11,3796	10,8723	-2,5839
TŠ2	1,0000	1,0000	-9,1022	0,9562	-9,7883	0,9562	0,8248	0,8613	-8,0620	0,8248	-8,0620	0,8613	-2,5839	11,3796	10,8723
TŠ3	1,0000	-0,1099	-0,1099	-0,1051	-0,1051	1,0754	0,8857	-0,0906	-0,0946	-0,0946	-0,0906	0,8857	-1,1945	0,2839	-1,2502
TVH1	1,0000	-0,1024	-0,1067	-0,1067	-0,1025	1,0000	0,9121	-0,0933	-0,0933	-0,0902	-0,0902	0,8527	-1,1760	0,2731	-1,1760
TVH2	1,0000	-9,3737	0,9605	-9,3737	1,0000	0,9605	0,8744	-8,5493	0,8744	-7,9925	0,8459	0,8459	11,0231	11,0229	-2,5598
TVH3	1,0000	1,0411	-9,7588	0,9998	-9,7588	1,0411	0,9103	0,9103	-8,9006	0,8806	-8,3209	0,8806	-2,6652	11,4761	11,4761
TVD1	1,0000	-9,7607	1,0409	-9,7612	1,0005	1,0411	0,8808	-8,3230	0,8808	-8,9032	0,9107	0,9107	11,8380	11,8390	-2,7673
TVD2	1,0000	0,9605	-9,3780	1,0005	-9,3778	0,9614	0,8463	0,8463	-7,9963	0,8750	-8,5533	0,8745	-2,6586	11,3736	11,3755
TVD3	1,0000	-0,1067	-0,1025	-0,1024	-0,1066	1,0000	0,8527	-0,0902	-0,0902	-0,0933	-0,0933	0,9121	-1,2128	0,2835	-1,2130

Tab. 3.7c Matice vzájemného ovlivňování táhel – antihranol – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	-0,0978	-0,0978	-0,1023	-0,1023	0,9296	0,8233	-0,0878	-0,0841	-0,0841	-0,0878	0,8233	-1,1624	0,2638	-1,1102
TS2	-0,0978	1,0000	-0,0978	0,9296	-0,1023	-0,1023	-0,0841	0,8233	-0,0878	0,8232	-0,0841	-0,0878	-1,1103	-1,1624	0,2638
TS3	-0,0978	-0,0978	1,0000	-0,1023	0,9296	-0,1023	-0,0878	-0,0841	0,8233	-0,0878	0,8233	-0,0841	0,2638	-1,1102	-1,1624
TŠ1	-0,1021	0,9296	-0,1021	1,0000	-0,0977	-0,0977	-0,0880	0,8233	-0,0842	0,8233	-0,0880	-0,0842	-1,1625	-1,1103	0,2639
TŠ2	-0,1021	-0,1021	0,9296	-0,0977	1,0000	-0,0977	-0,0842	-0,0880	0,8233	-0,0842	0,8233	-0,0880	0,2639	-1,1625	-1,1103
TŠ3	0,9296	-0,1021	-0,1021	-0,0977	-0,0977	1,0000	0,8233	-0,0842	-0,0880	-0,0842	0,8233	-1,1103	0,2639	-1,1625	-1,1103
TVH1	1,0898	-0,1114	-0,1163	-0,1163	-0,1114	1,0898	1,0000	-0,1021	-0,1021	-0,0977	-0,0977	0,9296	-1,2805	0,2963	-1,2805
TVH2	-0,1163	1,0898	-0,1114	1,0898	-0,1163	-0,1114	-0,1021	1,0000	-0,1021	0,9296	-0,0977	-0,0977	-1,2805	-1,2805	0,2963
TVH3	-0,1114	-0,1163	1,0898	-0,1114	1,0898	-0,1163	-0,1021	-0,1021	1,0000	-0,0977	0,9296	-0,0977	0,2964	-1,2805	-1,2805
TVD1	-0,1114	1,0896	-0,1162	1,0897	-0,1114	-0,1162	-0,0977	0,9296	-0,0977	1,0000	-0,1021	-0,1021	-1,3273	-1,3274	0,3095
TVD2	-0,1162	-0,1114	1,0898	-0,1163	1,0898	-0,1115	-0,0977	-0,0977	0,9296	-0,1021	1,0000	-0,1021	0,3095	-1,3274	-1,3274
TVD3	1,0898	-0,1163	-0,1115	-0,1114	-0,1162	1,0898	0,9296	-0,0977	-0,0977	-0,1021	-0,1021	1,0000	-1,3274	0,3095	-1,3274

Tab. 3.7d Matice vzájemného ovlivňování táhel – antihranol – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TŠ1	TŠ2	TŠ3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	-0,0978	-0,0978	-0,1023	-0,1023	0,9296	0,8233	-0,0878	-0,0841	-0,0841	-0,0878	0,8233	-1,1624	0,2638	-1,1102
TS2	1,0000	-10,2265	1,0006	-9,5062	1,0457	1,0463	0,8605	-8,4191	0,8981	-8,4185	0,8605	0,8981	11,3543	11,8870	-2,6981
TS3	1,0000	1,0006	-10,2265	1,0463	-9,5062	1,0457	0,8981	0,8605	-8,4191	0,8981	-8,4191	0,8611	-2,6981	11,3537	11,8870
TŠ1	1,0000	-9,1022	1,0000	-9,7920	0,9562	0,9562	0,8613	-8,0620	0,8248	-8,0620	0,8613	0,8248	11,3832	10,8723	-2,5839
TŠ2	1,0000	1,0000	-9,1022	0,9562	-9,7920	0,9562	0,8248	0,8613	-8,0620	0,8248	-8,0620	0,8613	-2,5839	11,3832	10,8723
TŠ3	1,0000	-0,1099	-0,1099	-0,1051	-0,1051	1,0758	0,8857	-0,0906	-0,0946	-0,0946	-0,0906	0,8857	-1,1945	0,2839	-1,2506
TVH1	1,0000	-0,1022	-0,1067	-0,1067	-0,1022	1,0000	0,9176	-0,0937	-0,0937	-0,0897	-0,0897	0,8530	-1,1750	0,2719	-1,1750
TVH2	1,0000	-9,3719	0,9581	-9,3717	1,0000	0,9579	0,8781	-8,5997	0,8781	-7,9946	0,8404	0,8404	11,0121	11,0119	-2,5485
TVH3	1,0000	1,0440	-9,7838	1,0000	-9,7838	1,0440	0,9167	0,9167	-8,9779	0,8773	-8,3462	0,8773	-2,6608	11,4964	11,4964
TVD1	1,0000	-9,7833	1,0435	-9,7840	1,0005	1,0435	0,8773	-8,3462	0,8773	-8,9784	0,9169	0,9169	11,9167	11,9176	-2,7789
TVD2	1,0000	0,9581	-9,3760	1,0005	-9,3760	0,9590	0,8407	0,8407	-7,9984	0,8787	-8,6037	0,8785	-2,6629	11,4203	11,4207
TVD3	1,0000	-0,1067	-0,1023	-0,1022	-0,1067	1,0000	0,8531	-0,0897	-0,0897	-0,0937	-0,0937	0,9176	-1,2180	0,2840	-1,2181

Tab. 3.8a Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex ztužený trojúhelníkem – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9973	0,9973	0,5529	0,5518	0,5517	0,5517	0,5519	0,5530	-1,4329	-1,4314	-1,4331
TS2	0,9973	1,0000	0,9973	0,5518	0,5529	0,5518	0,5529	0,5517	0,5518	-1,4335	-1,4329	-1,4314
TS3	0,9973	0,9973	1,0000	0,5518	0,5518	0,5529	0,5519	0,5529	0,5516	-1,4314	-1,4332	-1,4333
TVH1	1,6567	1,6506	1,6519	1,0000	0,8729	0,8724	0,9087	0,9897	0,8414	-2,4094	-2,4204	-2,3861
TVH2	1,6519	1,6568	1,6506	0,8724	1,0000	0,8729	0,8414	0,9088	0,9895	-2,3861	-2,3357	-2,3204
TVH3	1,6505	1,6519	1,6567	0,8729	0,8724	1,0000	0,9898	0,8413	0,9089	-2,4204	-2,3599	-2,3358
TVD1	1,6504	1,6567	1,6525	0,9088	0,8415	0,9898	1,0000	0,8726	0,8728	-2,4094	-2,3604	-2,3207
TVD2	1,6523	1,6505	1,6567	0,9898	0,9090	0,8414	0,8730	1,0000	0,8725	-2,4208	-2,4094	-2,3603
TVD3	1,6567	1,6517	1,6499	0,8412	0,9893	0,9088	0,8721	0,8727	1,0000	-2,3852	-2,3198	-2,3358

Tab. 3.8b Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex ztužený trojúhelníkem – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – nelineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9973	0,9973	0,5529	0,5518	0,5517	0,5517	0,5519	0,5530	-1,4329	-1,4314	-1,4331
TS2	1,0000	1,0027	1,0000	0,5533	0,5544	0,5533	0,5544	0,5532	0,5533	-1,4374	-1,4368	-1,4353
TS3	1,0000	1,0000	1,0027	0,5533	0,5533	0,5544	0,5534	0,5544	0,5531	-1,4353	-1,4371	-1,4372
TVH1	1,0000	0,9963	0,9971	0,6036	0,5269	0,5266	0,5485	0,5974	0,5079	-1,4543	-1,4610	-1,4403
TVH2	1,0000	1,0029	0,9992	0,5281	0,6054	0,5284	0,5093	0,5502	0,5990	-1,4444	-1,4139	-1,4047
TVH3	1,0000	1,0008	1,0037	0,5289	0,5286	0,6059	0,5997	0,5097	0,5507	-1,4665	-1,4298	-1,4152
TVD1	1,0000	1,0038	1,0013	0,5507	0,5099	0,5997	0,6059	0,5287	0,5288	-1,4599	-1,4302	-1,4062
TVD2	1,0000	0,9989	1,0027	0,5990	0,5501	0,5092	0,5283	0,6052	0,5281	-1,4651	-1,4582	-1,4284
TVD3	1,0000	0,9970	0,9959	0,5078	0,5972	0,5486	0,5264	0,5268	0,6036	-1,4398	-1,4003	-1,4100

Tab. 3.8c Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex ztužený trojúhelníkem – bez imperfekcí – normovaná podle diagonály – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9995	0,9995	0,5528	0,5526	0,5528	0,5527	0,5527	0,5529	-1,4346	-1,4342	-1,4348
TS2	0,9995	1,0000	0,9995	0,5528	0,5528	0,5526	0,5527	0,5527	0,5526	-1,4345	-1,4346	-1,4342
TS3	0,9995	0,9995	1,0000	0,5526	0,5528	0,5528	0,5527	0,5528	0,5526	-1,4342	-1,4345	-1,4345
TVH1	1,6493	1,6492	1,6487	1,0000	0,8695	0,8695	0,9128	0,9878	0,8380	-2,4075	-2,4214	-2,3532
TVH2	1,6487	1,6493	1,6492	0,8695	1,0000	0,8695	0,8379	0,9129	0,9877	-2,3828	-2,4075	-2,4214
TVH3	1,6492	1,6487	1,6493	0,8695	0,8695	1,0000	0,9879	0,8379	0,9130	-2,4214	-2,3828	-2,4214
TVD1	1,6489	1,6491	1,6491	0,9128	0,8379	0,9879	1,0000	0,8696	0,8693	-2,4074	-2,3828	-2,4214
TVD2	1,6490	1,6492	1,6494	0,9879	0,9130	0,8380	0,8697	1,0000	0,8697	-2,4218	-2,4077	-2,3827
TVD3	1,6490	1,6483	1,6484	0,8378	0,9874	0,9127	0,8691	0,8693	1,0000	-2,3816	-2,4206	-2,4073

Tab. 3.8d Matice vzájemného ovlivňování táhel – simplex ztužený trojúhelníkem – bez imperfekcí – normovaná podle 1. sloupce – lineární výpočet

	TS1	TS2	TS3	TVH1	TVH2	TVH3	TVD1	TVD2	TVD3	V1	V2	V3
TS1	1,0000	0,9995	0,9995	0,5528	0,5526	0,5528	0,5527	0,5527	0,5529	-1,4346	-1,4342	-1,4348
TS2	1,0000	1,0005	1,0000	0,5531	0,5531	0,5529	0,5530	0,5530	0,5529	-1,4352	-1,4353	-1,4349
TS3	1,0000	1,0000	1,0005	0,5529	0,5531	0,5531	0,5530	0,5531	0,5529	-1,4349	-1,4352	-1,4352
TVH1	1,0000	0,9999	0,9996	0,6063	0,5272	0,5272	0,5534	0,5989	0,5081	-1,4597	-1,4682	-1,4268
TVH2	1,0000	1,0004	1,0003	0,5274	0,6066	0,5274	0,5083	0,5537	0,5991	-1,4453	-1,4603	-1,4687
TVH3	1,0000	0,9997	1,0001	0,5272	0,5272	0,6064	0,5990	0,5081	0,5536	-1,4682	-1,4448	-1,4682
TVD1	1,0000	1,0001	1,0001	0,5536	0,5082	0,5991	0,6065	0,5274	0,5272	-1,4600	-1,4450	-1,4685
TVD2	1,0000	1,0001	1,0002	0,5991	0,5537	0,5082	0,5274	0,6064	0,5274	-1,4686	-1,4601	-1,4450
TVD3	1,0000	0,9996	0,9996	0,5081	0,5988	0,5535	0,5270	0,5272	0,6064	-1,4442	-1,4679	-1,4598

3.2.2 Stabilita

Toto měla být velmi důležitá kapitola, jejímž úkolem mělo být nalezení praktického způsobu, jak posuzovat stabilitu u tensegrity konstrukcí.

Kvůli chybám v programu SCIA Engineer jsem tento velmi důležitý úkol bohužel nemohl splnit.

Sice bych si mohl napsat svůj vlastní program pro výpočty, které jsem potřeboval udělat, ale to by značně přesahovalo rozsah této diplomové práce.

Dále jsem mohl použít jiný software a doufat, že v něm chyby nebudou, ale na to už také nezbyl čas. Snahou o vyřešení problémů s programem SCIA Engineer jsem ztratil příliš mnoho času.

V čem spočívají chyby v programu:

Viz modely DIP 002-02-09.

Jde o tzv. „nelineární stabilitu“ v programu. Když program na modelu DIP 002-02-09-04 počítá vnitřní síly a deformace pomocí GNA a já postupně zvyšuji zatížení, dojde k tomu, že při určité velikosti zatížení GNA selže kvůli singulární matici tuhosti konstrukce. To znamená, že bylo dosaženo nebo překročeno kritické zatížení a došlo ke ztrátě stability. Pro nalezení kritického zatížení pomocí GNA musím zvyšovat a snižovat zatížení, dokud nenajdu hranici (hodnotu kritického zatížení) mezi úspěšným a neúspěšným výpočtem. Tímto zdlouhavým iteračním procesem získám správnou hodnotu kritického zatížení, ale nezískám vlastní tvary. Pokud ten samý model nechám spočítat **pomocí nelineární stability, vyjde řádově 100x větší kritické zatížení! To je ŠPATNĚ!**

Nelineární stabilita by měla fungovat stejně jako GNA resp. GNIA, měly by z ní tedy vycházet stejné výsledky. To, že to tak není, je důkazem chyby v programu.

Na modelech DIP 002-02-09-01 až DIP 002-02-09-03 tato chyba buď není vidět, protože je malá, nebo se neprojevuje. Nevím proč. Model DIP 002-02-09-04 se sice od ostatních liší tím, že obsahuje infinitezimální mechanismus, ale to není důvod k tomu, aby nelineární stabilita dávala jiné výsledky než GNA, když obě fungují na stejném principu. Výsledky by u některých konstrukcí sice mohly vyjít chybné, ale musely by vyjít stejné (stejně chybné) z GNA a z nelineární stability.

Kromě chyb ve výpočtech týkajících se stability mě při práci VELMI zdržely i jiné drobnější chyby a nedostatky v programu, a vypadalo to, že nebude možné práci dokončit.

Další věci, na které je potřeba si dát pozor při posuzování stability tensegrity konstrukcí:

Viz [3] a rešerše.

3.2.3 Zatížení

V této části je analýza chování simplexů a ztužených simplexů při působení nejdůležitějších zatížení. **Zde je potřeba upozornit na to, že u tensegrity konstrukcí nefunguje princip superpozice, a proto na základě analýzy odezvy na jednotlivá zatížení nemůžeme s jistotou předvídat chování konstrukce při kombinacích zatížení.** Vzhledem k tomu, jak hodně odlišné je chování tensegrity konstrukcí od chování normálních konstrukcí, by mohlo být chování tensegrity konstrukcí při kombinacích zatížení velmi překvapující, a proto je potřeba toto chování prozkoumat. V této diplomové práci to dělat nebudu, protože to přesahuje její rozsah.

U prvních dvou zatížení jsem provedl podrobnou analýzu. U ostatních zatížení jsem neprovedl analýzu stejně podrobně, protože to přesahuje rozsah této diplomové práce. Úkolem této diplomové práce je aplikace tensegrity konstrukcí na reálné konstrukce, proto se nemůžu zdržovat příliš podrobným výzkumem, i přesto že podrobný výzkum je nutný pro navrhování bezpečných tensegrity konstrukcí. Navíc dostatečně podrobný výzkum by se do rozsahu této práce nevešel, i kdyby úkolem této práce nebylo nic jiného.

U grafů týkajících se deformací a tuhostí je odečtena počáteční deformace od předpětí (smrštění simplexu při předpětí).

Zkroucení v grafech je spočítáno v Excelu ze souřadnic a posunů uzlů horní podstavu získaných z programu. Dolní podstava se neotáčí. Výpočet úhlu je podle vzorce (1).

$$\cos(\varphi) = \frac{u \cdot v}{|u| \cdot |v|} \quad (1)$$

Vektory u , v jsou vektory horního vodorovného táhla před deformací a po deformaci. Výsledkem výpočtu je úhel v absolutní hodnotě, takže znaménka \pm jsem musel přidat „ručně“. Nakonec se od úhlu zkroucení odečte počáteční úhel zkroucení od předpětí, který je ale stejně nulový.

Vodorovné smrštění simplexu jsem spočítal opět v Excelu ze souřadnic a posunů uzlů horní podstavu jako zkrácení horního vodorovného táhla, tedy rozdíl délek vektorů u , v .

Svislé smrštění je posun uzlů horní podstavu ve svislém směru. Dolní podstava se nepohybuje.

Vodorovný posun vůči svislé ose jsem počítal jako vodorovný posun těžiště horní podstavu vypočítaný z půdorysných souřadnic a posunů uzlů horní podstavu opět v Excelu.














Grafy týkající se vodorovného smrštění jsou kostrbaté kvůli zaokrouhlovacím chybám malých deformací na desetiny milimetru.

U některých grafů týkajících se tuhostí vycházejí při malých zatíženích nekonečně velké tuhosti kvůli deformacím menším než 0,05 mm zaokrouhlených na 0,0 mm. Týká se to ztužených simplexů. Proto se v některých grafech tyto hodnoty neobjevují.

Legenda ke grafům:



















Zkratky:

N_{TS} (N_{Ts})	normálová síla ve svislém táhle
$N_{T\bar{s}}$	normálová síla v šikmém táhle
N_{TV}	normálová síla ve vodorovném táhle
N_V	normálová síla ve vzpěře
M_V	ohybový moment ve vzpěře

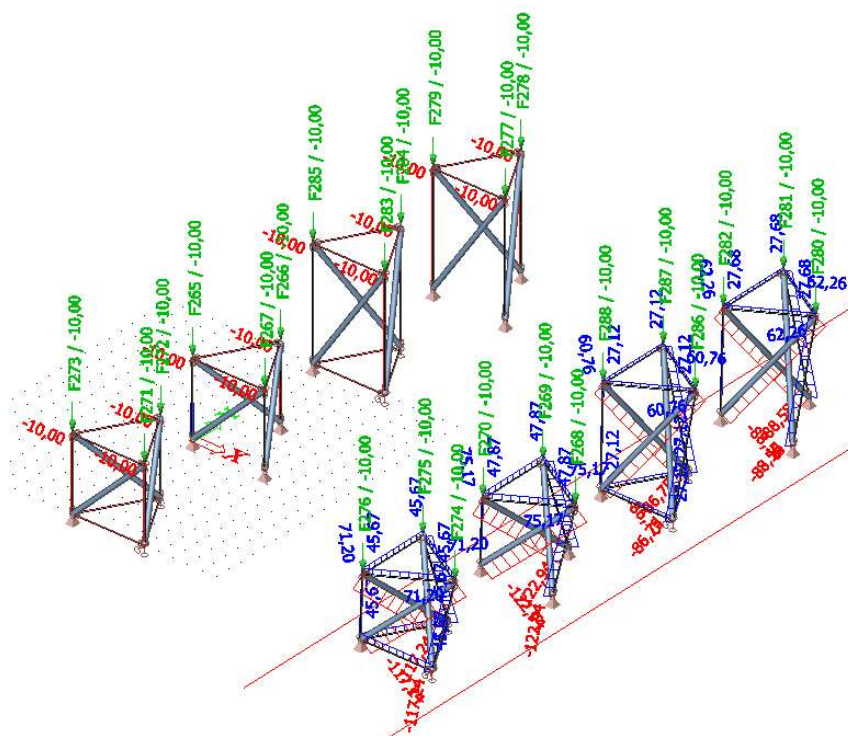
 0	simplex nepředpjatý
 100	simplex předpjatý ($N_{TS} = 100$ kN)
 200	simplex předpjatý ($N_{TS} = 200$ kN)
 300	simplex předpjatý ($N_{TS} = 300$ kN)
 400	simplex předpjatý ($N_{TS} = 400$ kN)
 500	simplex předpjatý ($N_{TS} = 500$ kN)
 1000	simplex předpjatý ($N_{TS} = 1000$ kN)
 5000	simplex předpjatý ($N_{TS} = 5000$ kN)
 0T	simplex nepředpjatý se silnějšími táhly $\varnothing 80$ mm
 500T	simplex předpjatý ($N_{TS} = 500$ kN) se silnějšími táhly $\varnothing 80$ mm
 500t+	simplex se ztužujícími táhly předpjatý ($N_{TS} = 500$ kN)
 p-anti	předpjatý antihranol ($N_{TS} = 350$ kN)
 500troj	simplex ztužený trojúhelníkem předpjatý ($N_{TS} = 500$ kN)

Legenda k obrázkům:

Zkratka: N – normálová síla

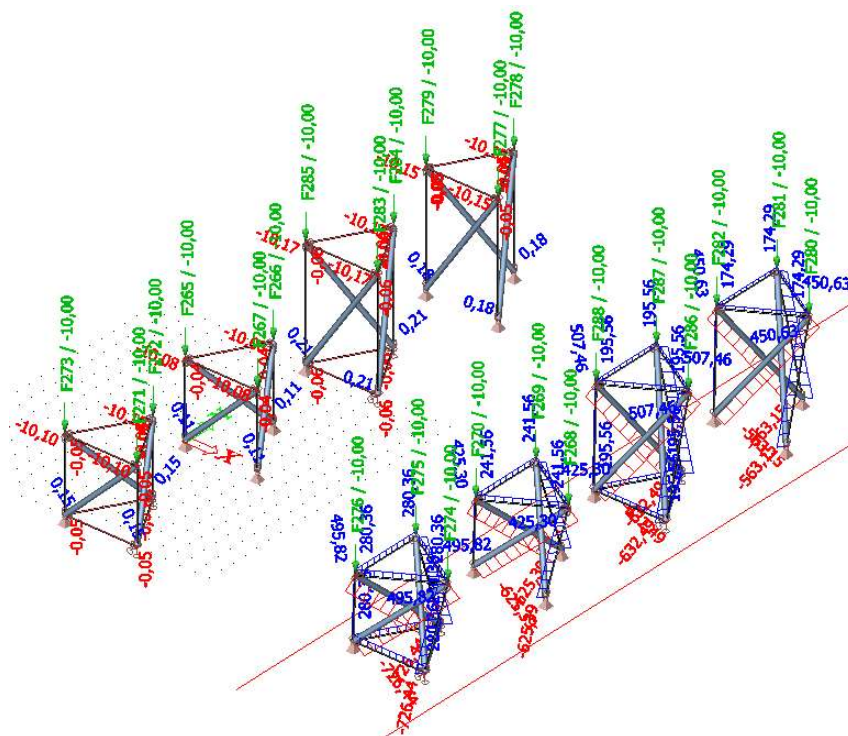
 deformace – předpětí	 tahová N – předpětí	 tlaková N – předpětí
 deformace – 1. zatěž. krok	 tahová N – 1. zatěž. krok	 tlaková N – 1. zatěž. krok
 deformace – 2. zatěž. krok	 tahová N – 2. zatěž. krok	 tlaková N – 2. zatěž. krok
 deformace – 3. zatěž. krok	 tahová N – 3. zatěž. krok	 tlaková N – 3. zatěž. krok
 deformace – 4. zatěž. krok	 tahová N – 4. zatěž. krok	 tlaková N – 4. zatěž. krok
 deformace – 5. zatěž. krok	 tahová N – 5. zatěž. krok	 tlaková N – 5. zatěž. krok

Než přejdu k podrobné analýze jednotlivých zatížení, vyzkouším ještě, jaký vliv má způsob podepření a výška simplexu a porovnáám statické působení stabilní staticky určité konstrukce se statickým působením tensegrity simplexu (viz následující obrázky a model DIP 002-02 všechna zatížení - zkouška).



Obr. 3.15a Vliv podepření a výšky simplexu na rozložení sil od svislého zatížení bez předpětí a porovnání se stabilní staticky určitou konstrukcí, u které úhel pootočení horní podstavy = 0° - svislé zatížení nepředpjatých konstrukcí.

Ve směru x vlevo jsou stabilní staticky určité konstrukce, ve směru x vpravo jsou tensegrity simplexy. Ve směru y zleva doprava se střídá podepření umožňující smrštění dolní podstavy a neumožňující smrštění dolní podstavy. Nižší konstrukce mají výšku 5 m, vyšší konstrukce mají výšku 7,5 m.



Obr. 3.15b Vliv podepření a výšky simplexu na rozložení sil od svislého zatížení s předpětím a porovnání se stabilní staticky určitou konstrukcí – svislé zatížení předpjatých konstrukcí

3.2.3.1 Svislé zatížení třemi silami (svislý tlak/tah)

Viz model DIP 002-02-02ab a následující tabulky, obrázky a grafy.

U tohoto zatížení nedochází ke globální ztrátě stability. Ke ztrátě stability tedy dojde buď při vybočení vzpěr nebo při vymizení tahu v táhlech.

Bez ohledu na to, zda je zatížení kladné, nebo záporné, vzniknou u nepředpjatého simplexu tahové síly v táhlech a tlakové síly ve vzpěrách.

U předpjatého simplexu dojde při kladném zatížení nejdříve k malému poklesu tahu ve svislých táhlech, ale potom už tah zase roste. Tah opět začne klesat až při velkém zatížení a nakonec vymizí. Při záporném zatížení se toto děje s tahem ve vodorovných táhlech a s tlakem ve vzpěrách.

Při kladném zatížení se simplex ve svislém směru stlačí a zkroutí se ve směru pootočení horní podstavy.

Při záporném zatížení se simplex ve svislém směru protáhne a zkroutí se v protisměru pootočení horní podstavy.

Ke zkosení simplexu (k vodorovnému posunu) u tohoto zatížení nedochází.

Při velkém kladném zatížení vymizí tah ve svislých táhlech.

Při velkém záporném zatížení vymizí tah ve vodorovných táhlech a vymizí tlak ve vzpěrách.

U reálných konstrukcí pravděpodobně dojde k vybočení vzpěr dříve, než by bylo dosaženo „velkého“ zatížení, o kterém píšu v předchozích dvou větách a v následujícím odstavci.

Při kladném i záporném zatížení dojde k vymizení tahu v táhlech právě tehdy, když je absolutní hodnota zkroucení simplexu přesně 30° (to je nereálně velká deformace). To znamená, že při kladném zatížení je to, když je simplex zdeformovaný do antihranolu, a při záporném zatížení je to, když má horní podstava nulové pootočení vůči spodní podstavě a svislá táhla jsou přesně svislá. Při dalším zvětšování zatížení vzniká tlak v táhlech, ve kterých vymizel tah (pokud jsou schopny tlak přenášet) a deformace pokračují teoreticky dál ve stejném smyslu jako dosud. Při kladném zatížení ve skutečnosti nemohou deformace dál pokračovat, protože vzpěry by musely projít skrz sebe (ve skutečnosti se vzpěry o sebe zarazí a vzniknou v nich ohybové momenty). Při záporném zatížení by zkroucení překročilo 30° , svislá táhla by se vychýlila na druhou stranu a pokud by vodorovná táhla byla schopna přenášet tlak, zatěžování by mohlo dále pokračovat.

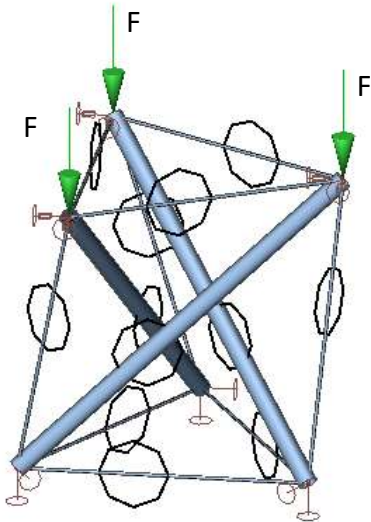
Vymizení tahu v táhlech tedy závisí na deformaci. To znamená, že kdyby konstrukce byla z materiálu s malým modulem pružnosti, došlo by k tomuto vymizení tahu v táhlech už při malých zatíženích a vnitřních silách, to už by nebylo nereálné.

Počáteční tuhost simplexu je vždy nulová.

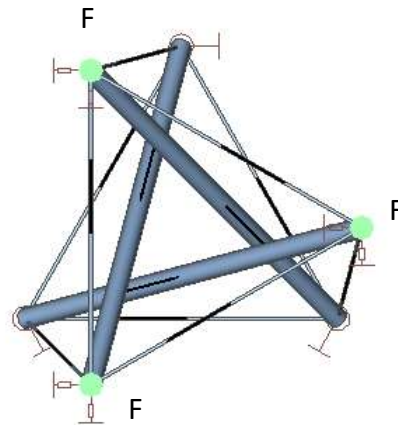
Na obrázcích a grafech je vidět, že čím je vyšší předpětí, tím rychlejší je náběh tuhosti při zatížení/deformaci a tím vyšší tato tuhost je. Je to jako u infinitezimálního mechanismu v kapitole 3.1.

Zesílením táhel se trochu zrychlil náběh tuhosti.

Simplex se ztužujícími táhly, antihranol a simplex ztužený trojúhelníkem mají výrazně větší tuhost, než neztužený simplex.



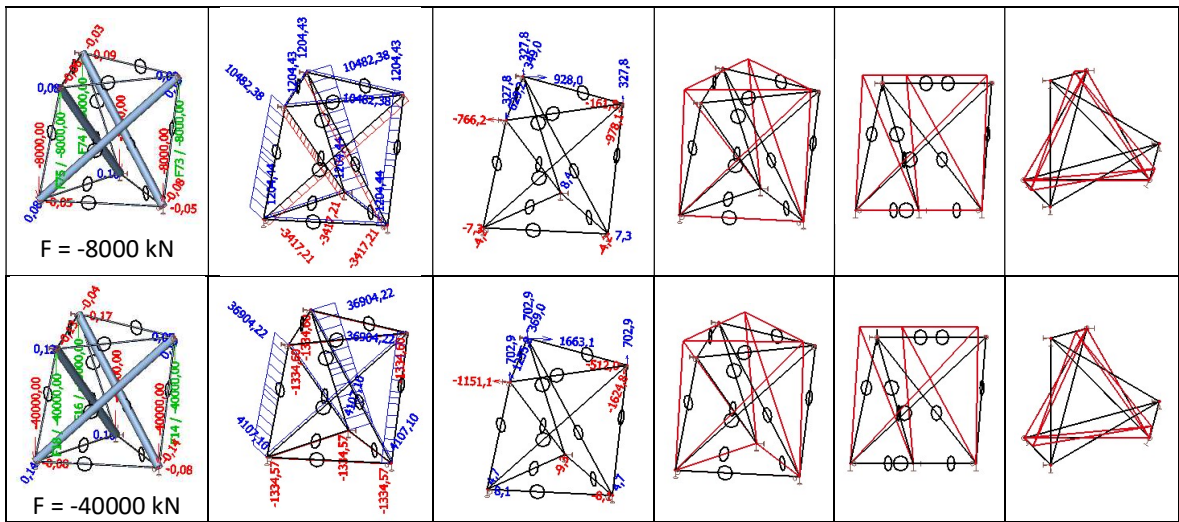
Obr. 3.16a Schéma zatížení – axonometrie



Obr. 3.16b Schéma zatížení – pohled shora

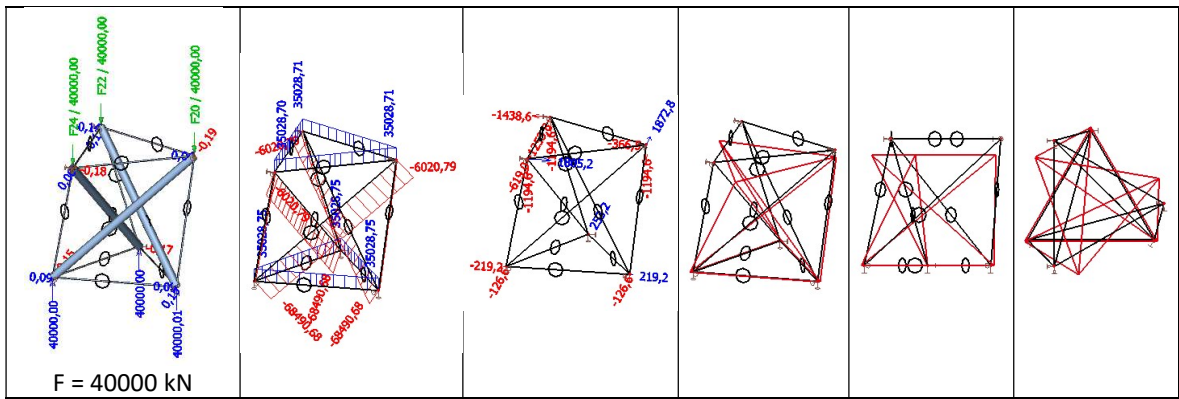
Tab. 3.9a Svislé zatížení třemi silami - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 8000 kN</p>					
<p>F = 40000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					

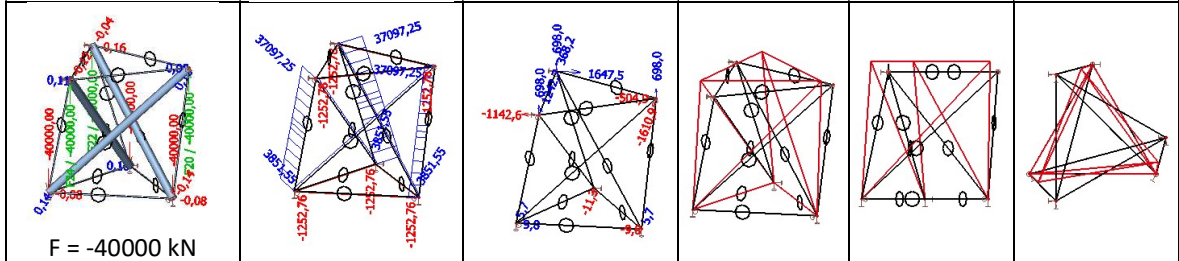
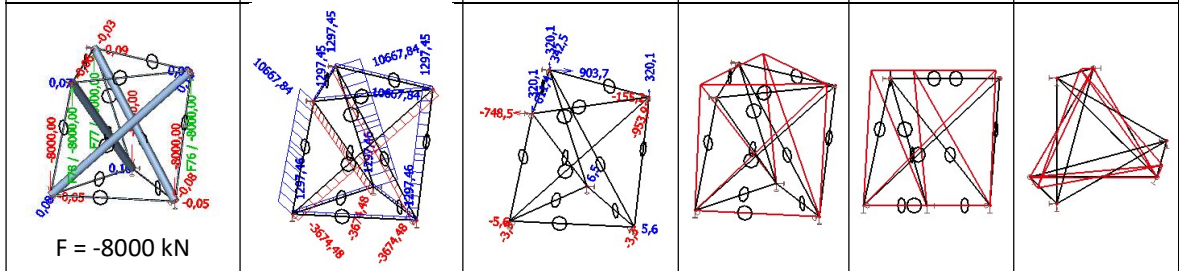
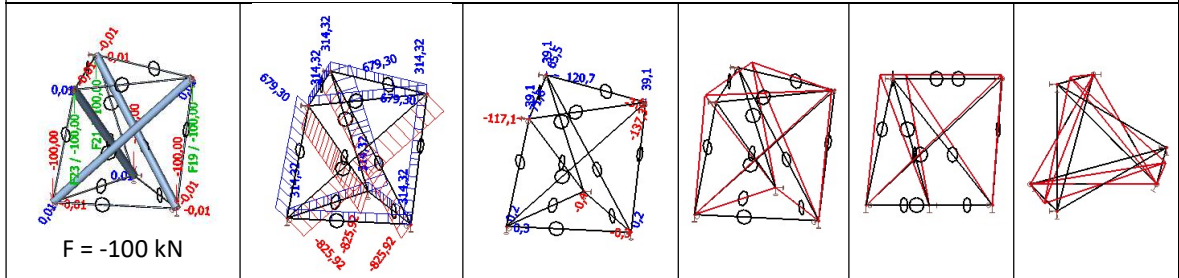


Tab. 3.9b Svislé zatížení třemi silami - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
F = 100 kN 					
F = 8000 kN 					

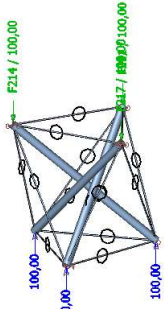
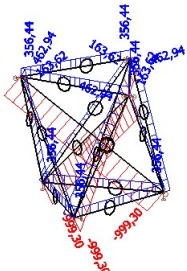
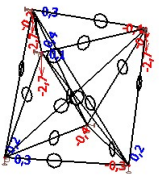
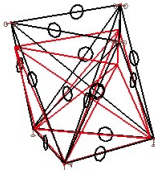
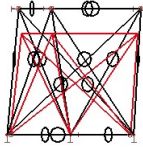
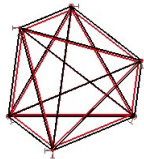
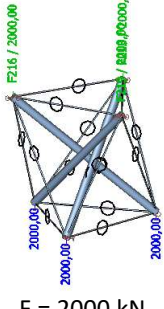
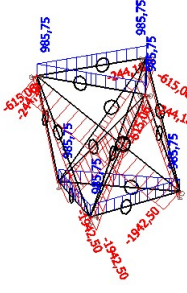
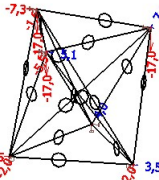
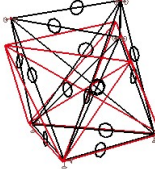
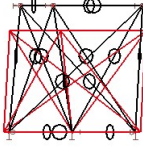

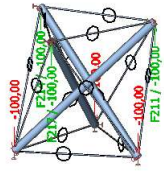
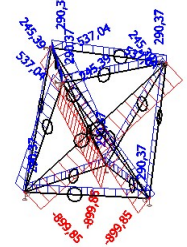
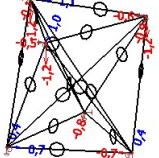
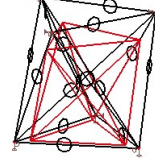
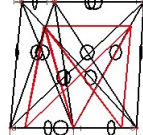
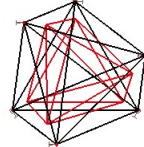
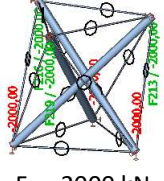
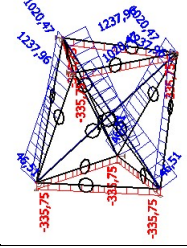
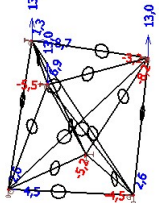
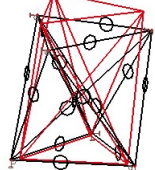
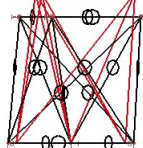
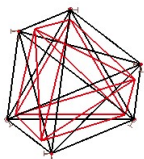


Záporné zatížení

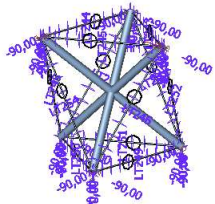
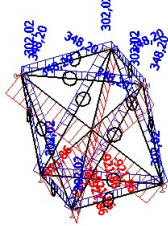
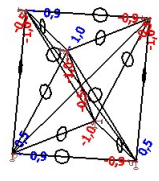
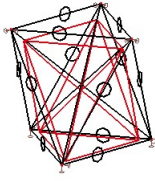
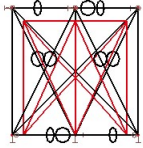
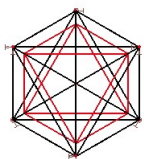


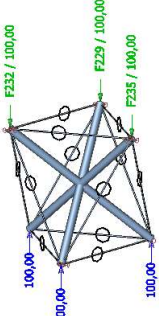
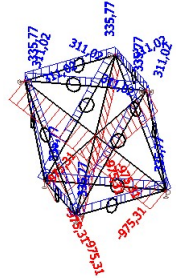
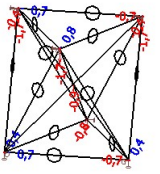
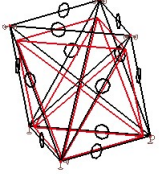
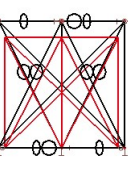
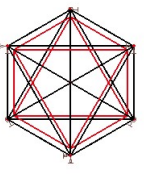
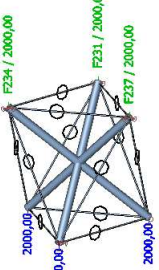
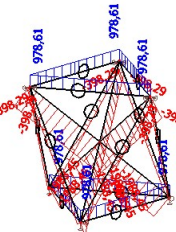
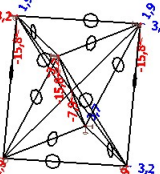
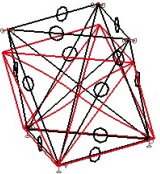
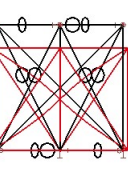
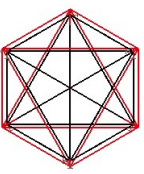
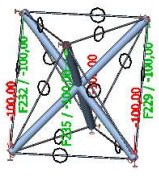
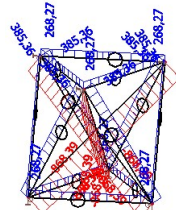
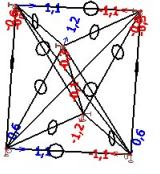
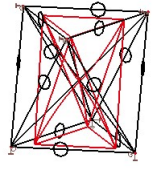
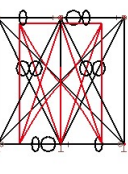
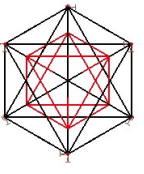
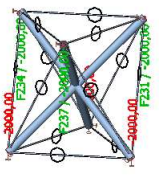
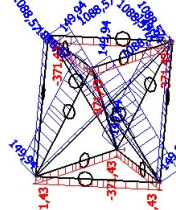
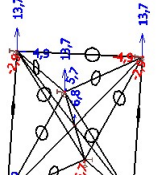
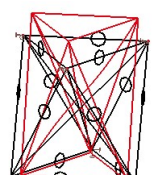
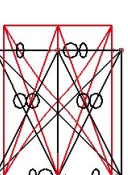
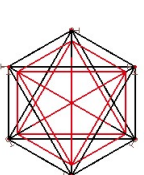
Tab. 3.9c Svislé zatížení třemi silami – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					

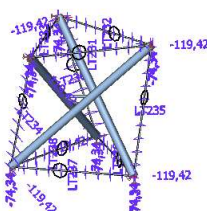
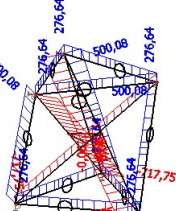
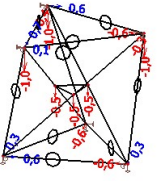
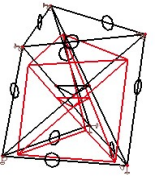
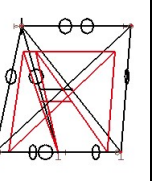
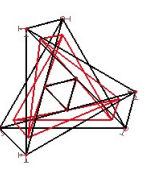
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 2000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.9d Svislé zatížení třemi silami – předpjatý antihranol

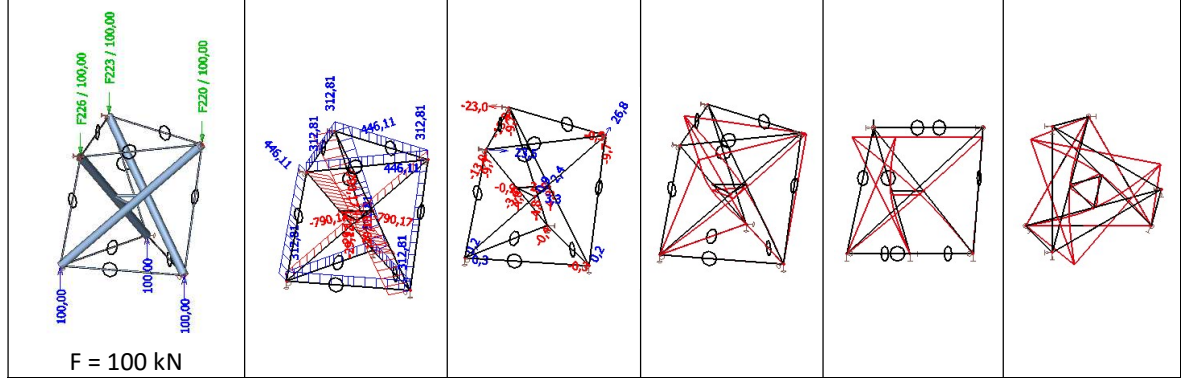
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					

Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 2000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -2000 kN</p>					

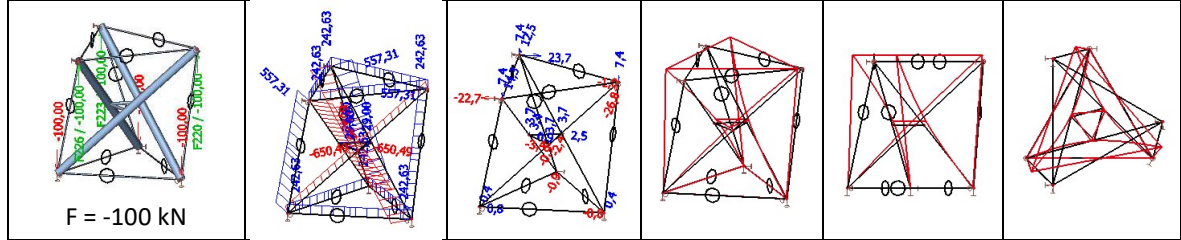
Tab. 3.9e Svislé zatížení třemi silami – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					

Kladné zatížení:

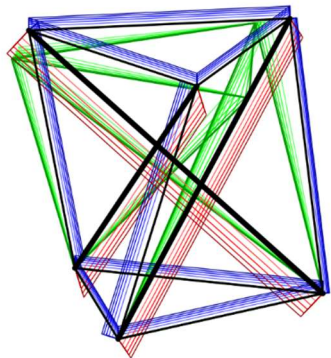


Záporné zatížení

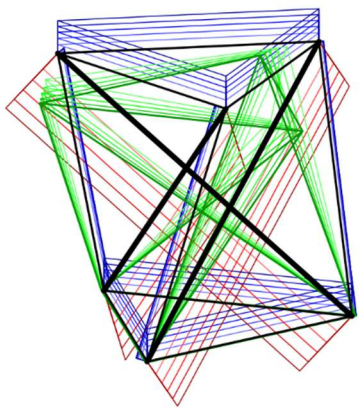


KLADNÉ ZATÍŽENÍ:

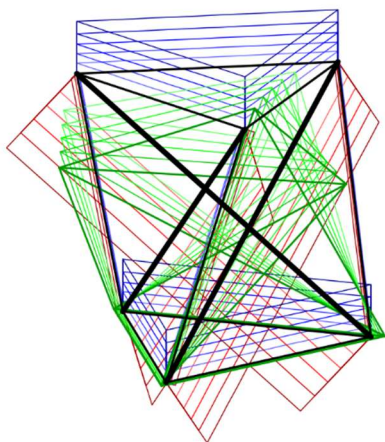
NEPŘEDPJATÝ SIMPLEX



Obr. 3.17a $F = 0-100$ kN

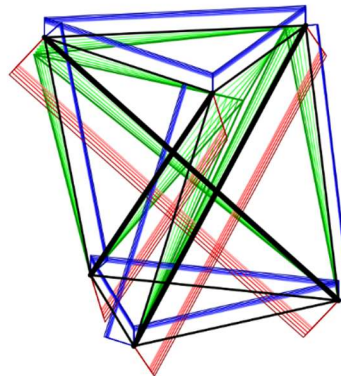


Obr. 3.17b $F = 0-8000$ kN

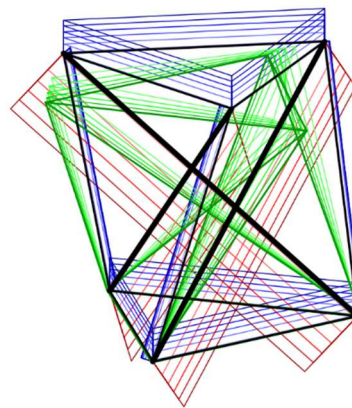


Obr. 3.17c $F = 0-40000$ kN

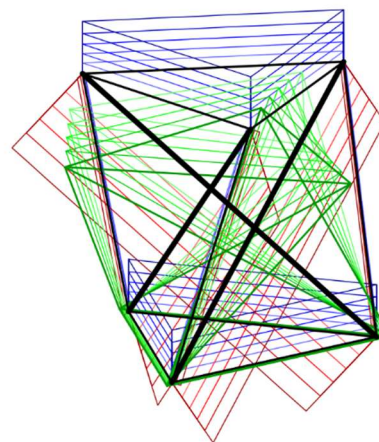
PŘEDPJATÝ SIMPLEX ($N_{ts} = 500$ kN)



Obr. 3.18a $F = 0-100$ kN



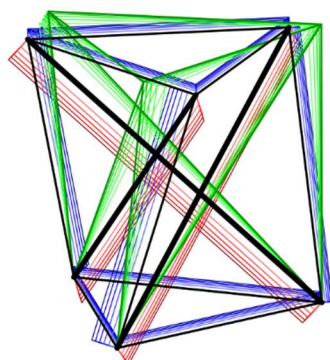
Obr. 3.18b $F = 0-8000$ kN



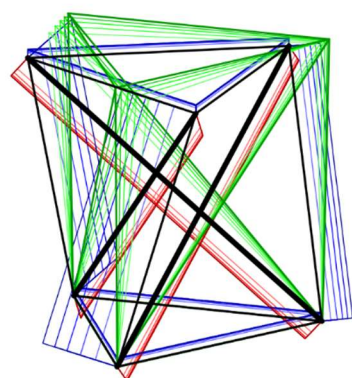
Obr. 3.18c $F = 0-40000$ kN

ZÁPORNÉ ZATÍŽENÍ:

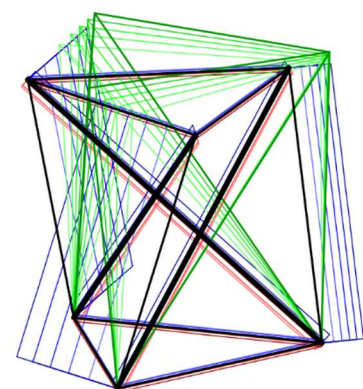
NEPŘEDPJATÝ SIMPLEX



Obr. 3.19a $F = 0-100$ kN

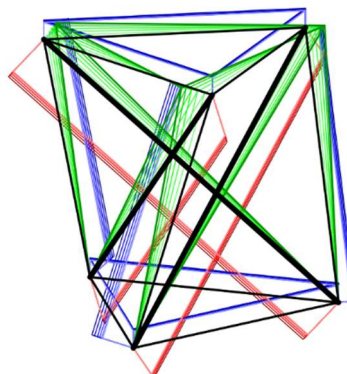


Obr. 3.19b $F = 0-8000$ kN

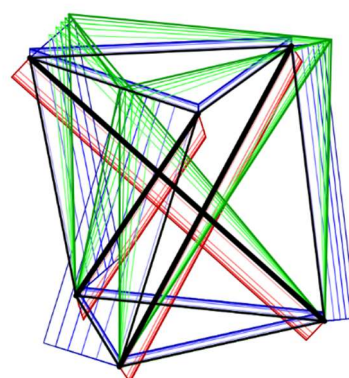


Obr. 3.19c $F = 0-40000$ kN

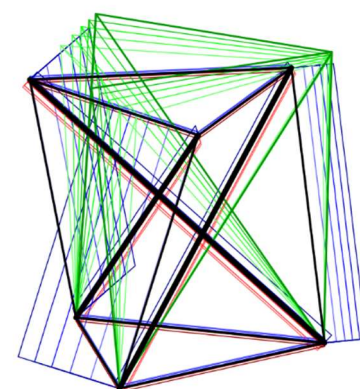
PŘEDPJATÝ SIMPLEX ($N_{ts} = 500$ kN)



Obr. 3.20a $F = 0-100$ kN



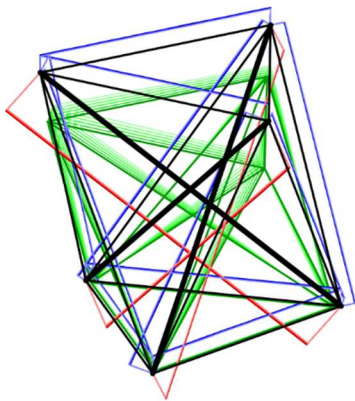
Obr. 3.20b $F = 0-8000$ kN



Obr. 3.20c $F = 0-40000$ kN

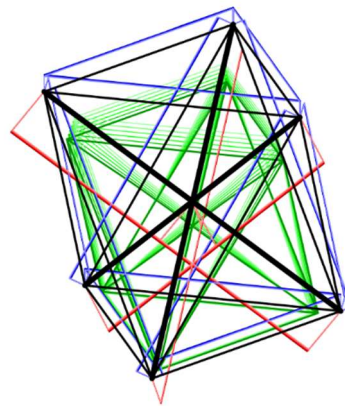
KLADNÉ ZATÍŽENÍ:

ZTUŽUJÍCÍ TÁHLA

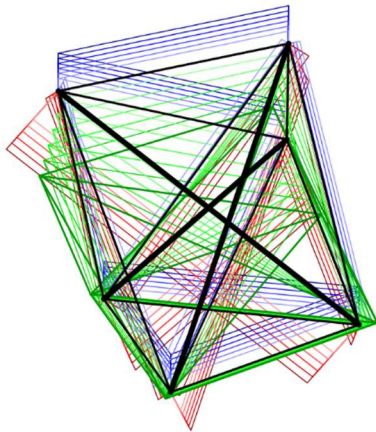


Obr. 3.21a $F = 0-100$ kN

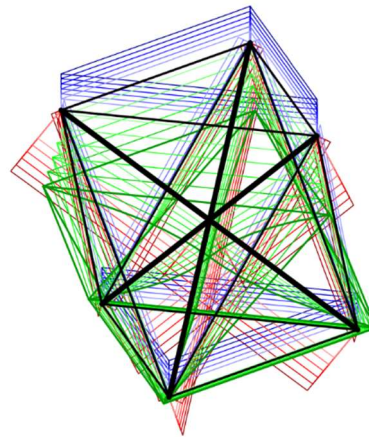
ANTIHRANOL



Obr. 3.22a $F = 0-100$ kN

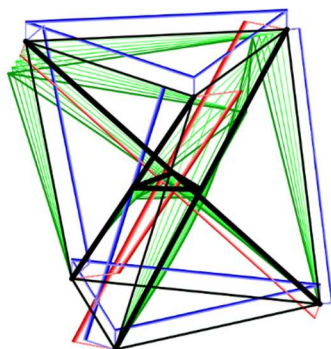


Obr. 3.21b $F = 0-2000$ kN



Obr. 3.22b $F = 0-2000$ kN

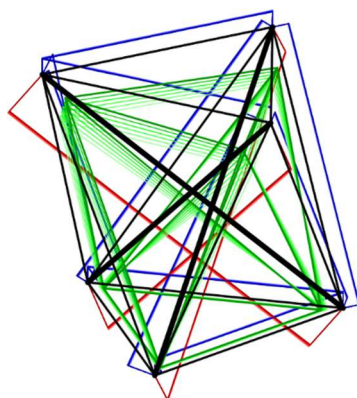
ZTUŽUJÍCÍ TROJÚHELNÍK



Obr. 3.23 $F = 0-100$ kN

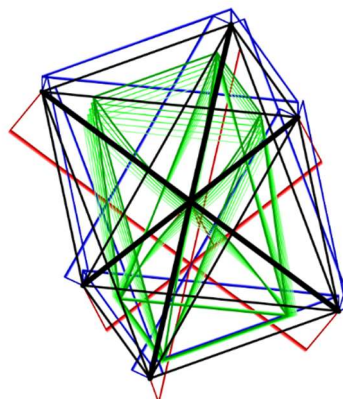
ZÁPORNÉ ZATÍŽENÍ:

ZTUŽUJÍCÍ TÁHLA

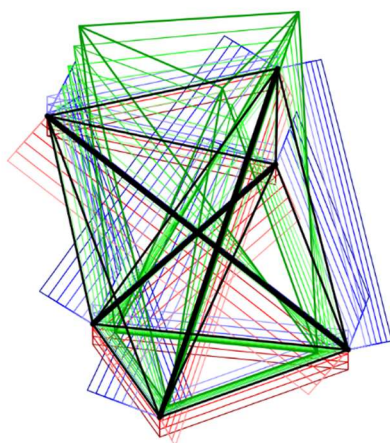


Obr. 3.24a $F = 0-100$ kN

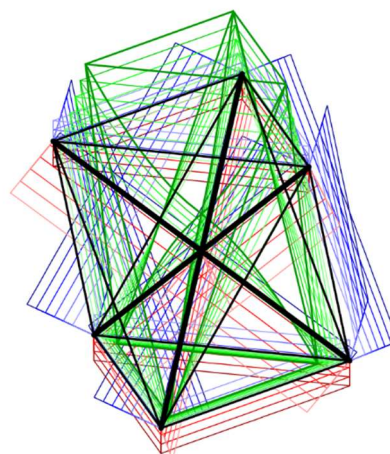
ANTIHRANOL



Obr. 3.25a $F = 0-100$ kN

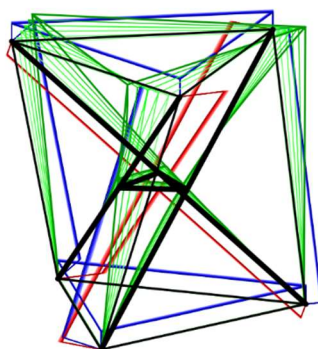


Obr. 3.24b $F = 0-2000$ kN



Obr. 3.25b $F = 0-2000$ kN

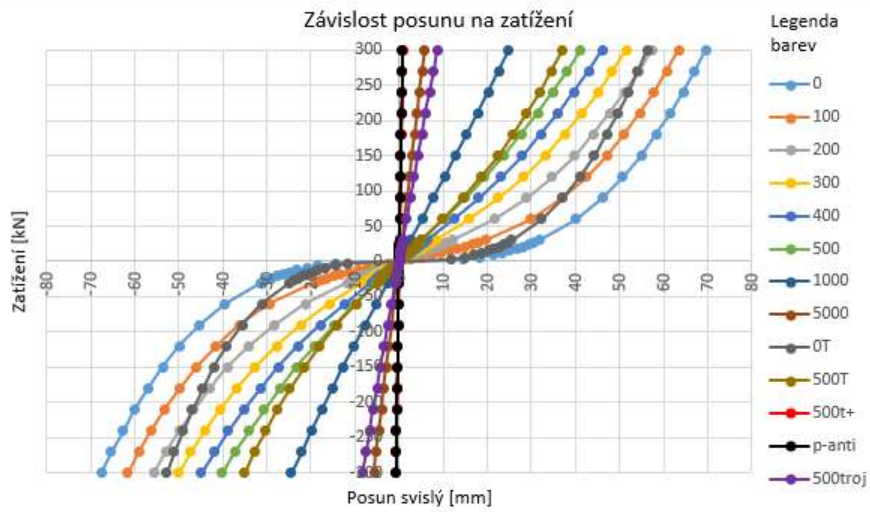
ZTUŽUJÍCÍ TROJÚHELNÍK



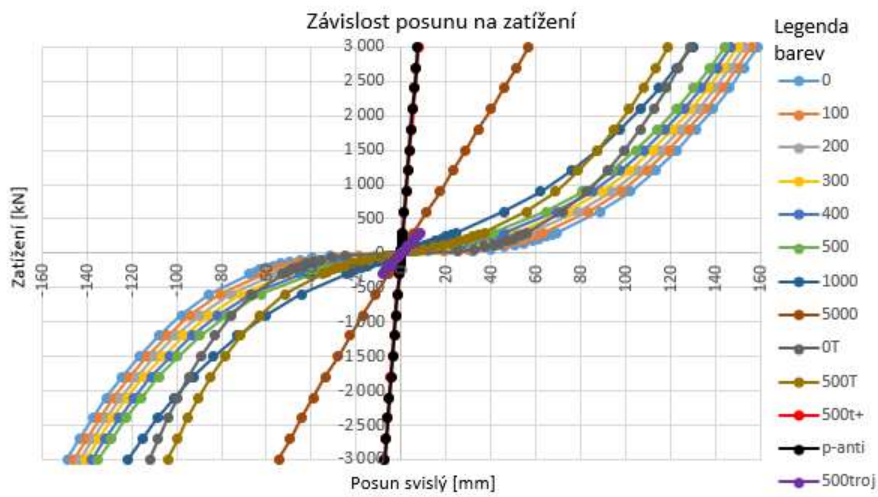
Obr. 3.26 $F = 0-100$ kN

Svislý posun (svislé smrštění):

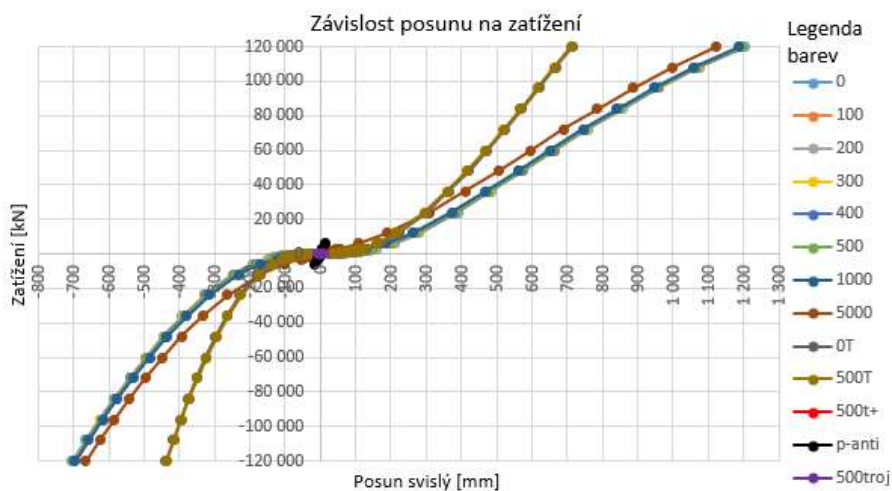
Hodnoty zatížení v grafech jsou 3F. Jedná se o celkové zatížení.



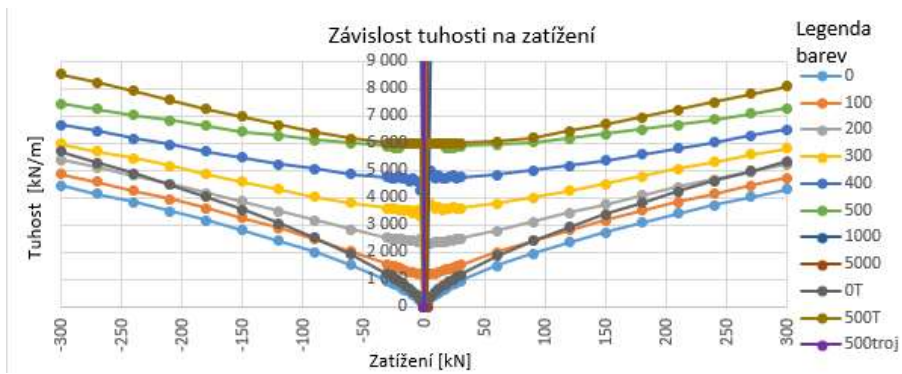
Obr. 3.27a Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100$ kN)



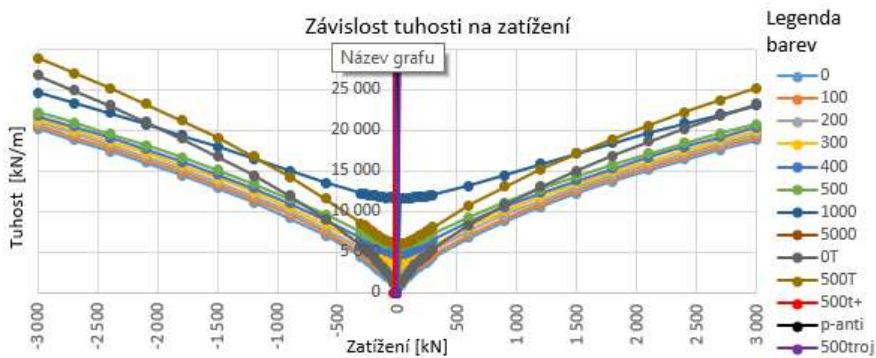
Obr. 3.27b Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000$ kN)



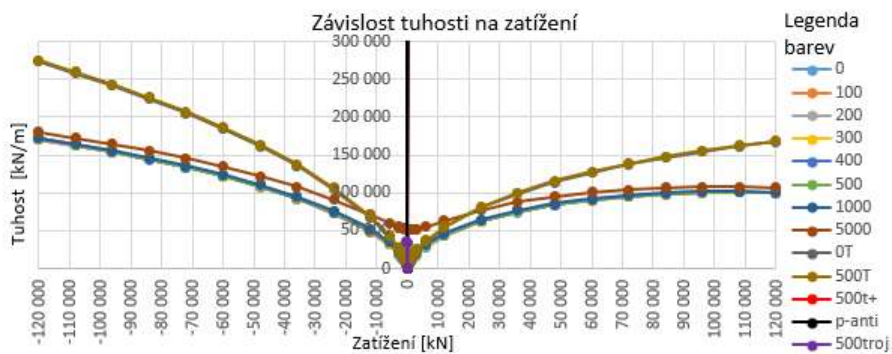
Obr. 3.27c Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000$ kN)



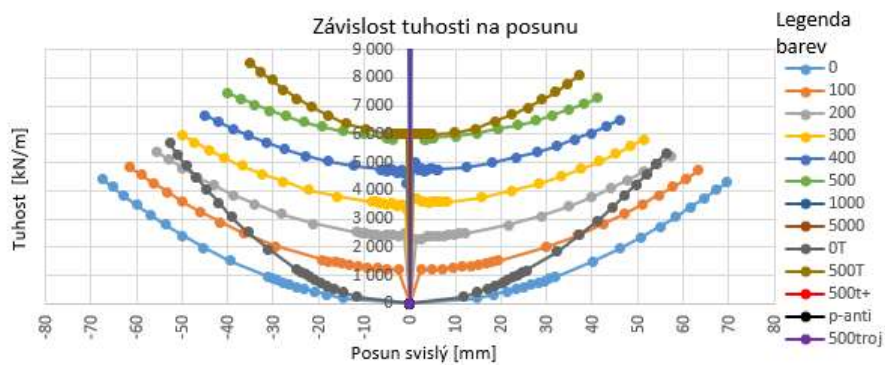
Obr. 3.28a Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



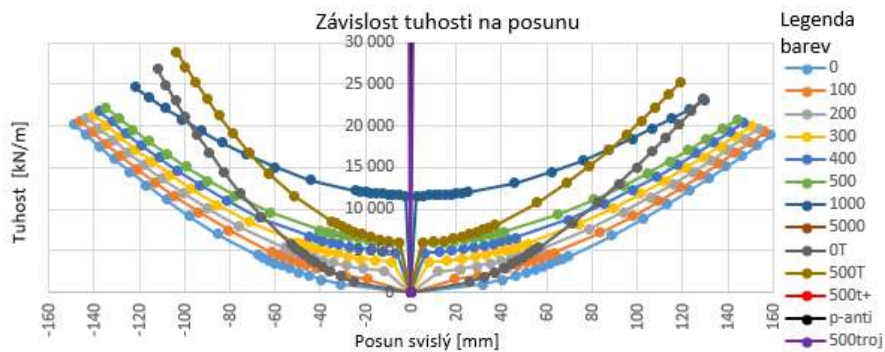
Obr. 3.28b Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



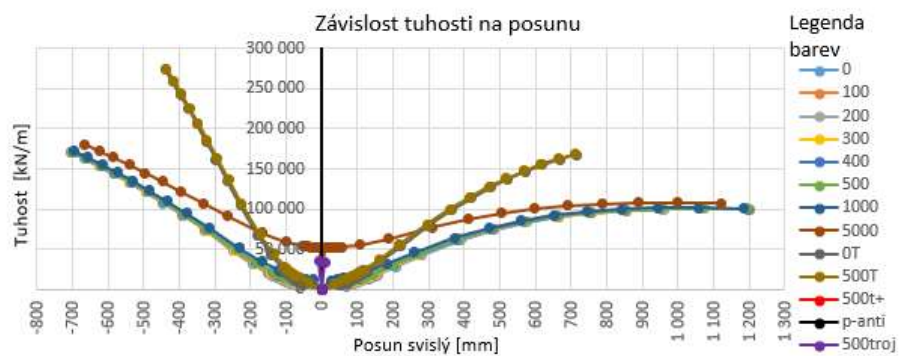
Obr. 3.28c Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



Obr. 3.29a Závislost svislé tuhosti na posunu ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



Obr. 3.29b Závislost svislé tuhosti na posunu ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



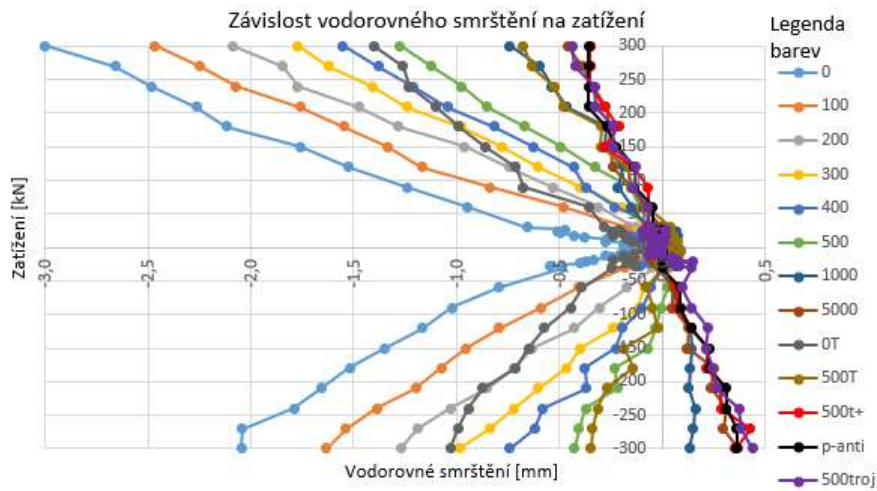
Obr. 3.29c Závislost svislé tuhosti na posunu ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)

Vodorovný posun (zkosení):

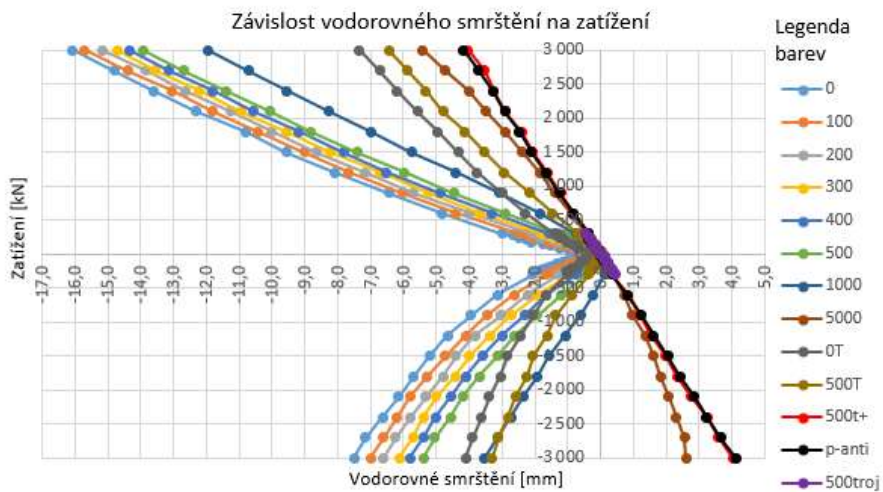
U tohoto zatížení je tato deformace nulová.

Kostrbatost následujícího grafu je způsobena zaokrouhlením malých deformací na desetiný milimetru.

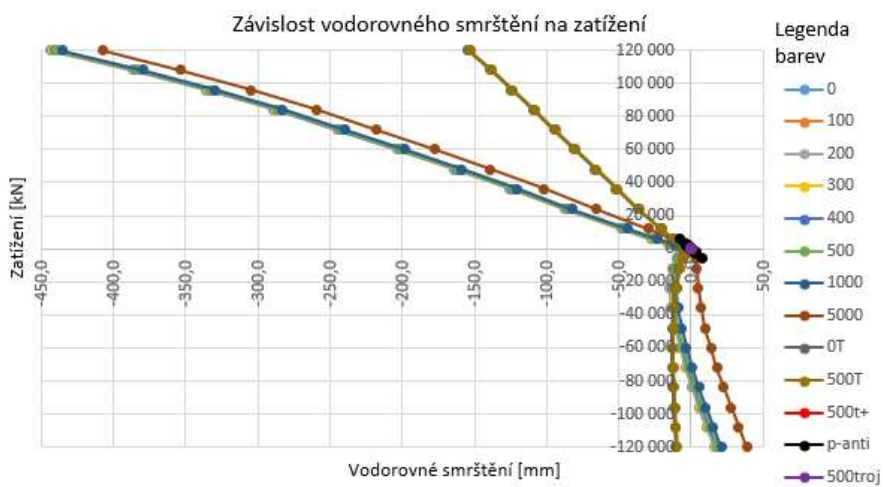
Vodorovné smrštění (zkrácení horního vodorovného táhla):



Obr. 3.30a Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100$ kN)

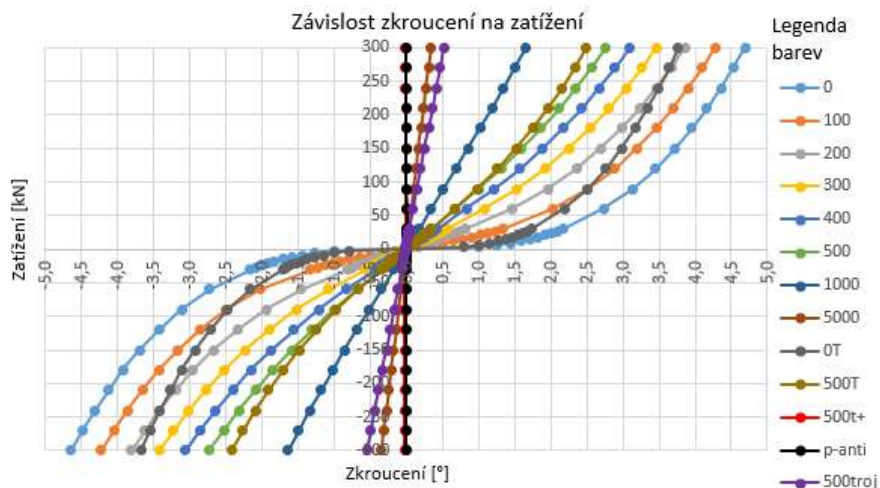


Obr. 3.30b Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000$ kN)

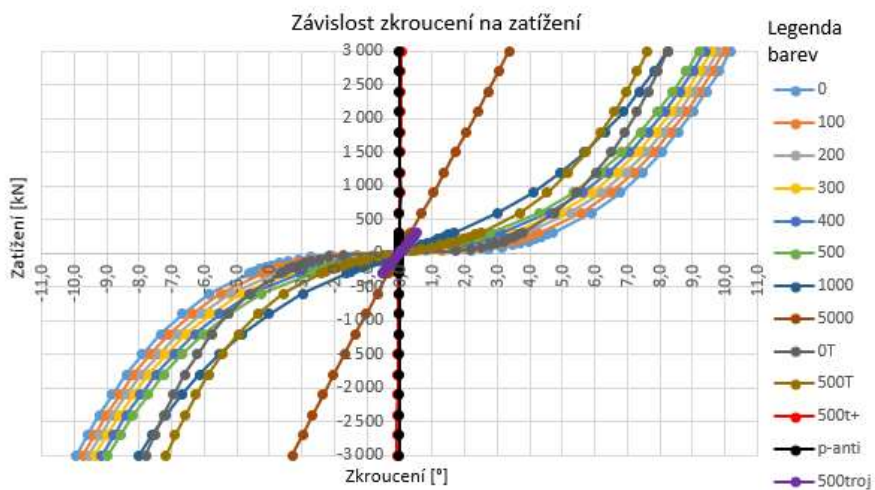


Obr. 3.30c Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000$ kN)

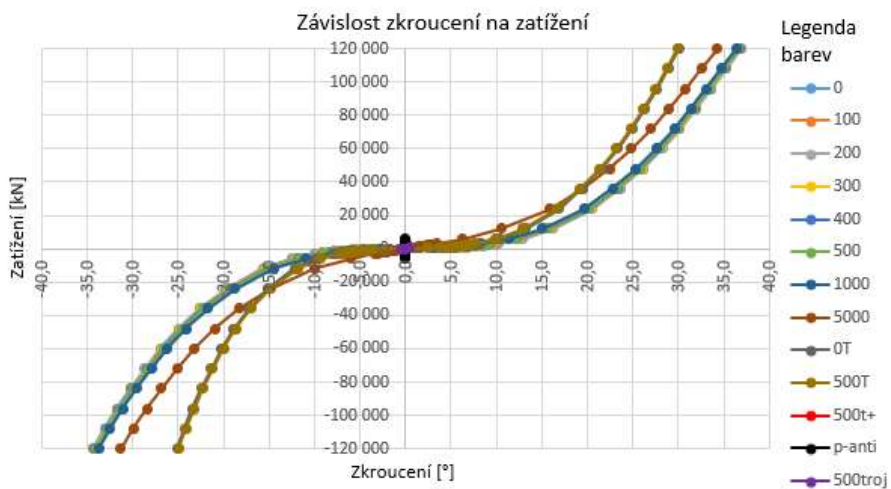
Vzájemné pootočení podstav (zkroucení):



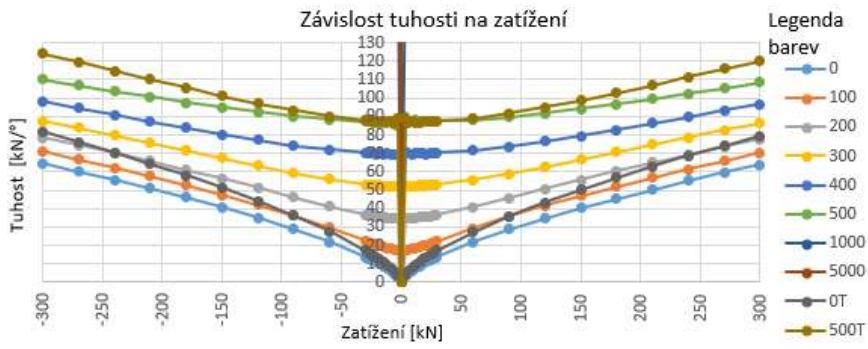
Obr. 3.31a Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



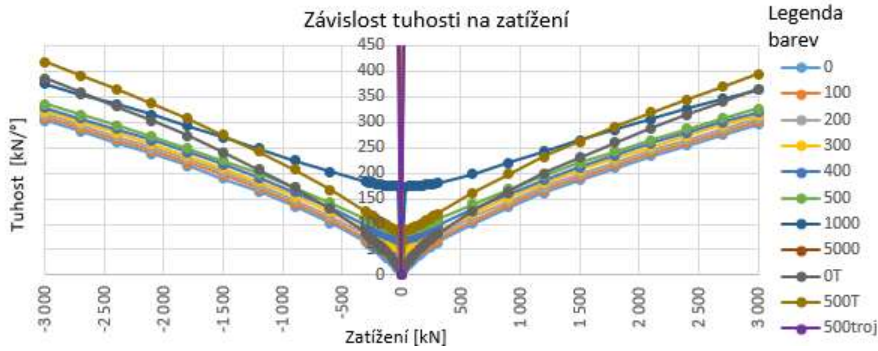
Obr. 3.31b Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



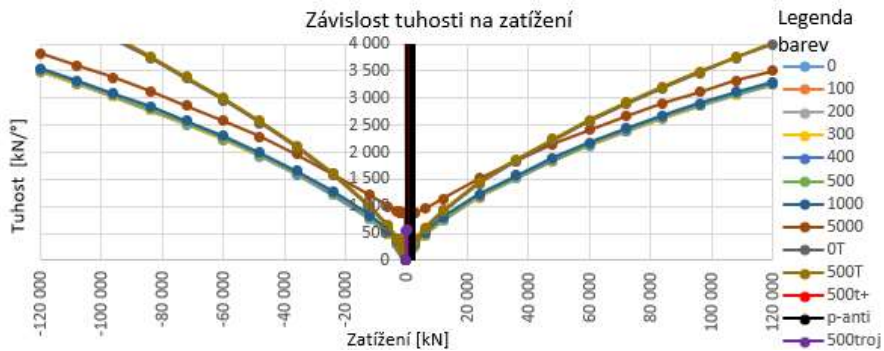
Obr. 3.31c Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



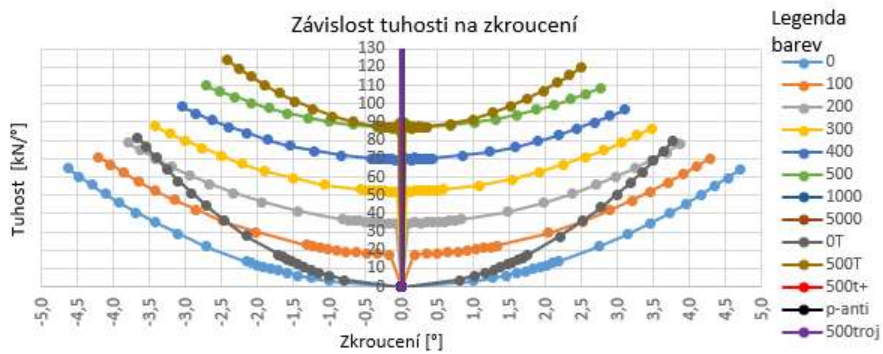
Obr. 3.32a Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



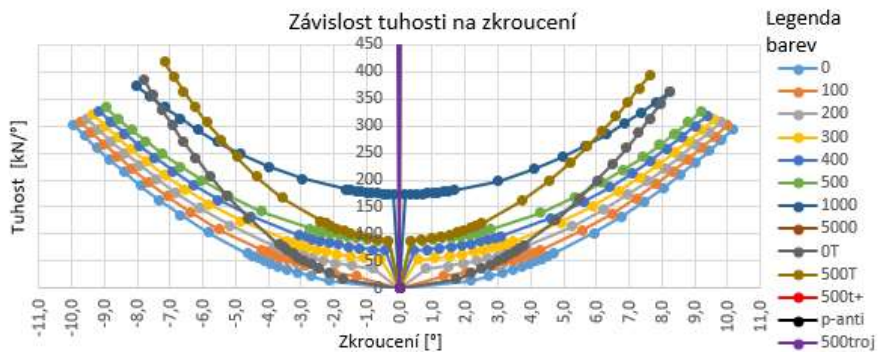
Obr. 3.32b Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



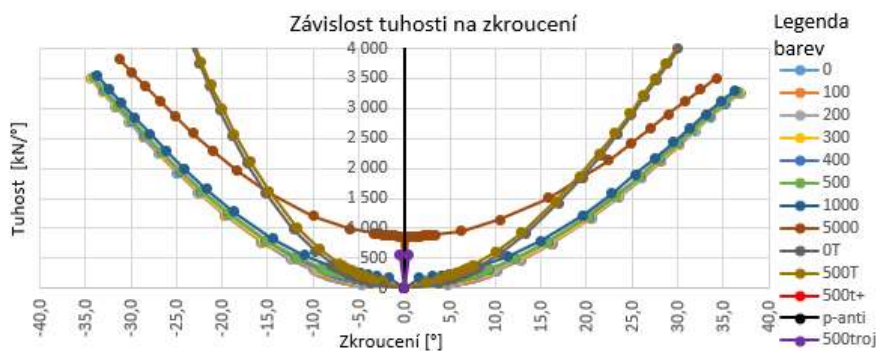
Obr. 3.32c Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



Obr. 3.33a Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)

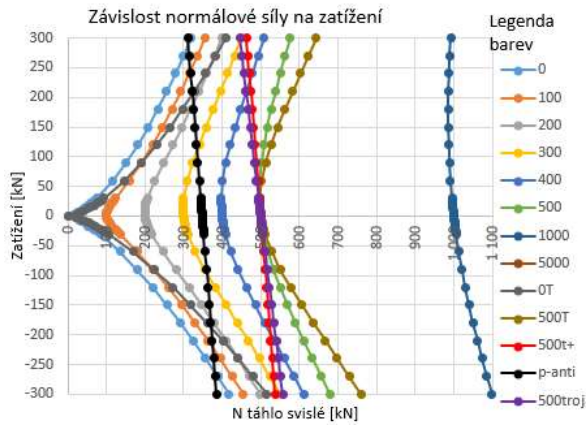


Obr. 3.33b Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

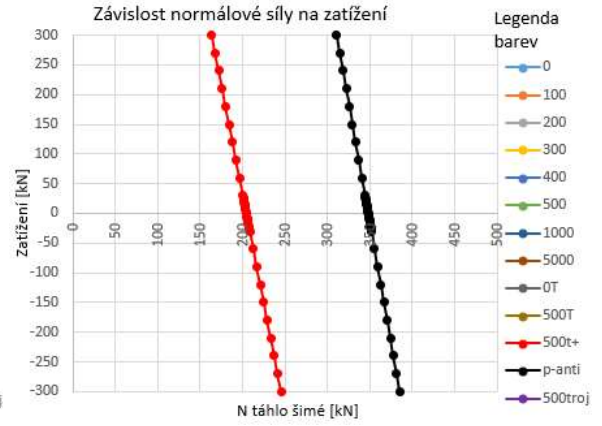


Obr. 3.33c Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)

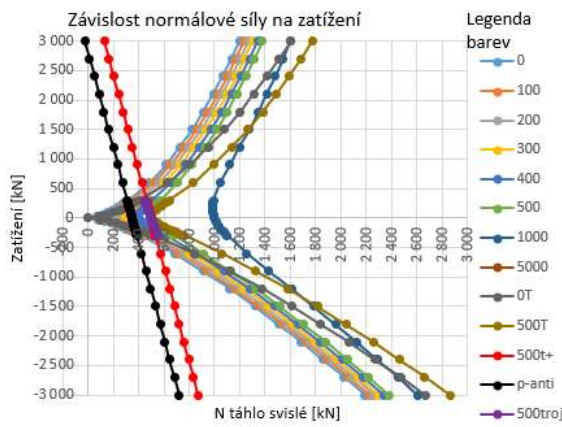
Normálové síly:



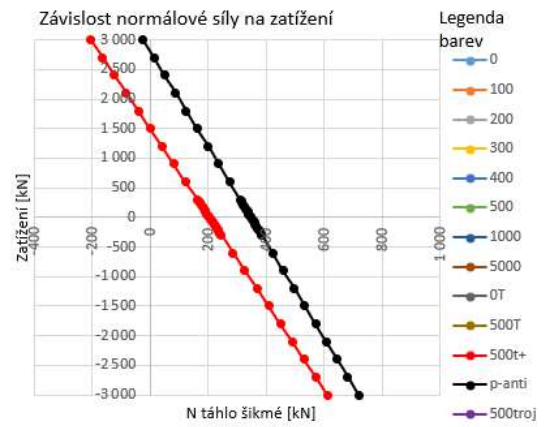
Obr. 3.34a N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



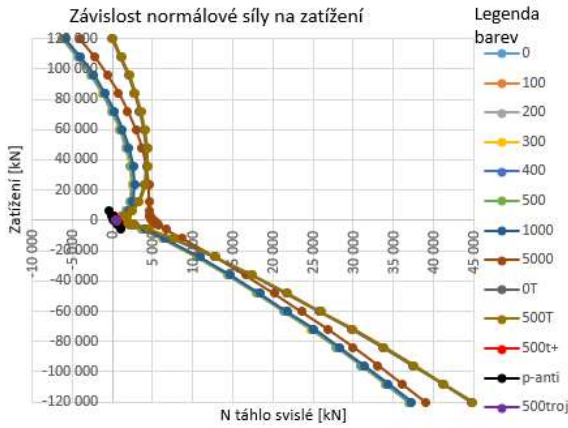
Obr. 3.35a $N_{T\tilde{s}}$ ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



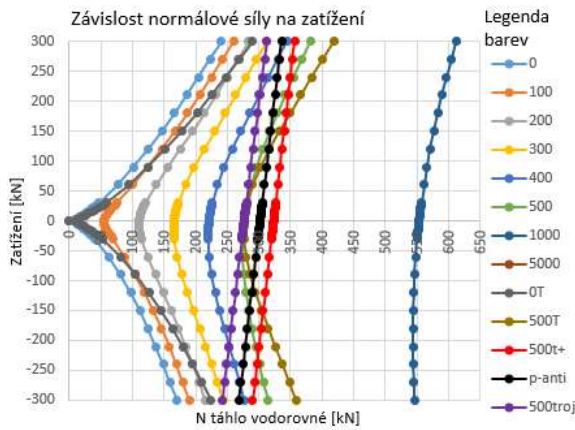
Obr. 3.34b N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



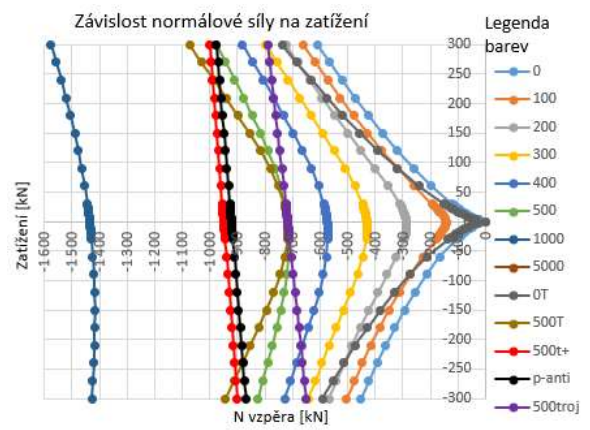
Obr. 3.35b $N_{T\tilde{s}}$ ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



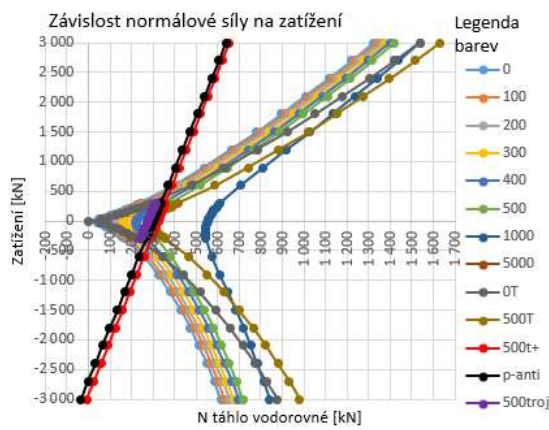
Obr. 3.34c N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



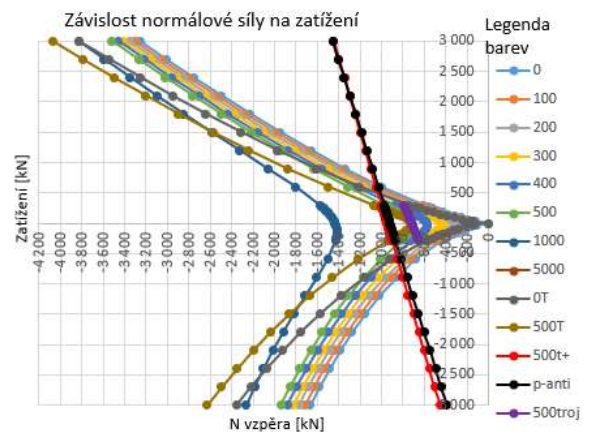
Obr. 3.36a N_{TV} ($|F_{max/min}| = 100$ kN)



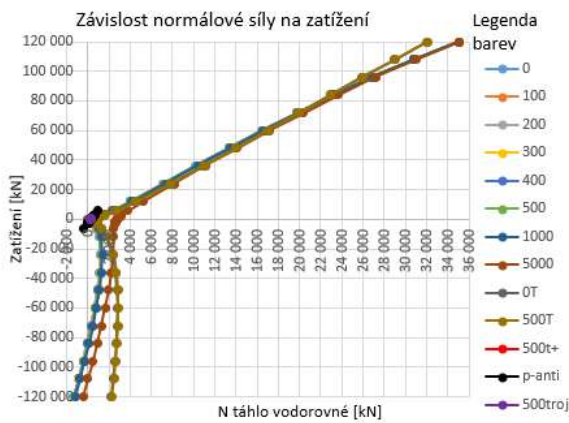
Obr. 3.37a N_V ($|F_{max/min}| = 100$ kN)



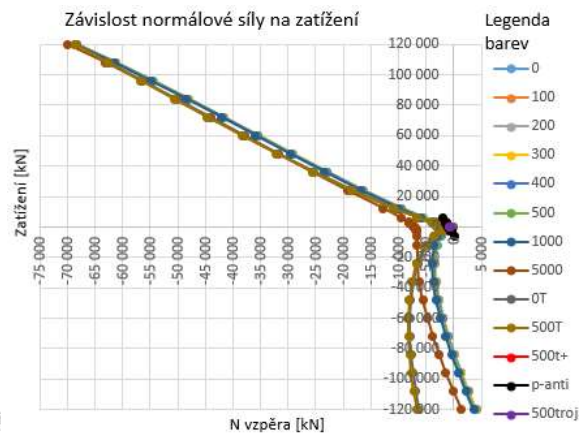
Obr. 3.36b N_{TV} ($|F_{max/min}| = 1000$ kN)



Obr. 3.37b N_V ($|F_{max/min}| = 1000$ kN)

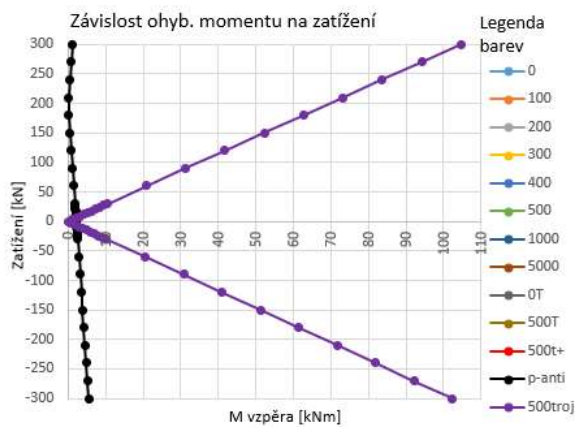


Obr. 3.36c N_{TV} ($|F_{max/min}| = 40000$ kN)

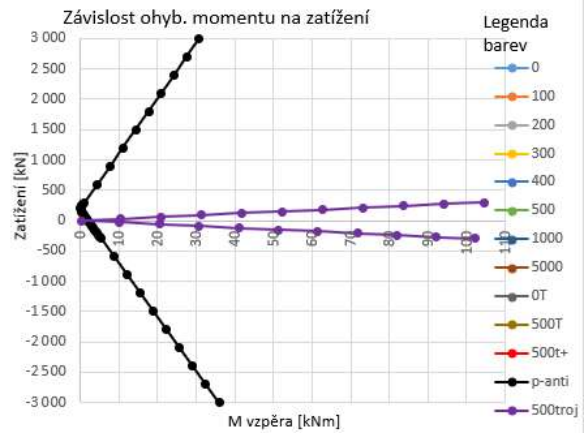


Obr. 3.37c N_V ($|F_{max/min}| = 40000$ kN)

Ohybové momenty ve vzpěrách:



Obr. 3.38a M_v ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



Obr. 3.38b M_v ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

3.2.3.2 Kroucení trojicí sil

Viz model DIP 002-02-02cd a následující tabulky, obrázky a grafy.

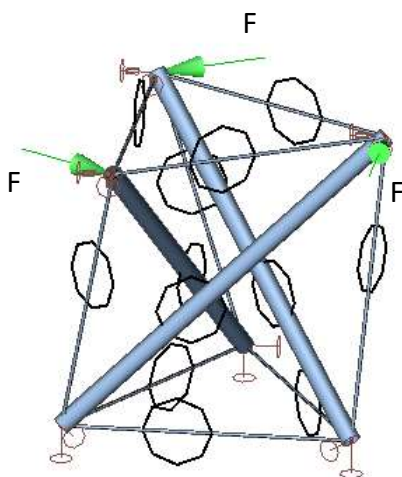
U tohoto zatížení nedochází ke globální ztrátě stability a dokonce ani k vymizení tahu v táhlech. Ke ztrátě stability tedy dojde při vybočení vzpěr.

Bez ohledu na to, zda je zatížení kladné, nebo záporné, vzniknou u nepředpjatého simplexu tahové síly v táhlech a tlakové síly ve vzpěrách (stejně jako u svislého zatížení).

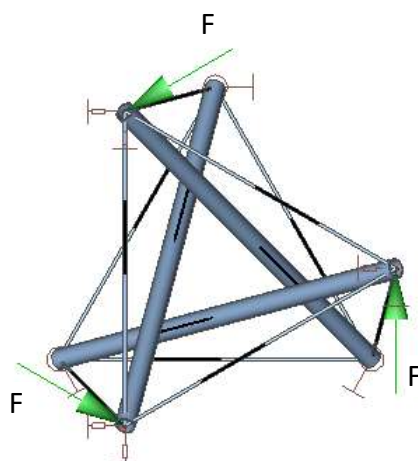
Při kladném zatížení se simplex ve svislém směru stlačí a zkroutí se ve směru pootočení horní podstavy (stejně jako u svislého zatížení).

Při záporném zatížení se simplex ve svislém směru protáhne a zkroutí se v protisměru pootočení horní podstavy (stejně jako u svislého zatížení).

Ke zkosení simplexu (k vodorovnému posunu) u tohoto zatížení nedochází (stejně jako u svislého zatížení).



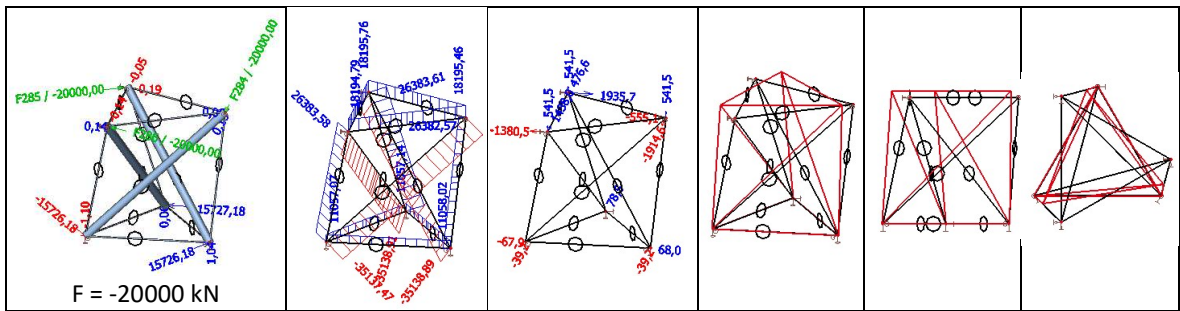
Obr. 3.39a Schéma zatížení – axonometrie



Obr. 3.39b Schéma zatížení – pohled shora

Tab. 3.10a Kroucení trojicí sil - nepředpjatý simplex

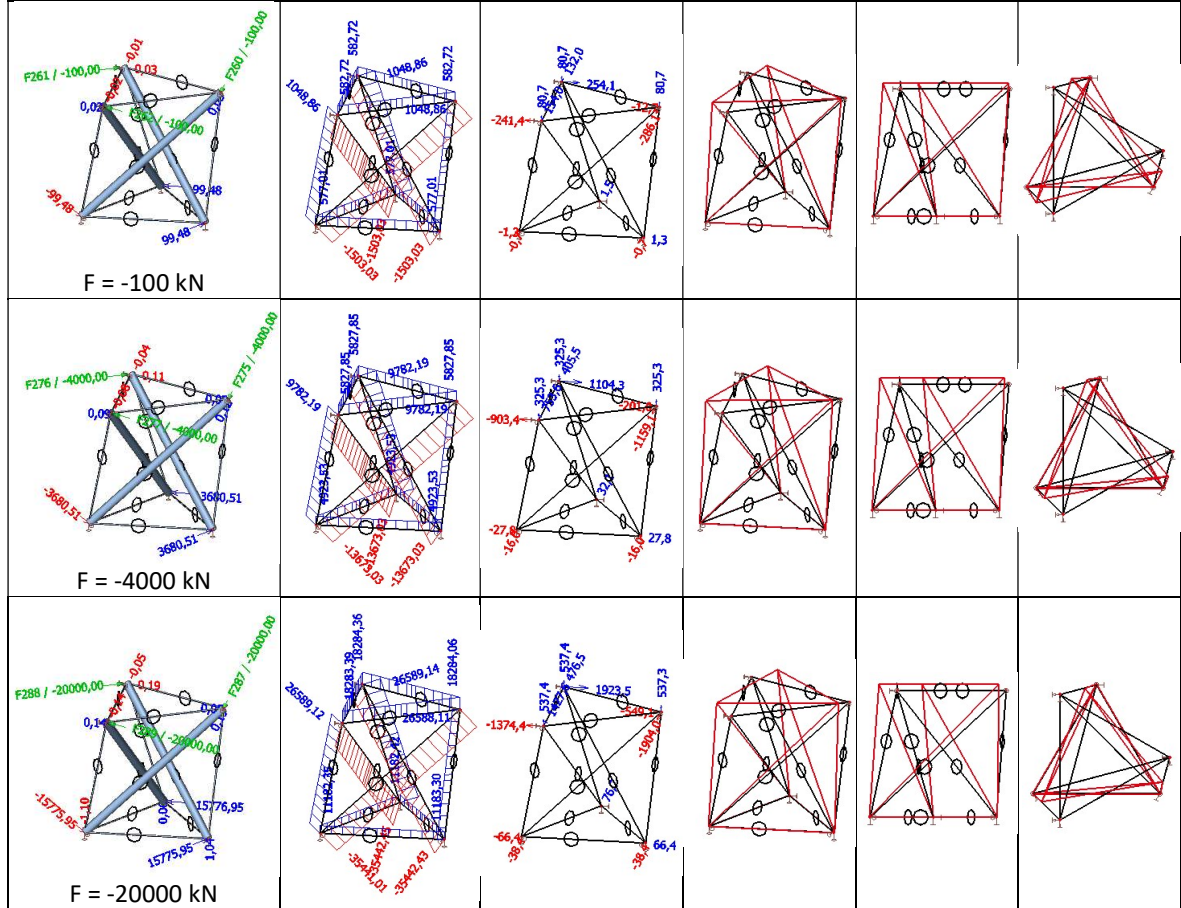
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 4000 kN</p>					
<p>F = 20000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -4000 kN</p>					



Tab. 3.10b Kroucení trojicí sil - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 4000 kN</p>					
<p>F = 20000 kN</p>					

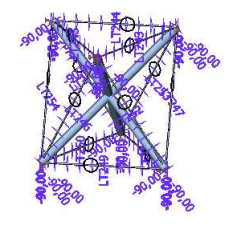
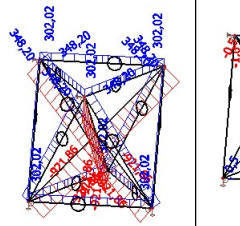
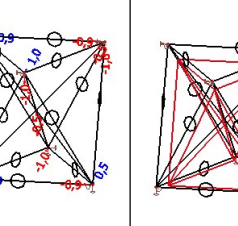
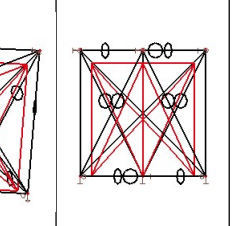
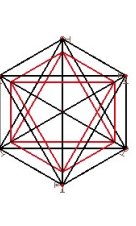

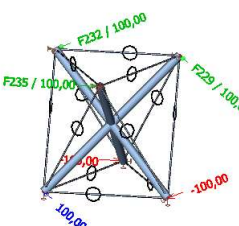
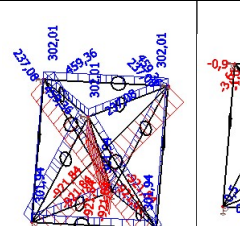
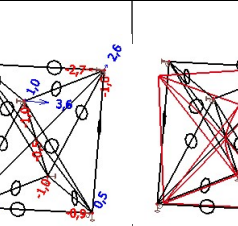
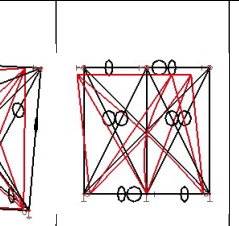
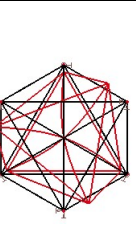

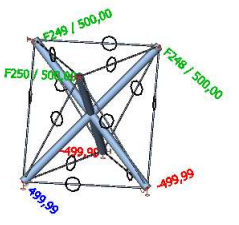
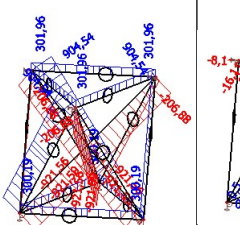
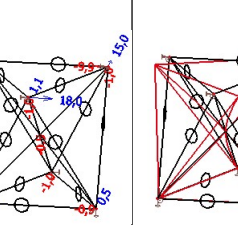
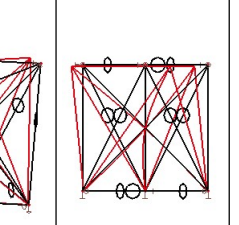
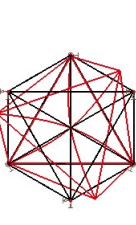

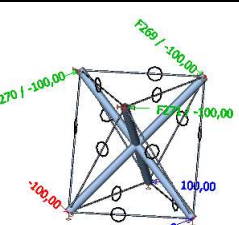
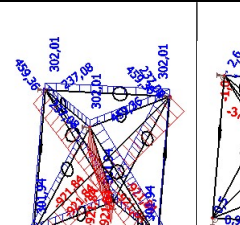
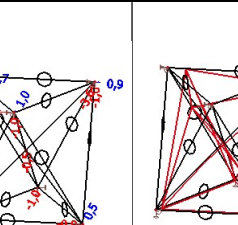
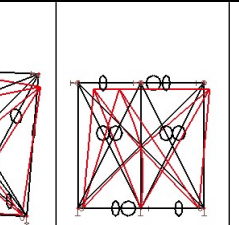
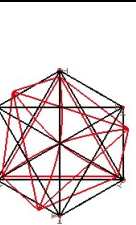

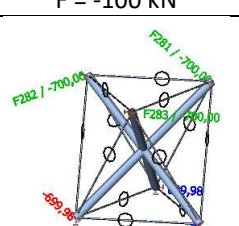
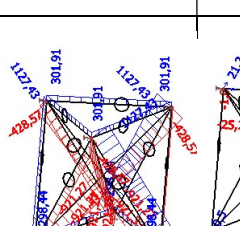
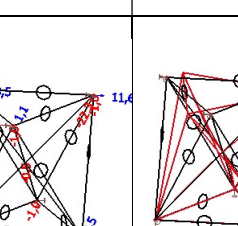
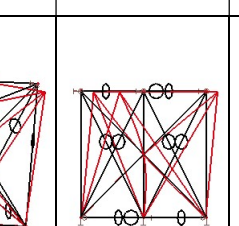


Záporné zatížení



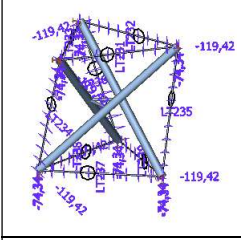
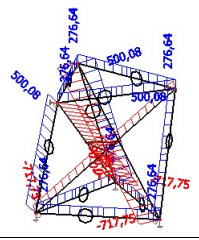
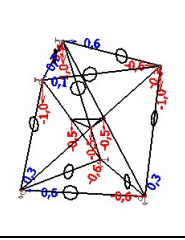
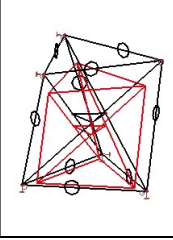
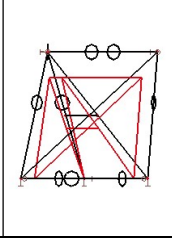
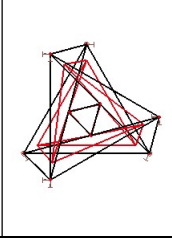
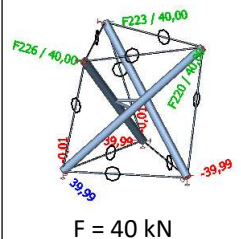
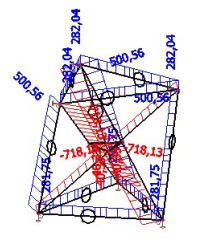
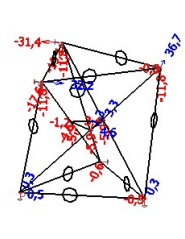
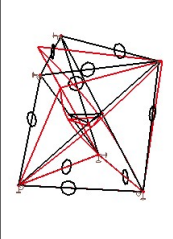
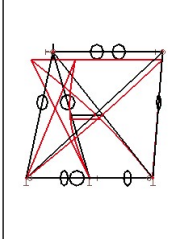
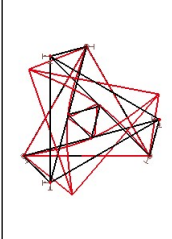
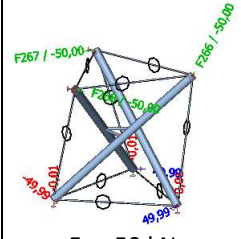
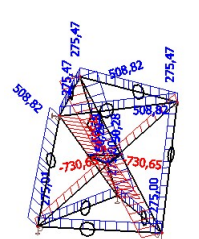
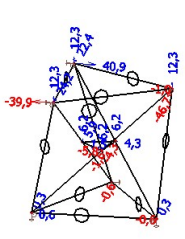
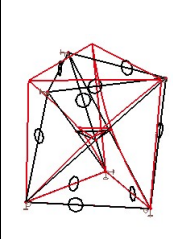
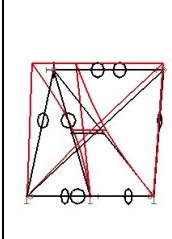
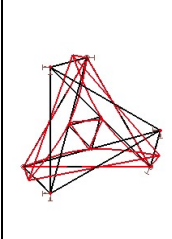
Tab. 3.10c Kroucení trojicí sil – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 500 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -700 kN</p>					

Tab. 3.10d Kroucení trojicí sil – předpjatý antihranol

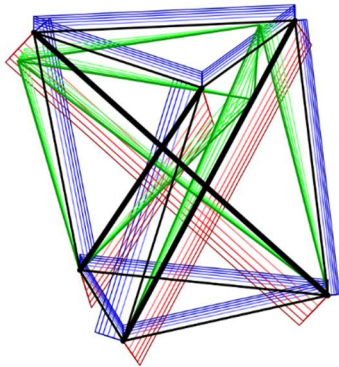
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 500 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -700 kN</p>					

Tab. 3.10e Kroucení trojicí sil – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

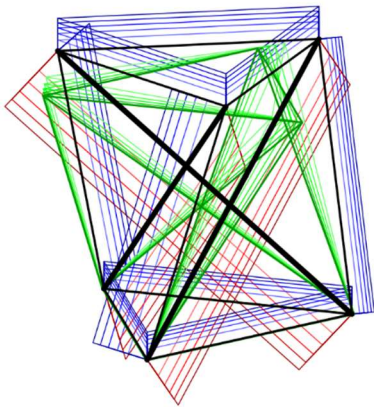
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 40 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -50 kN</p>					

KLADNÉ ZATÍŽENÍ:

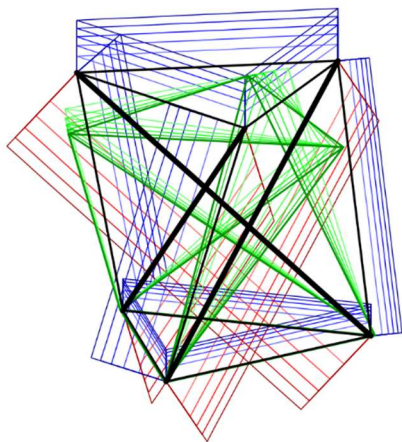
NEPŘEDPJATÝ SIMPLEX



Obr. 3.40a $F = 0-100$ kN

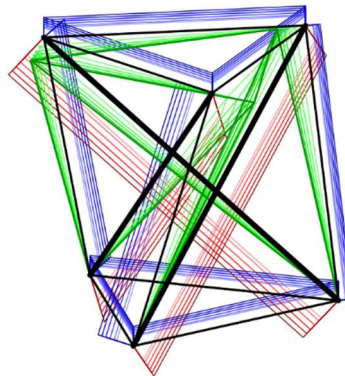


Obr. 3.40b $F = 0-4000$ kN

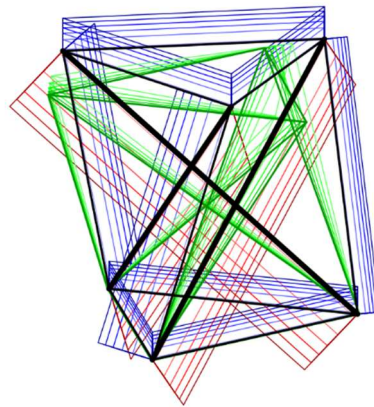


Obr. 3.40c $F = 0-20000$ kN

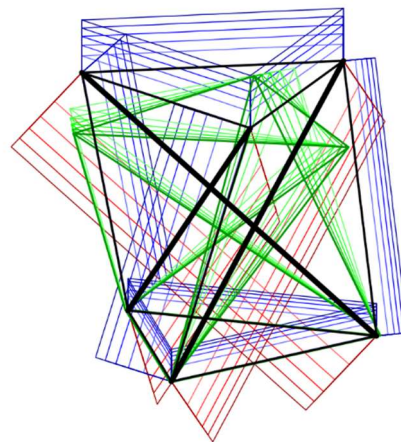
PŘEDPJATÝ SIMPLEX ($N_{ts} = 500$ kN)



Obr. 3.41a $F = 0-100$ kN



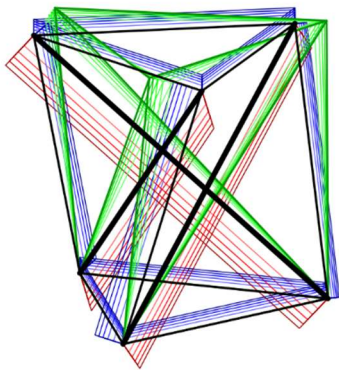
Obr. 3.41b $F = 0-4000$ kN



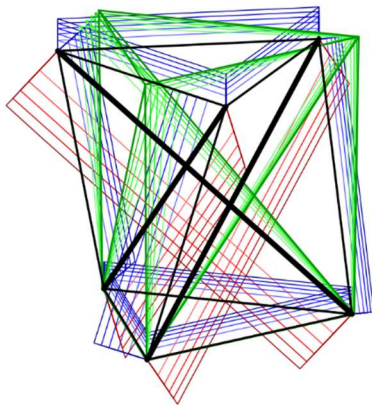
Obr. 3.41c $F = 0-20000$ kN

ZÁPORNÉ ZATÍŽENÍ:

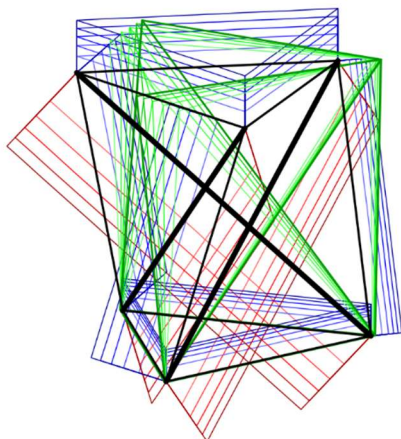
NEPŘEDPJATÝ SIMPLEX



Obr. 3.42a $F = 0-100$ kN

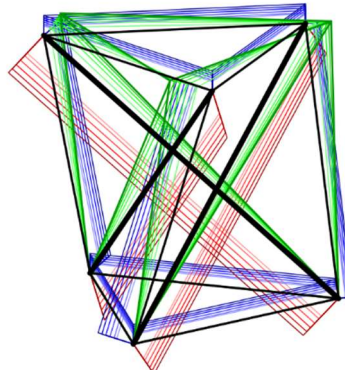


Obr. 3.42b $F = 0-4000$ kN

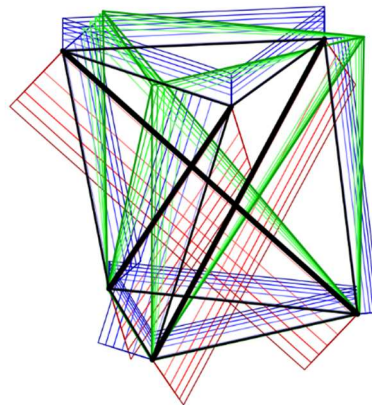


Obr. 3.42c $F = 0-20000$ kN

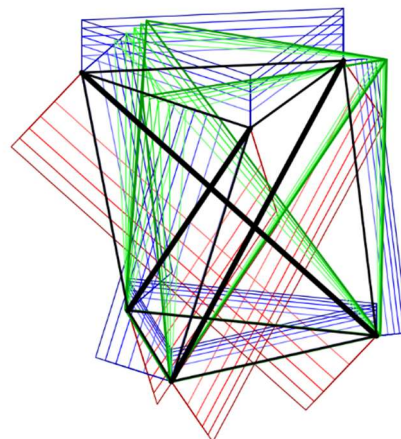
PŘEDPJATÝ SIMPLEX ($N_{ts} = 500$ kN)



Obr. 3.43a $F = 0-100$ kN



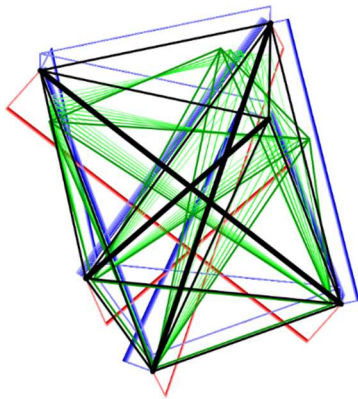
Obr. 3.43b $F = 0-4000$ kN



Obr. 3.43c $F = 0-20000$ kN

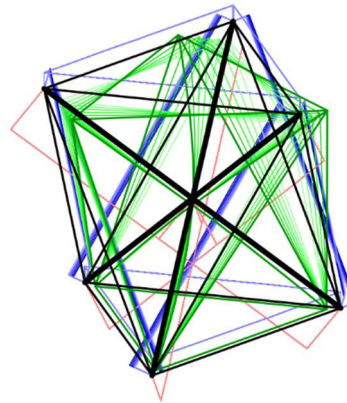
KLADNÉ ZATÍŽENÍ:

ZTUŽUJÍCÍ TÁHLA

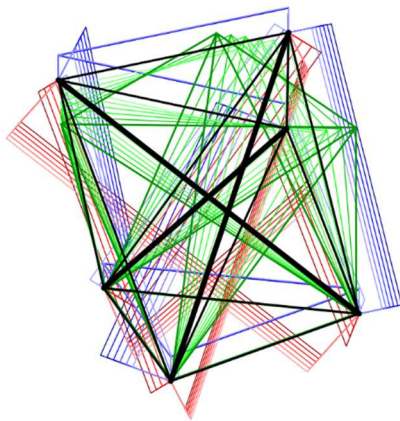


Obr. 3.44a $F = 0-100$ kN

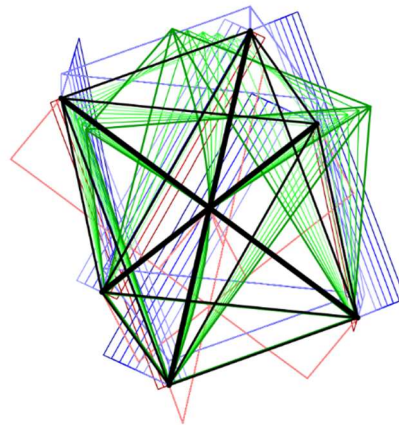
ANTIHRANOL



Obr. 3.45a $F = 0-100$ kN

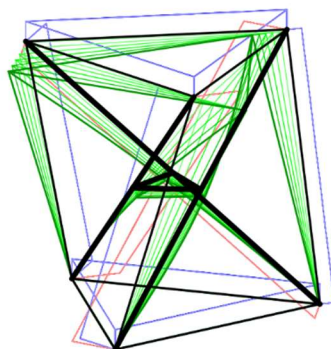


Obr. 3.44b $F = 0-500$ kN



Obr. 3.45b $F = 0-500$ kN

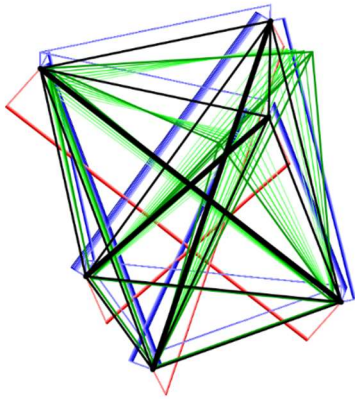
ZTUŽUJÍCÍ TROJÚHELNÍK



Obr. 3.46 $F = 0-40$ kN

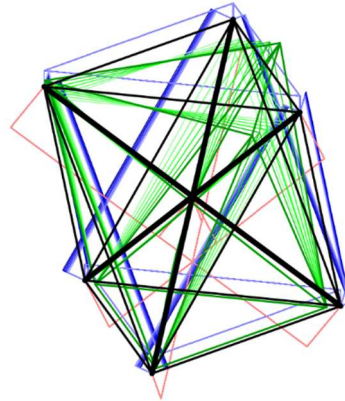
ZÁPORNÉ ZATÍŽENÍ:

ZTUŽUJÍCÍ TÁHLA

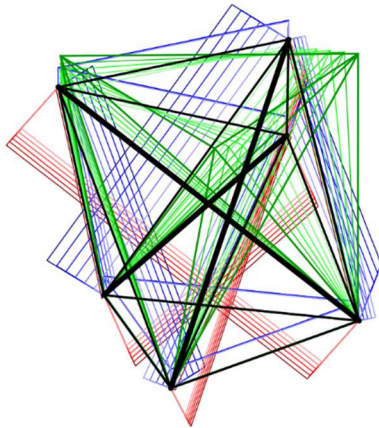


Obr. 3.47a $F = 0-100$ kN

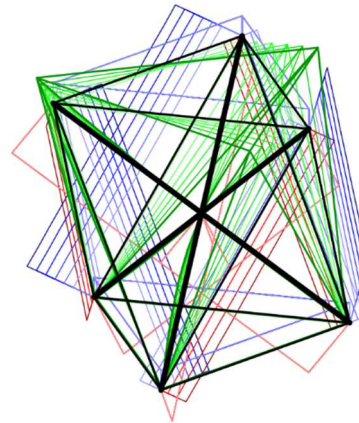
ANTIHRANOL



Obr. 3.48a $F = 0-100$ kN

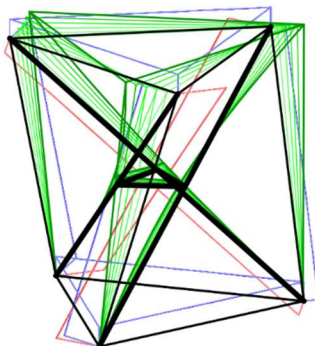


Obr. 3.47b $F = 0-700$ kN



Obr. 3.48b $F = 0-700$ kN

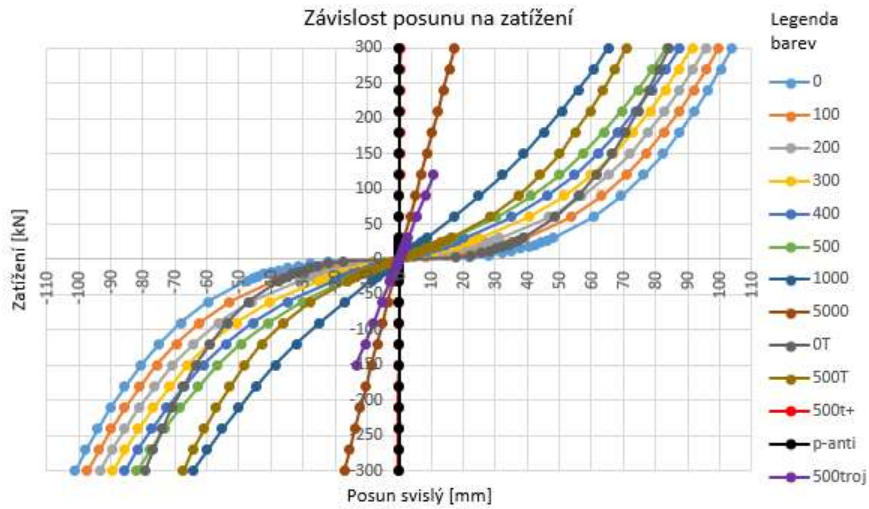
ZTUŽUJÍCÍ TROJÚHELNÍK



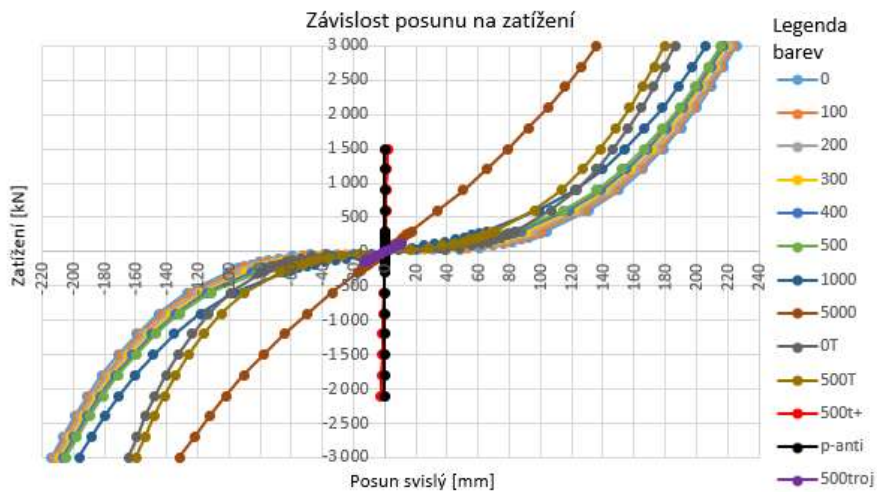
Obr. 3.49 $F = 0-50$ kN

Svislý posun (svislé smrštění):

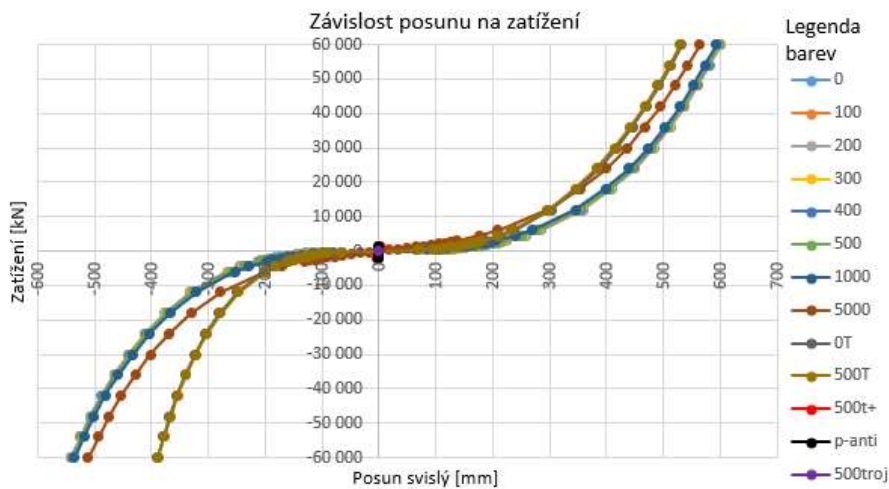
Hodnoty zatížení v grafech jsou 3F. Jedná se o celkové zatížení.



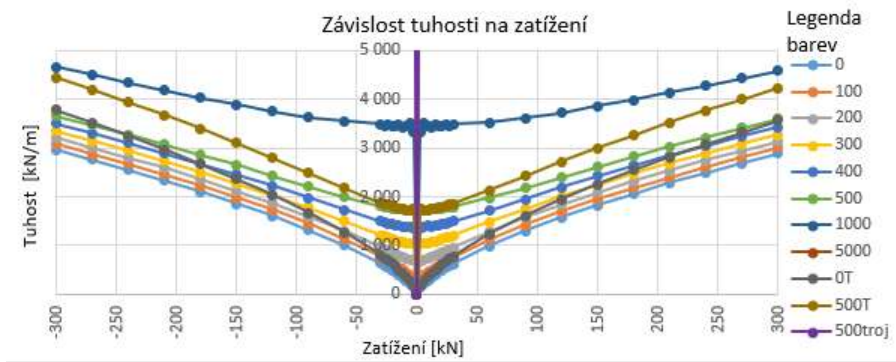
Obr. 3.50a Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100$ kN)



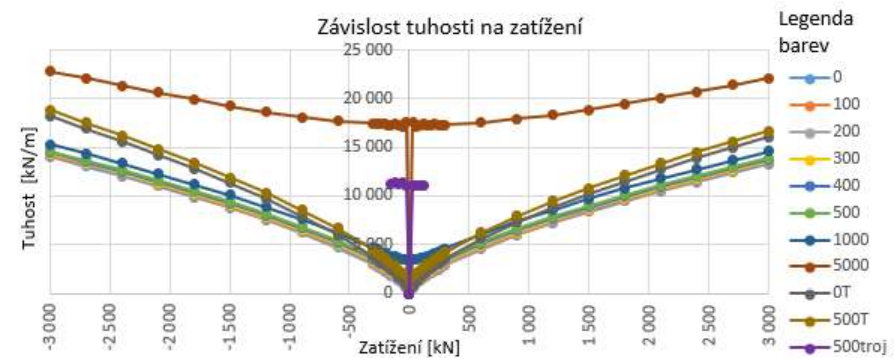
Obr. 3.50b Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000$ kN)



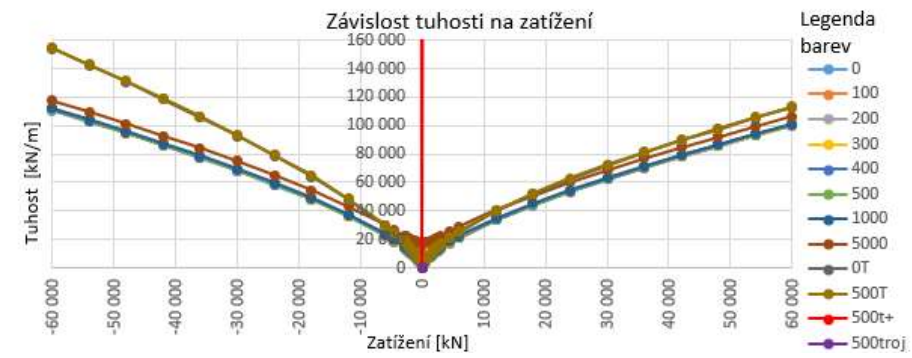
Obr. 3.50c Závislost svislého posunu na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000$ kN)



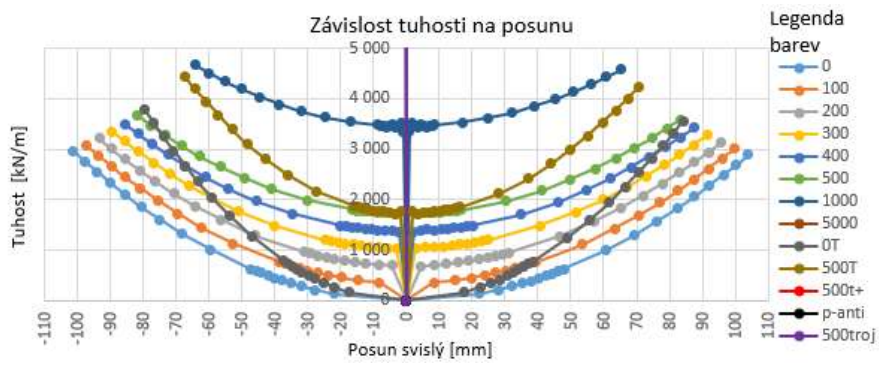
Obr. 3.51a Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



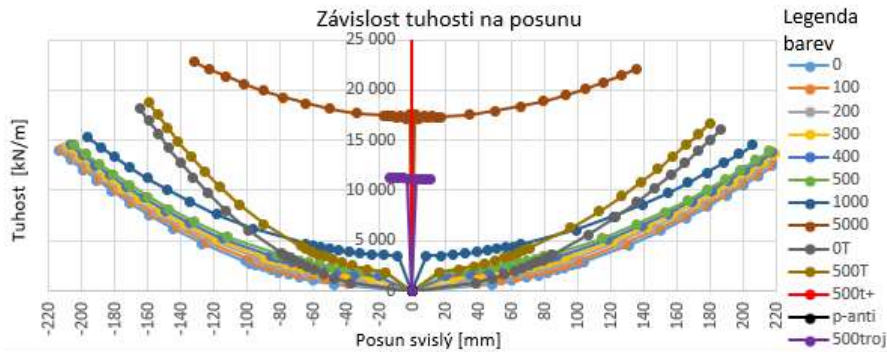
Obr. 3.51b Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



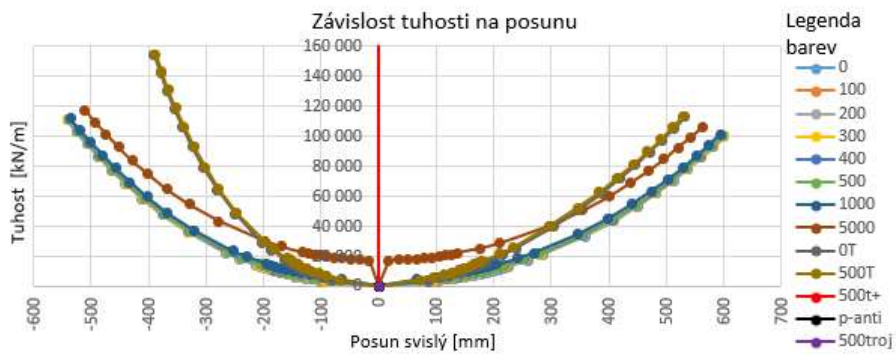
Obr. 3.51c Závislost svíslé tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



Obr. 3.52a Závislost svislé tuhosti na svislém posunu ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



Obr. 3.52b Závislost svislé tuhosti na svislém posunu ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

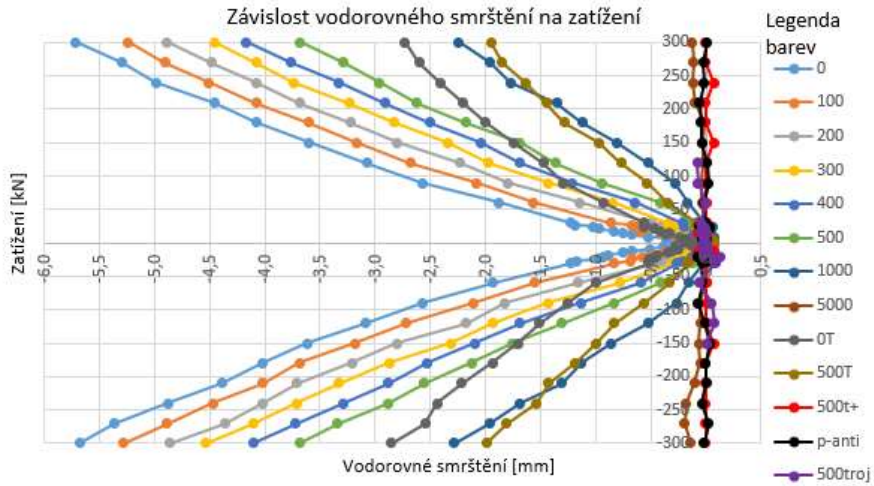


Obr. 3.52c Závislost svislé tuhosti na svislém posunu ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)

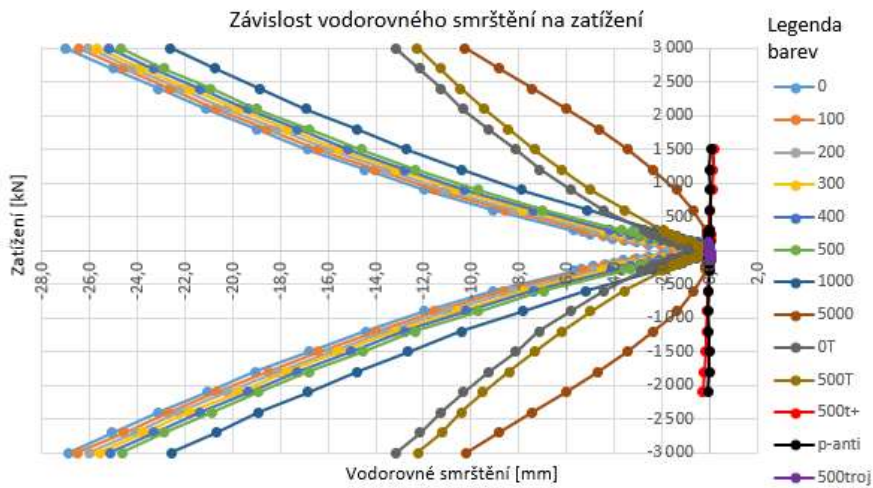
Vodorovný posun (zkosení):

U tohoto zatížení je tato deformace nulová.

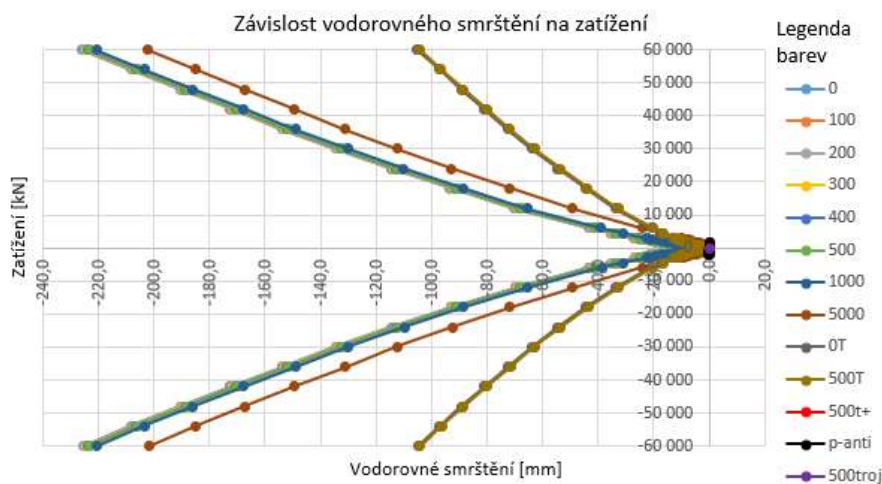
Vodorovné smrštění (zkrácení horního vodorovného táhla):



Obr. 3.53a Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)

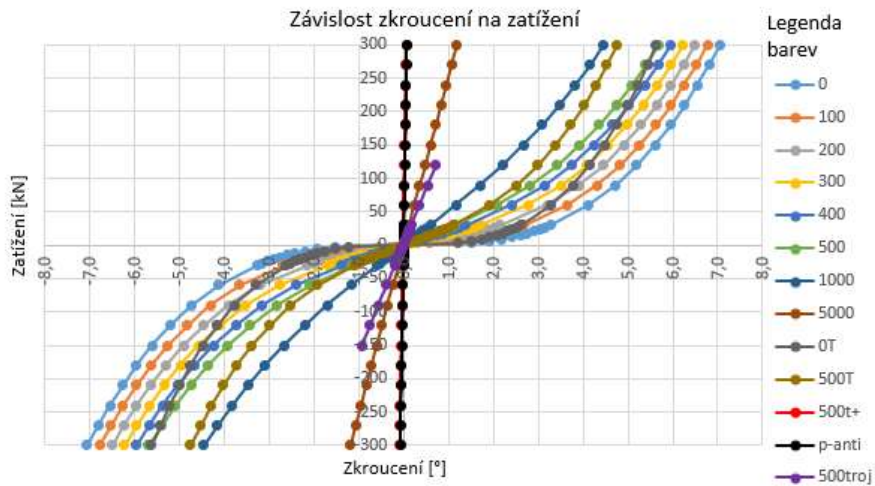


Obr. 3.53b Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

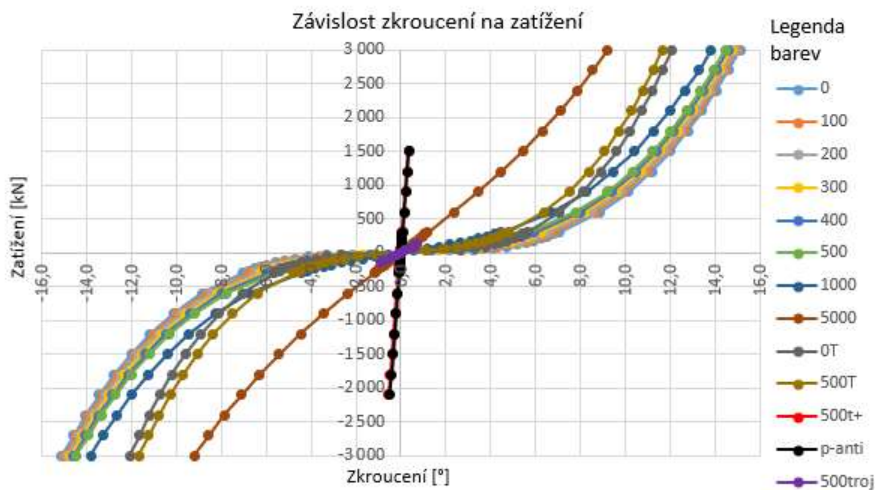


Obr. 3.53c Závislost vodorovného smrštění na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)

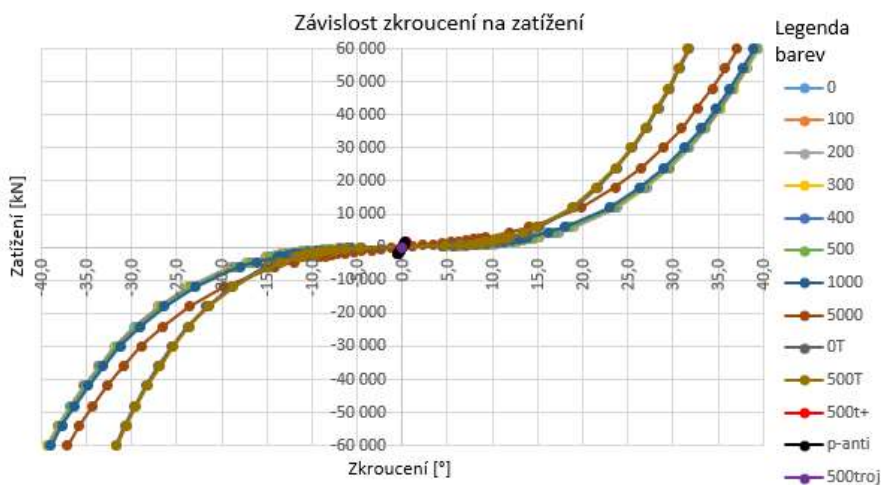
Vzájemné pootočení podstav (zkroucení):



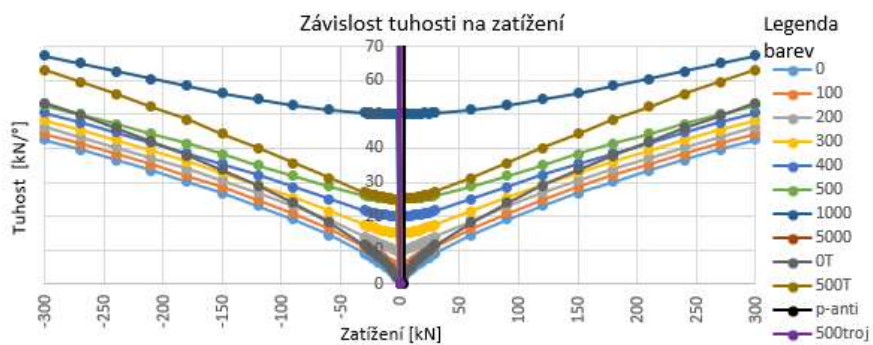
Obr. 3.54a Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



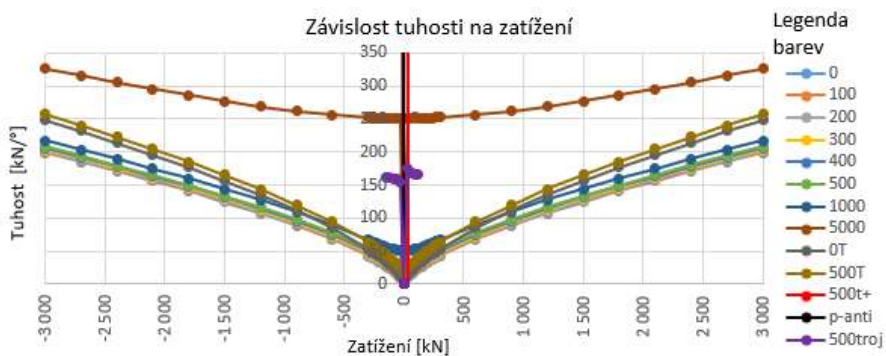
Obr. 3.54b Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



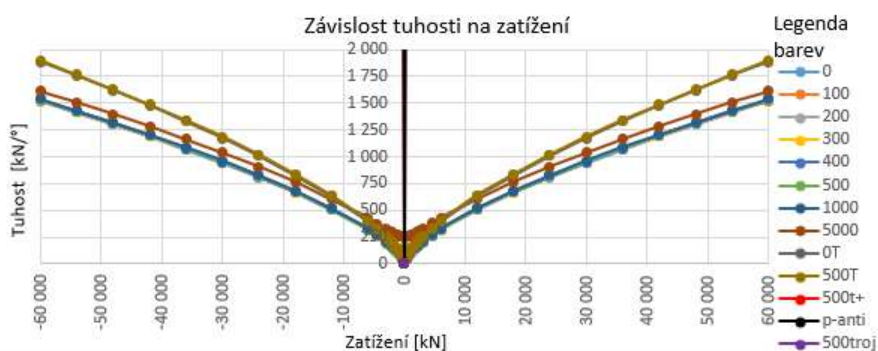
Obr. 3.54c Závislost zkroucení na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



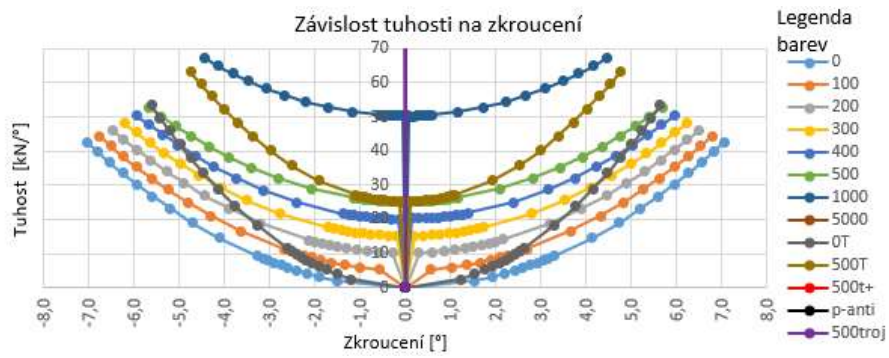
Obr. 3.55a Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



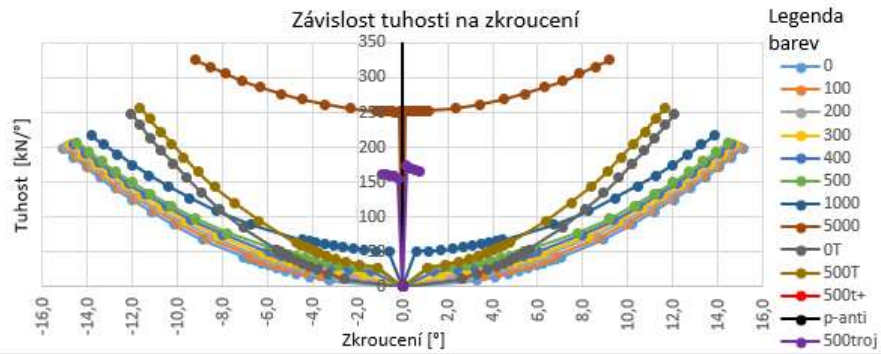
Obr. 3.55b Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



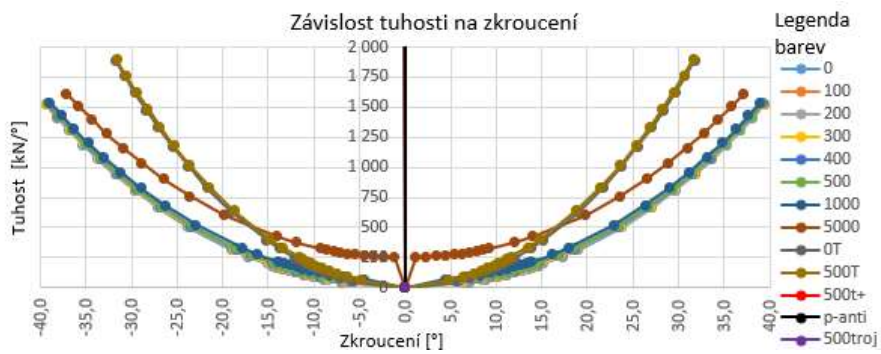
Obr. 3.55c Závislost torzní tuhosti na zatížení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



Obr. 3.56a Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)

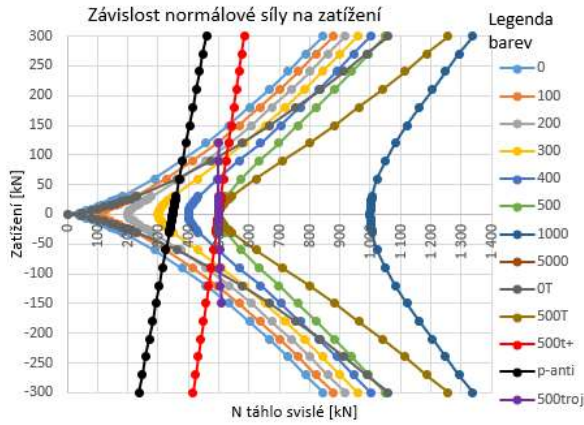


Obr. 3.56b Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

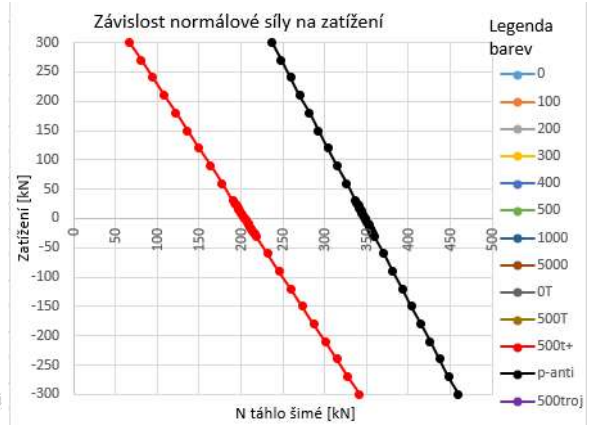


Obr. 3.56c Závislost torzní tuhosti na zkrouení ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)

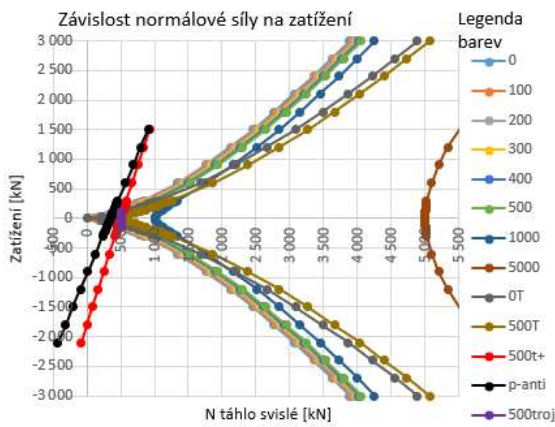
Normálové síly:



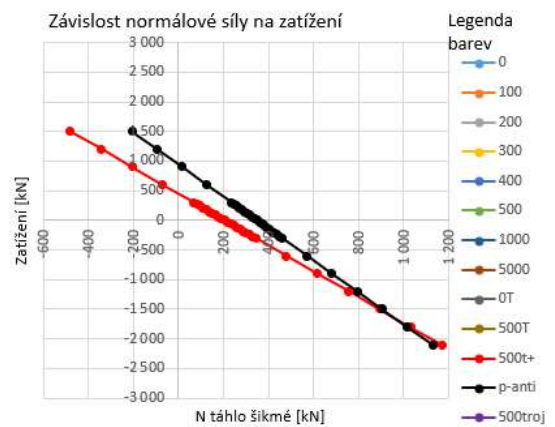
Obr. 3.57a N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



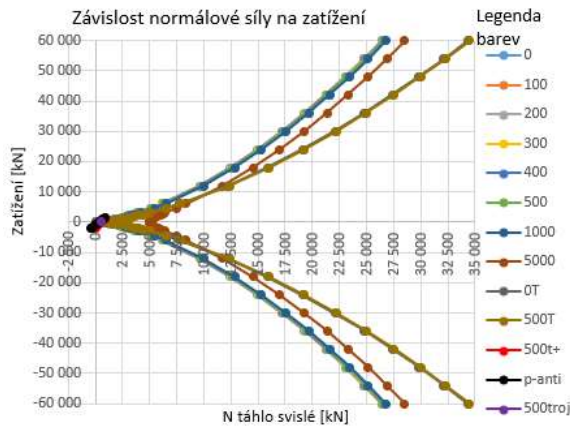
Obr. 3.58a $N_{Tš}$ ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



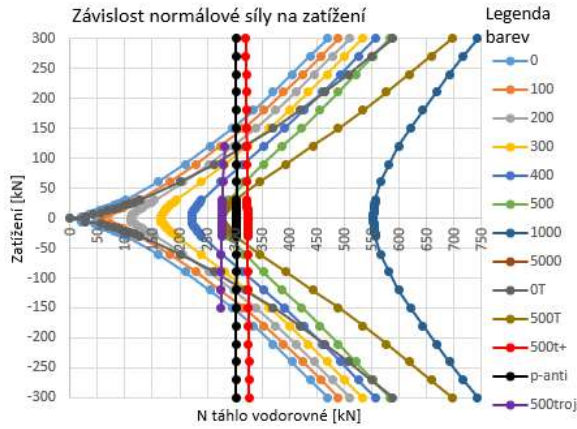
Obr. 3.57b N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



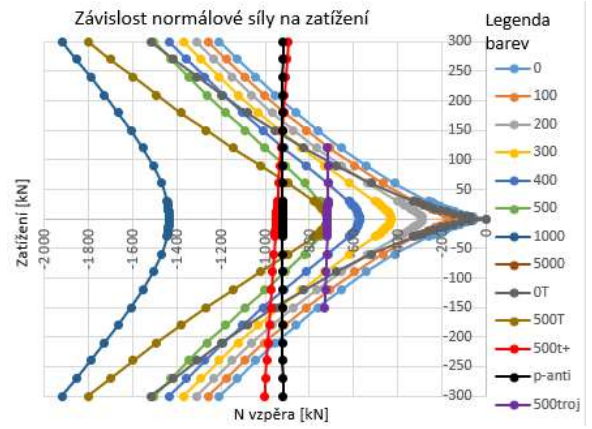
Obr. 3.58b $N_{Tš}$ ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)



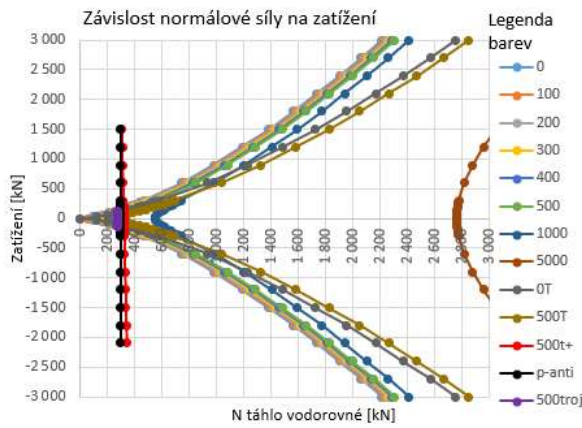
Obr. 3.57c N_{Ts} ($|F_{\max/\min}| = 40000 \text{ kN}$)



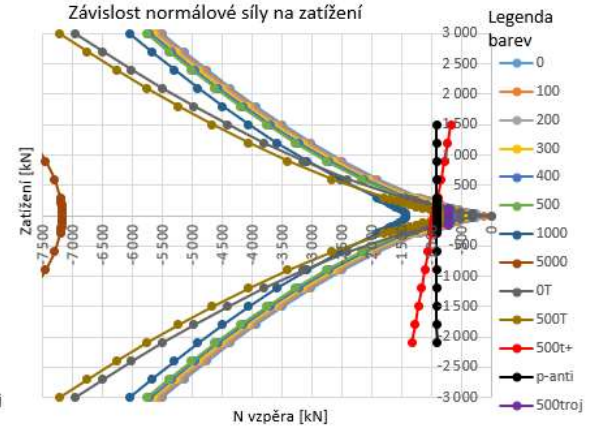
Obr. 3.59a N_{Tv} ($|F_{max/min}| = 100$ kN)



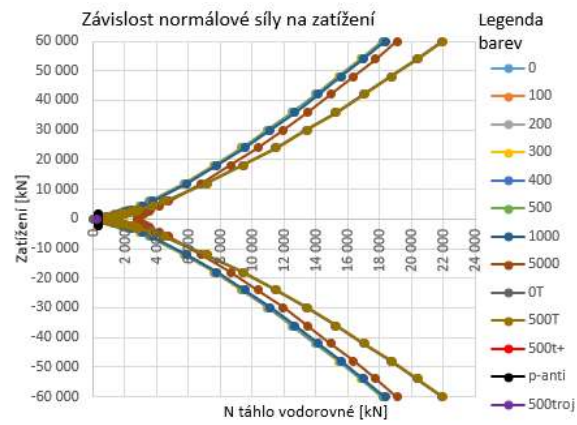
Obr. 3.60a N_v ($|F_{max/min}| = 100$ kN)



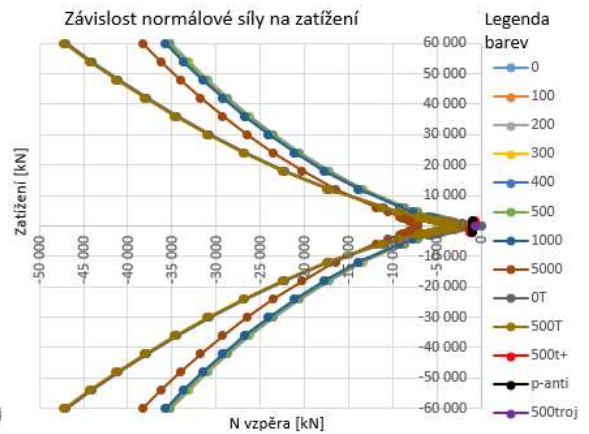
Obr. 3.59b N_{Tv} ($|F_{max/min}| = 1000$ kN)



Obr. 3.60b N_v ($|F_{max/min}| = 1000$ kN)

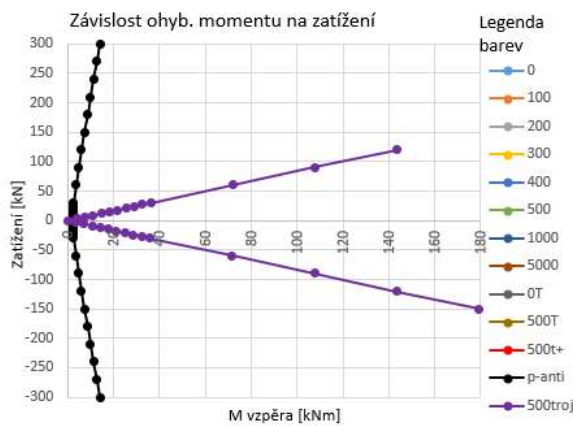


Obr. 3.59c N_{Tv} ($|F_{max/min}| = 40000$ kN)

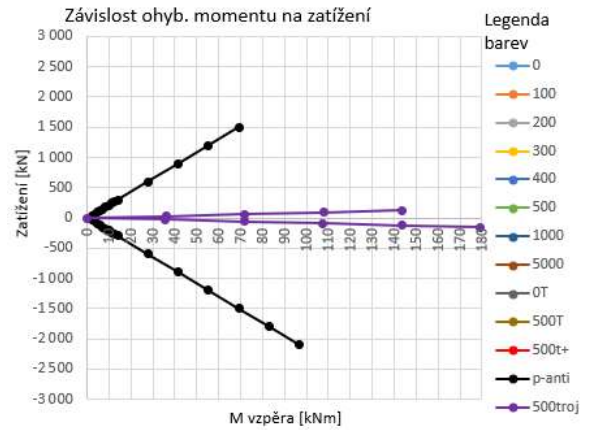


Obr. 3.60c N_v ($|F_{max/min}| = 40000$ kN)

Ohybové momenty ve vzpěrách:



Obr. 3.61a M_v ($|F_{\max/\min}| = 100 \text{ kN}$)



Obr. 3.61b M_v ($|F_{\max/\min}| = 1000 \text{ kN}$)

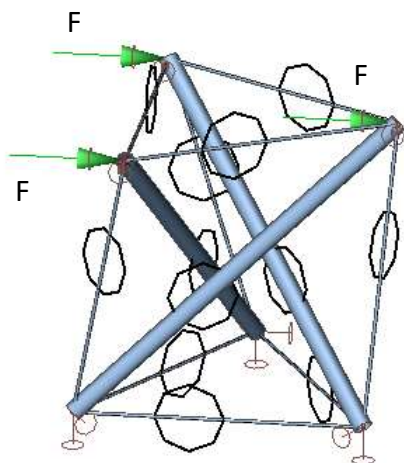
U následujících zatížení už nebudu provádět tak podrobnou analýzu jako dosud, protože to přesahuje rozsah této diplomové práce. Výsledkem této diplomové práce má být aplikace tensegrity konstrukcí na reálné konstrukce, nikoliv komplexní výzkum statického působení tensegrity konstrukcí. Nicméně **pro navrhování bezpečných tensegrity konstrukcí by bylo dobré, kdyby někdo provedl komplexní výzkum jejich statického působení a kdyby výsledky výpočtů byly ověřeny experimenty.**

3.2.3.3 Vodorovné zatížení třemi silami (zkosení, smyk)

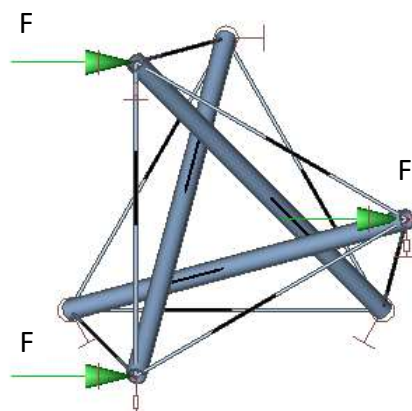
Viz model DIP 002-02-02gh a následující tabulky, obrázky a grafy.

U tohoto zatížení nedochází ke globální ztrátě stability. Domnívám se, že je to způsobeno stabilizačním účinkem těch sil, které mají působiště za středem kroucení. **U zatížení v kapitole 3.2.3.5 už tomu tak není.**

Ke ztrátě stability tedy dojde při vybočení vzpěr nebo při vymizení tahu v táhlech.



Obr. 3.62a Schéma zatížení – axonometrie



Obr. 3.62b Schéma zatížení – pohled shora

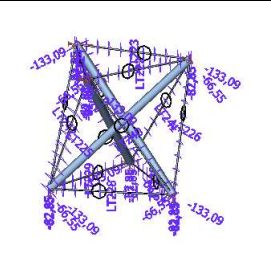
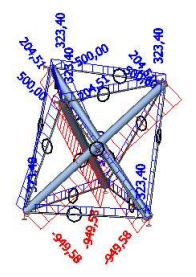
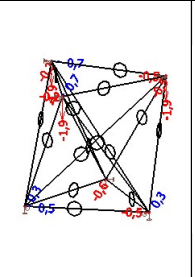
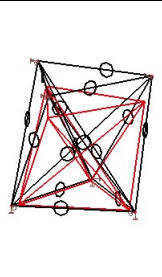
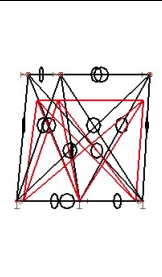
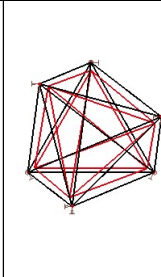
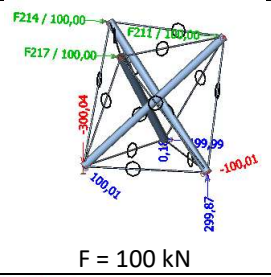
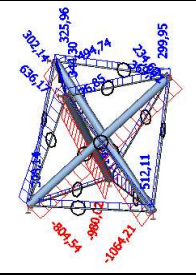
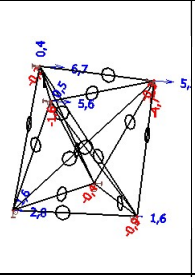
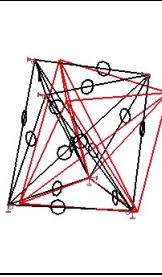
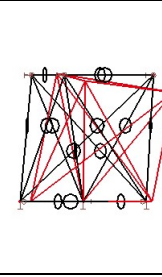
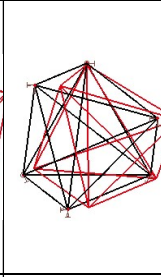
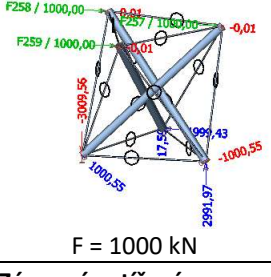
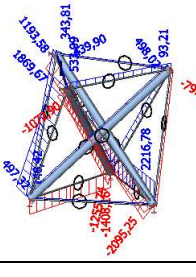
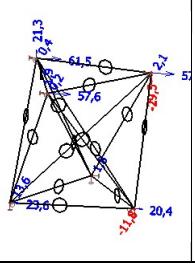
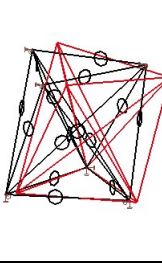
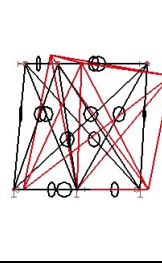
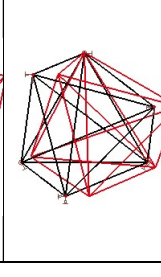
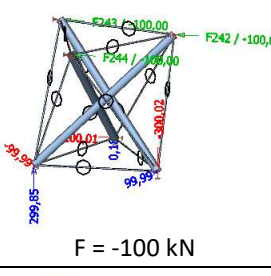
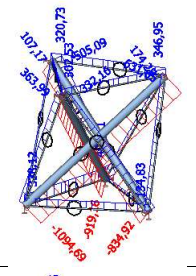
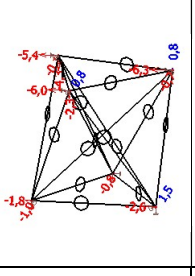
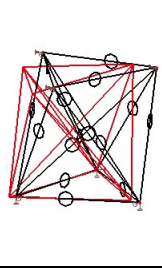
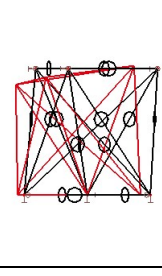
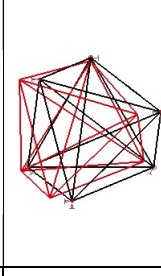
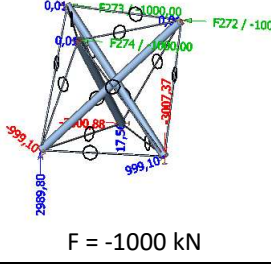
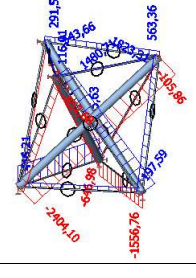
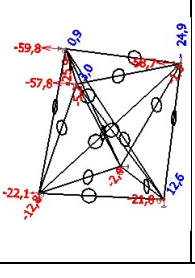
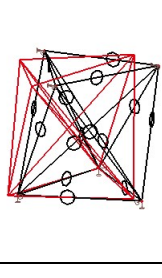
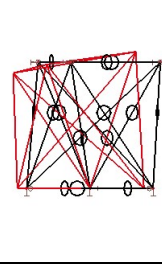
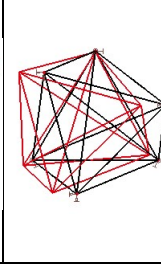
Tab. 3.11a Vodhorovné zatížení třemi silami - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -1000 kN</p>					

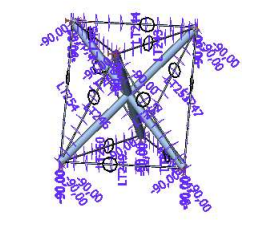
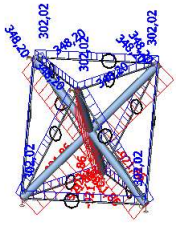
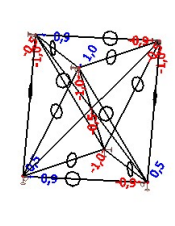
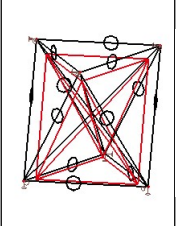
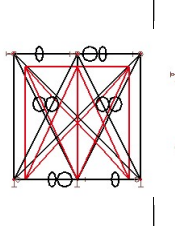
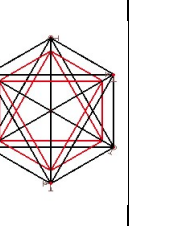
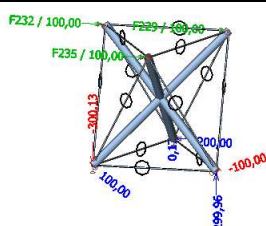
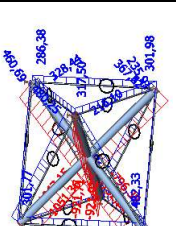
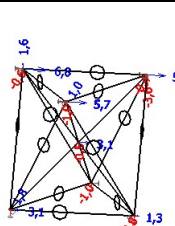
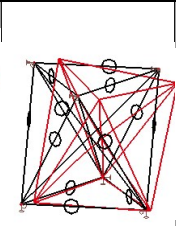
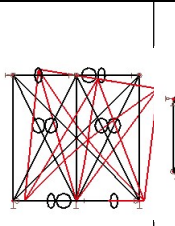
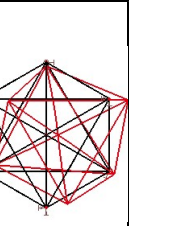
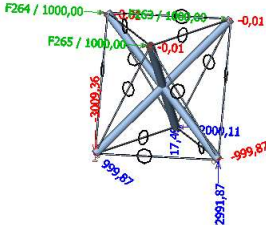
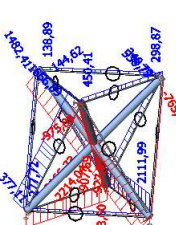
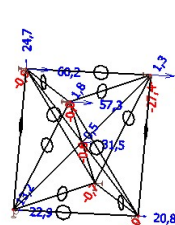
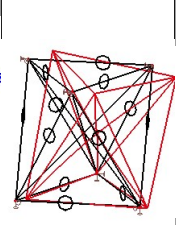
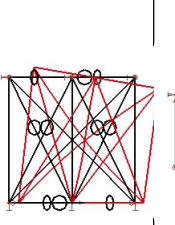
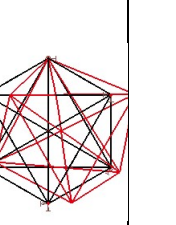
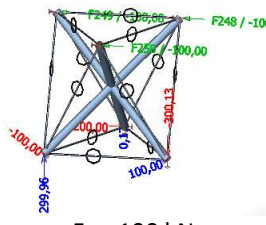
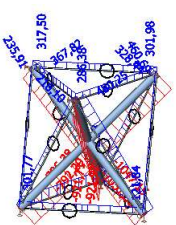
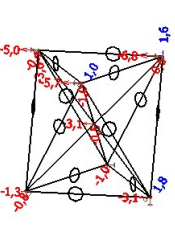
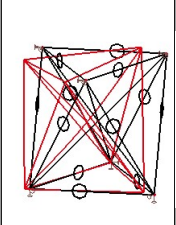
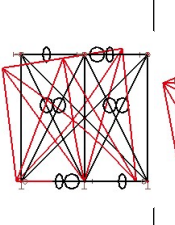
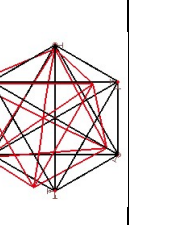
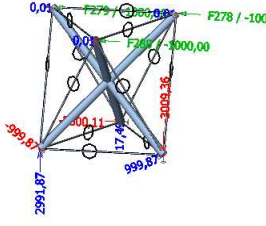
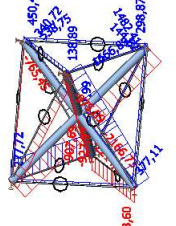
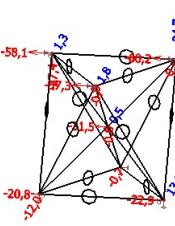
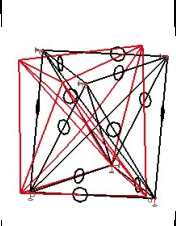
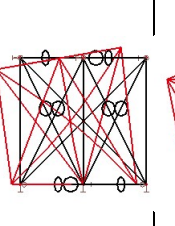
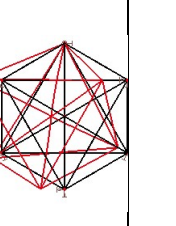
Tab. 3.11b Vodorovné zatížení třemi silami - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -1000 kN</p>					

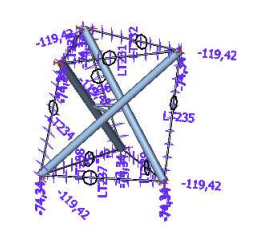
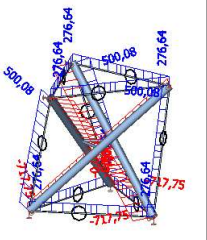
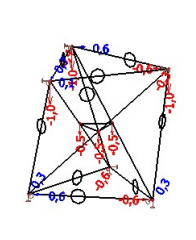
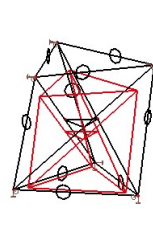
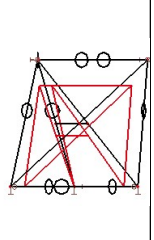
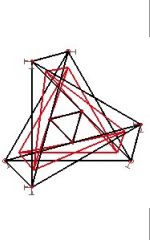
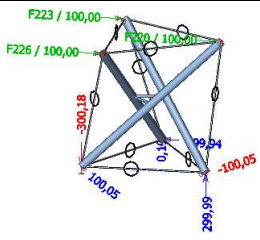
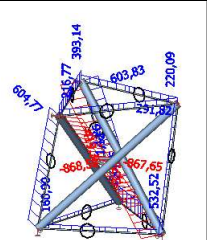
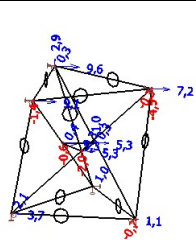
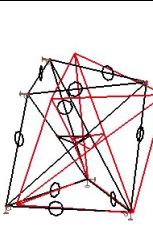
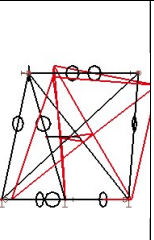
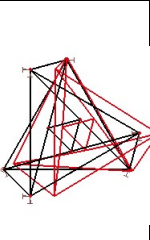
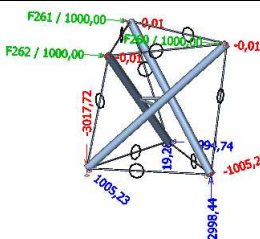
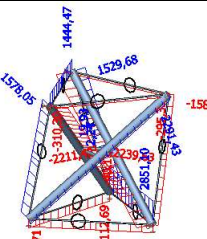
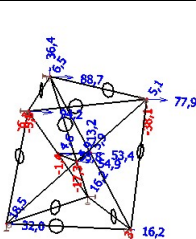
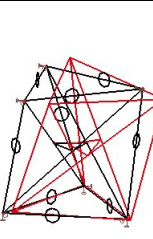
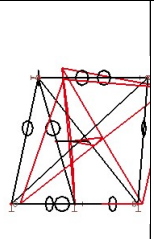
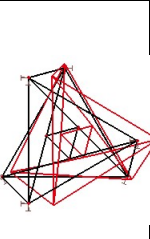
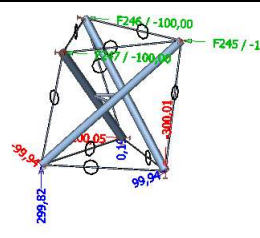
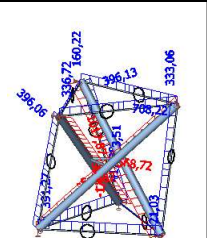
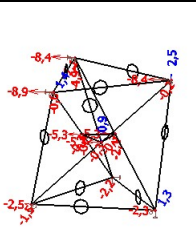
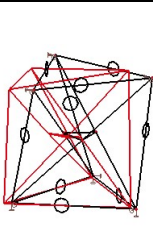
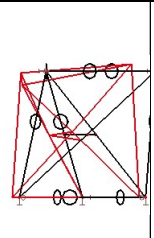
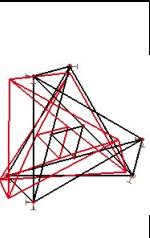
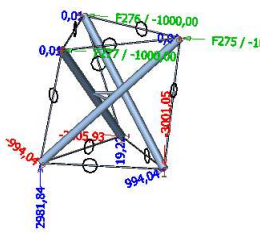
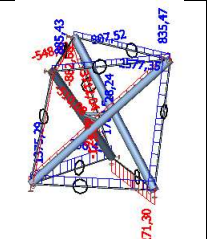
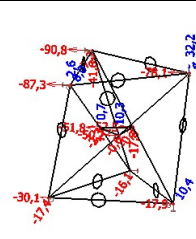
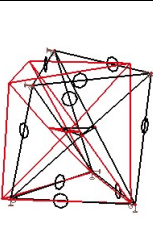
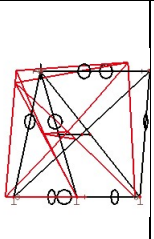
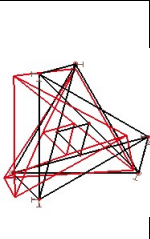
Tab. 3.11c Vodohorné zatížení třemi silami – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -1000 kN</p>					

Tab. 3.11d Vodhorovné zatížení třemi silami – předpjatý antihranol

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -1000 kN</p>					

Tab. 3.11e Vodhorovné zatížení třemi silami – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

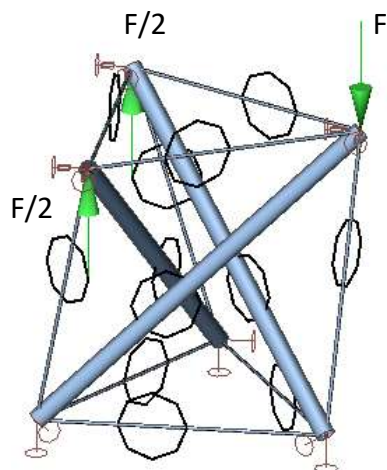
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p> 					
<p>F = 1000 kN</p> 					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p> 					
<p>F = -1000 kN</p> 					

3.2.3.4 Ohyb

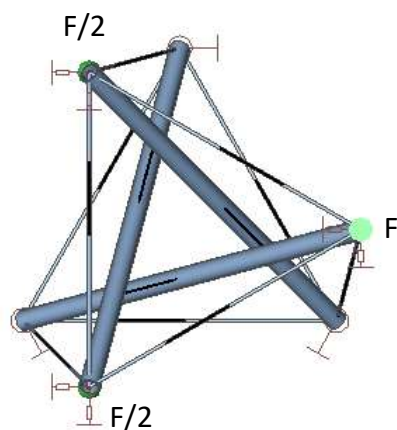
Viz model DIP 002-02-02ij a následující tabulky, obrázky a grafy.

U tohoto zatížení nedochází ke globální ztrátě stability. Domnívám se, že je to stabilizačním účinkem těch vnějších sil, které namáhají simplex tahem. **U zatížení v kapitole 3.2.3.8 už tomu tak není.**

Ke ztrátě stability tedy dojde při vybočení vzpěr nebo při vymizení tahu v táhlech.

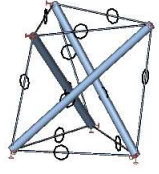
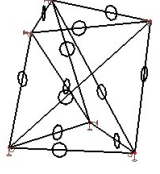
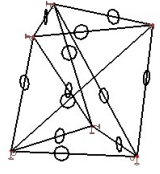
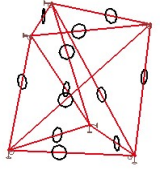
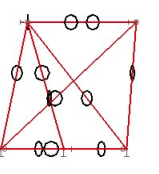
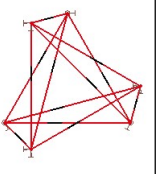
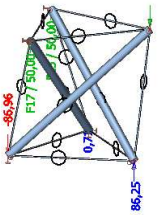
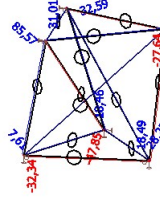
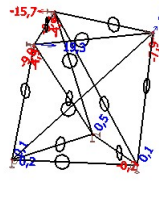
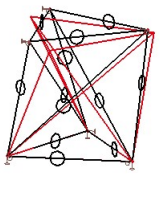
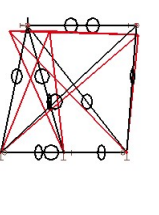
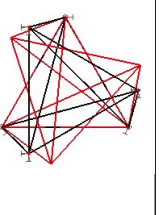
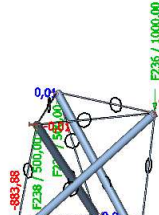
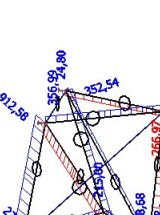
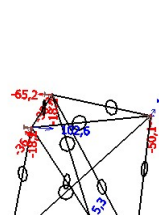
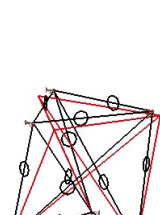
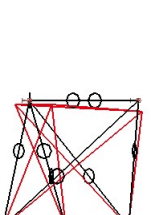
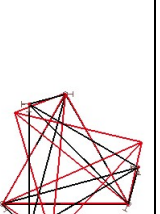
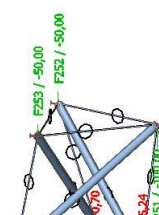
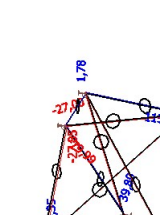
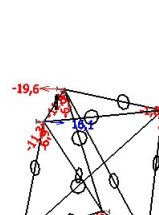
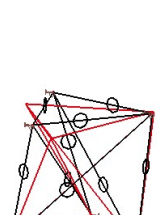
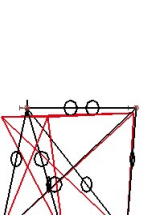
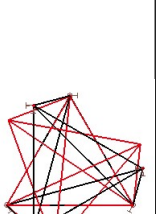
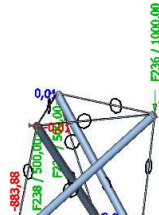
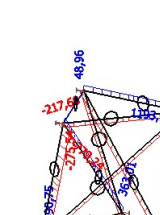
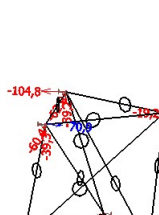
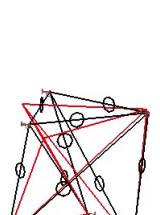
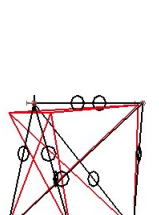
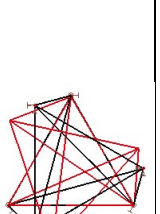


Obr. 3.63a Schéma zatížení – axonometrie



Obr. 3.63b Schéma zatížení – pohled shora

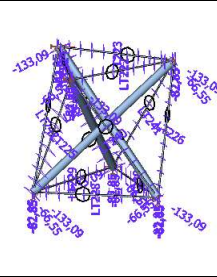
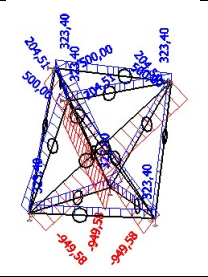
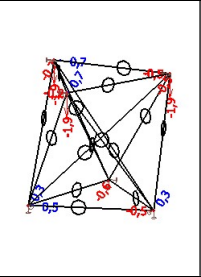
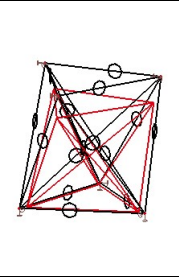
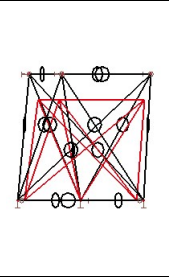
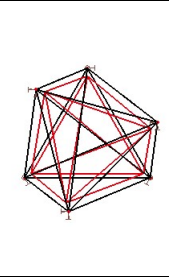
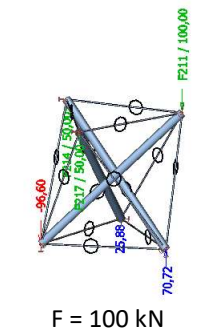
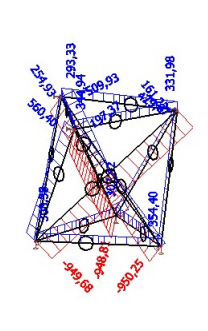
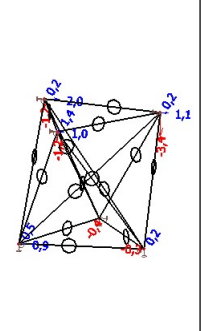
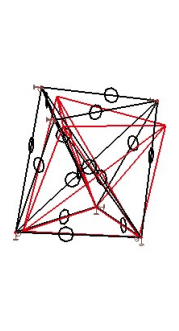
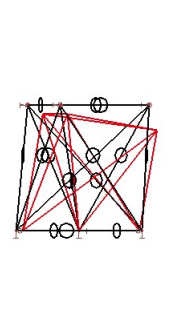
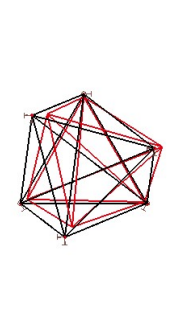
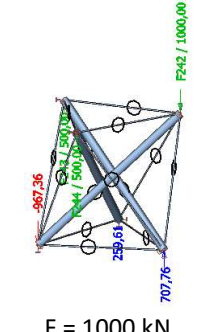
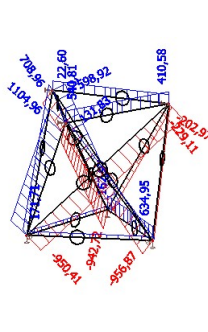
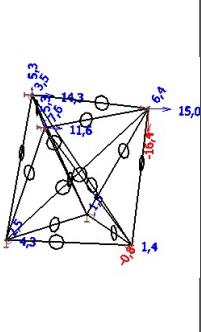
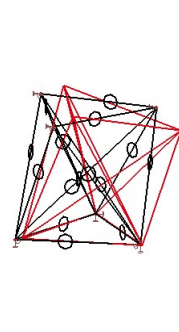
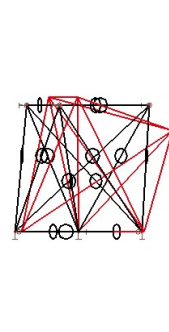
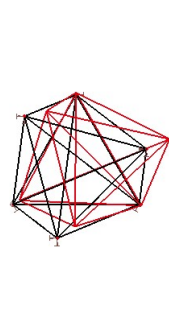
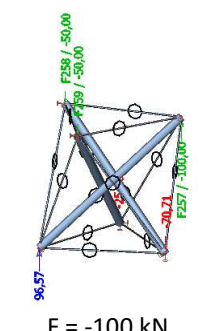
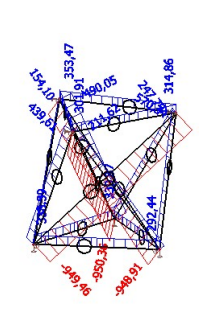
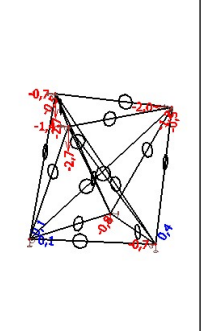
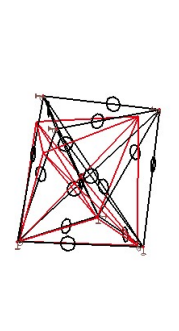
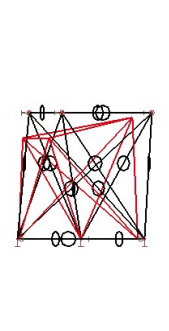
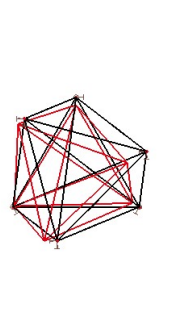
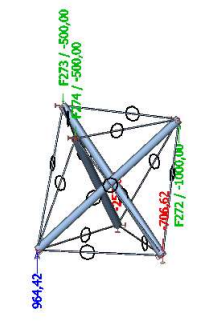
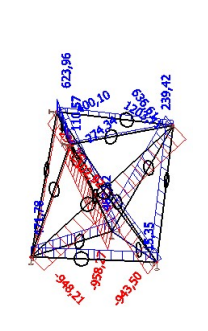
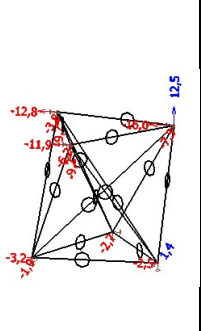
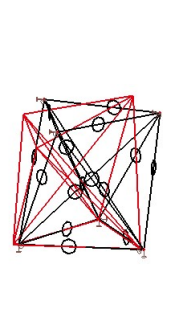
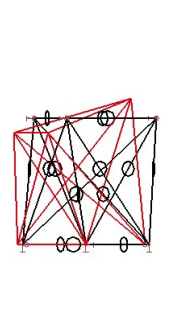
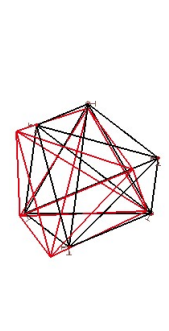
Tab. 3.12a Ohyb - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -1000 kN</p>					

Tab. 3.12b Ohyb - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
F = 100 kN					
F = 1000 kN					
Záporné zatížení					
F = -100 kN					
F = -1000 kN					

Tab. 3.12c Ohyb – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 1000 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -1000 kN					

Tab. 3.12d Ohyb – předpjatý antihranol

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -1000 kN</p>					

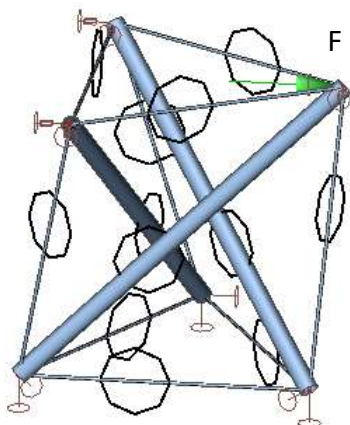
Tab. 3.12e Ohyb – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
F = 100 kN					
F = 1000 kN					
Záporné zatížení					
F = -100 kN					
F = -1000 kN					

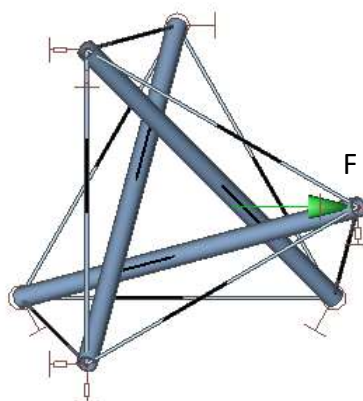
3.2.3.5 Vodorovné zatížení jednou silou (ztráta stability zkroucením)

Viz model DIP 002-02-02op a následující tabulky, obrázky a grafy.

U tohoto zatížení dochází ke globální ztrátě stability zkroucením, když je zatížení záporné. Při všech zatíženích dochází ke kroucení simplexu. U tohoto zatížení se vlivem zkroucení zvětšuje excentricita vnější síly. Pokud je síla kladná, způsobuje excentricita stabilizační moment, protože působí síly je za středem kroucení, a síla tedy kroutí proti deformaci. Pokud je síla záporná, způsobuje excentricita destabilizační moment, protože působí síly je před středem kroucení, a síla tedy kroutí shodně s deformací.



Obr. 3.64a Schéma zatížení – axonometrie

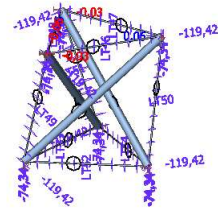
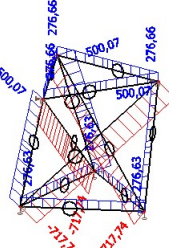
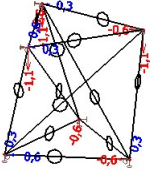
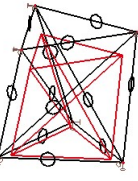
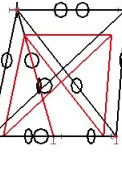
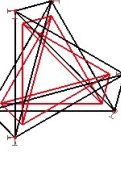
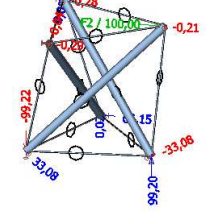
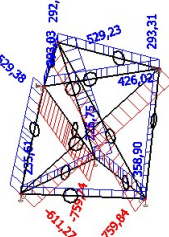
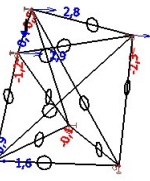
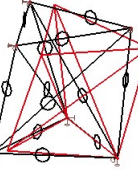
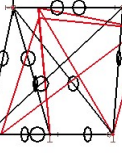
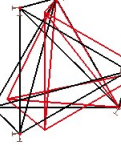
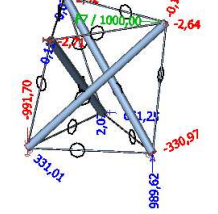
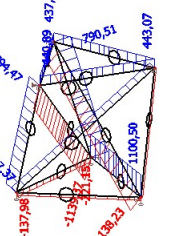
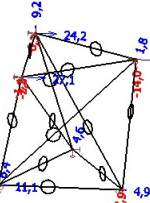
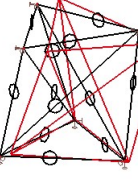
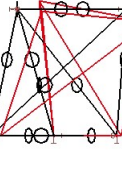
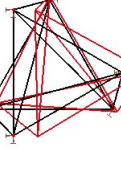
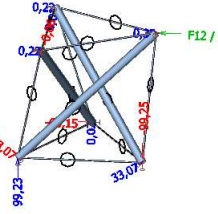
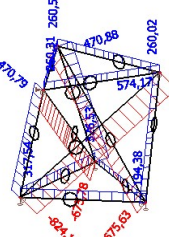
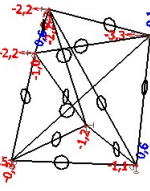
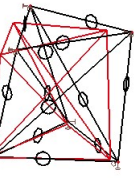
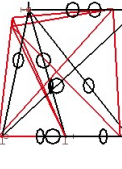
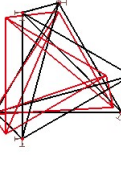
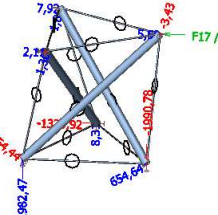
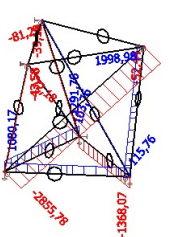
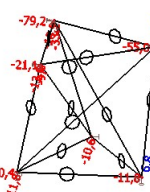
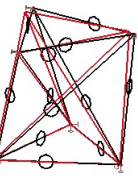
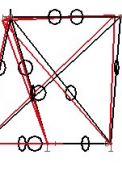
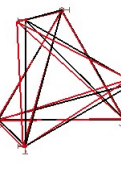


Obr. 3.64b Schéma zatížení – pohled shora

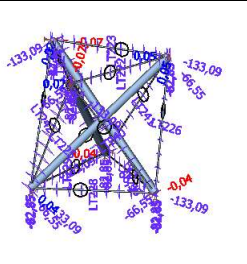
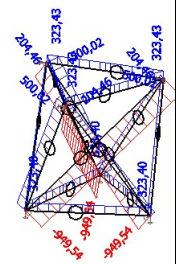
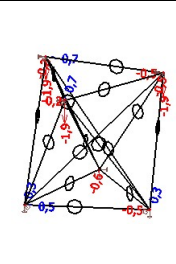
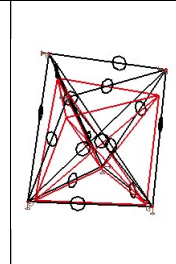
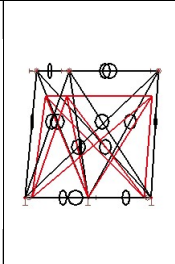
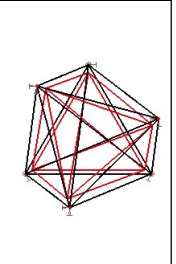
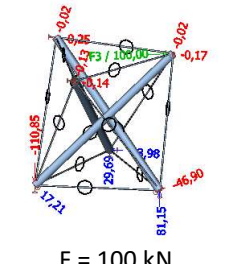
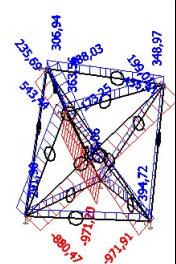
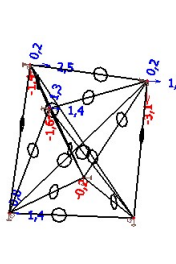
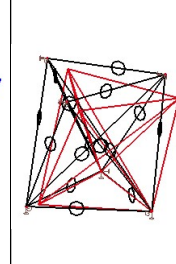
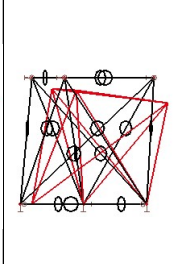
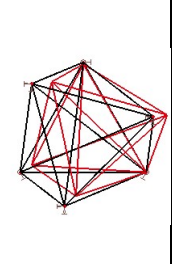
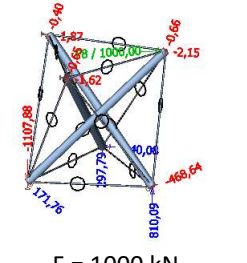
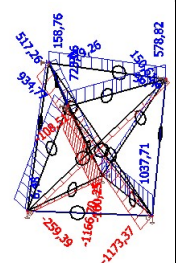
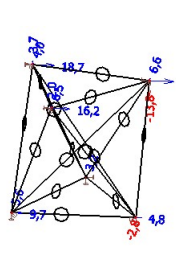
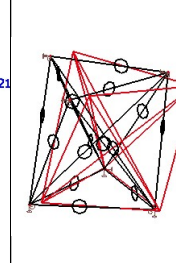
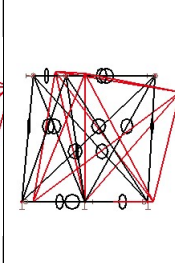
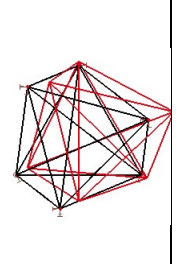
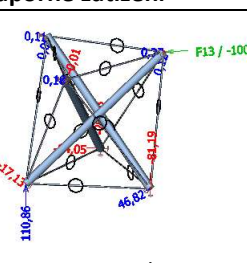
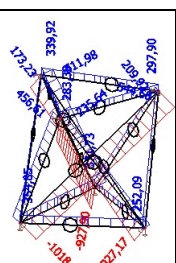
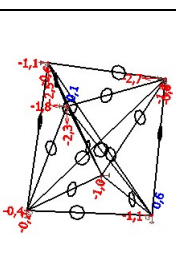
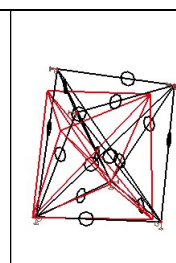
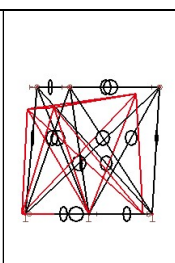
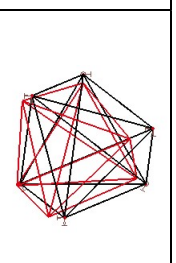
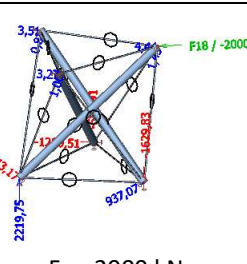
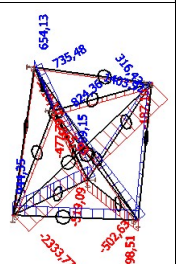
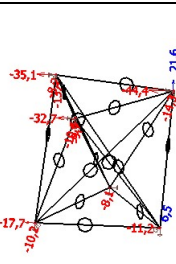
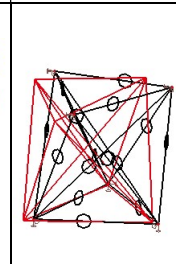
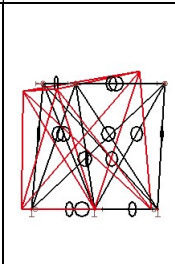
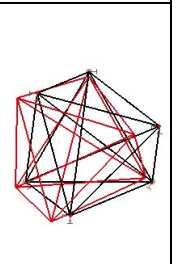
Tab. 3.13a Vodrovné zatížení jednou silou - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.13b Vodorovné zatížení jednou silou - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p data-bbox="335 840 454 869">F = 100 kN</p>					
 <p data-bbox="335 1131 454 1160">F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p data-bbox="335 1444 454 1473">F = -100 kN</p>					
 <p data-bbox="335 1713 454 1742">F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.13c Vododorvné zatížení jednou silou – předpjetý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.13d Vodorné zatížení jednou silou – předpjatý antihranol

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.13e Vodorovné zatížení jednou silou – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 1000 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -2000 kN					

3.2.3.6 Vodorovné roztážení horní podstavy třemi silami

Viz model DIP 002-02-02ef a následující tabulky, obrázky a grafy.

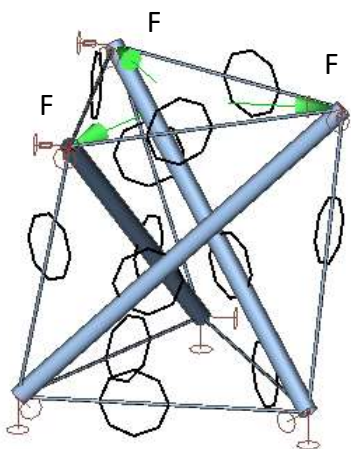
U tohoto zatížení dochází ke globální ztrátě stability zkroucením, když je zatížení záporné.

Při velkém kladném zatížení dojde k vymizení tahu ve všech táhlech kromě horních vodorovných táhel.

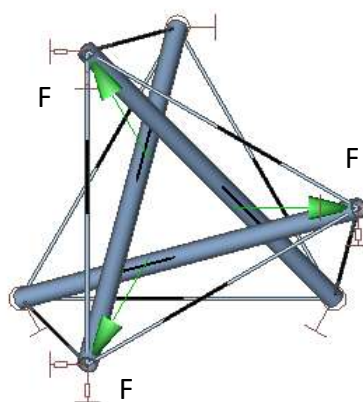
U tohoto zatížení se objevuje jedna zajímavost týkající se stability. Když je toto zatížení záporné (zkracuje horní vodorovná táhla) dojde při určité hodnotě zatížení ke ztrátě stability zkroucením, protože při deformaci (zkroucení) se zvětšuje excentricita zatížení a vzniká destabilizující kroutící moment působící na simplex, protože působiště sil jsou před středem kroucení. Pokud horní vodorovná táhla zkracují teplotou (ochlazením), tak ke ztrátě stability nedojde, protože při namáhání teplotou nevznikají při deformování konstrukce žádné excentricity vnějších sil a žádné destabilizující momenty. Pokud je zatížení silami kladné (prodlužuje horní vodorovná táhla), nedojde ke ztrátě stability, protože vnější síly mají na deformaci vzniklých excentricitách stabilizační moment, protože mají působiště za středem kroucení. Když ale prodloužení horních vodorovných táhel vyvolám ohřátím těchto táhel (za předpokladu, že jsou schopna přenášet tlak), dojde ke ztrátě stability, protože při ohřívání táhel se to po vymizení předpětí stává, ohříváním jakéhokoliv táhla klesá předpětí v ostatních táhlech, pokud se zároveň neohřívají i vzpěry. Shrnutí, viz tabulka.

Tab. 3.14 Ztráta stability

	Zatížení silami	Zatížení teplotou
Roztážení horní podstavy	ne	ano
Smrštění horní podstavy	ano	ne



Obr. 3.65a Schéma zatížení – axonometrie

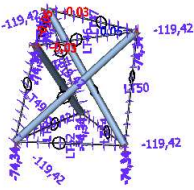
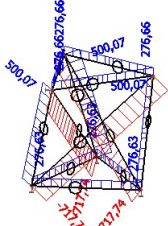
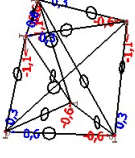
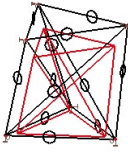
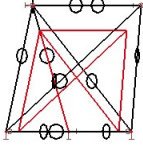
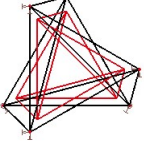
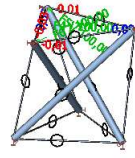
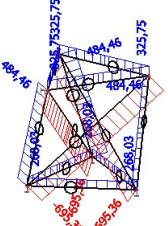
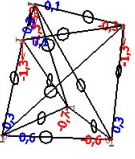
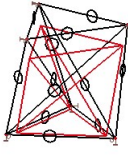
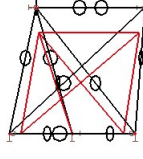
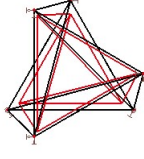
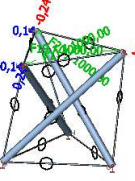
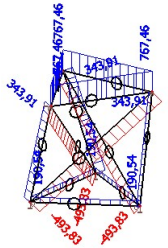
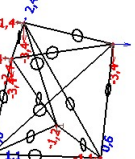
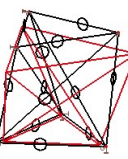
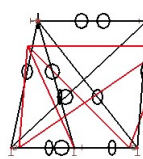
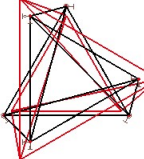
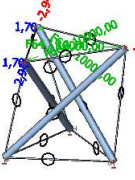
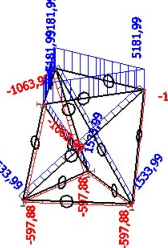
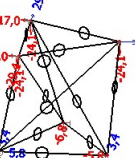
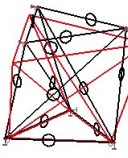
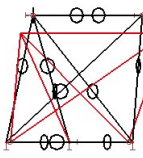
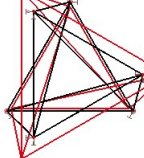
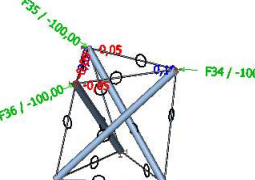
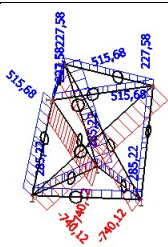
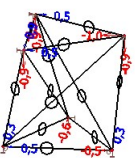
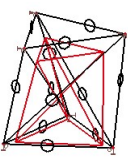
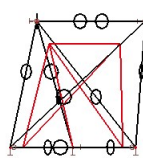
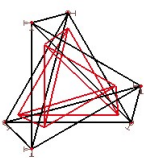
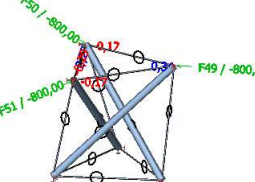
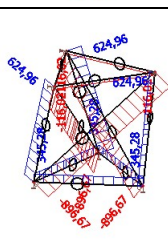
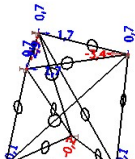
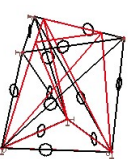
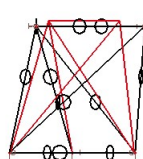
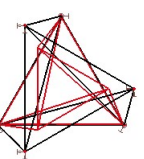


Obr. 3.65b Schéma zatížení – pohled shora

Tab. 3.15a Vodrovné roztažení horní podstavy třemi silami - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
<p>F = 10000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -300 kN</p>					

Tab. 3.15b Vodorné roztažení horní podstavy třemi silami - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 1000 kN					
 F = 10000 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -800 kN					

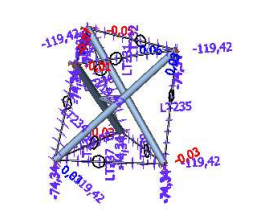
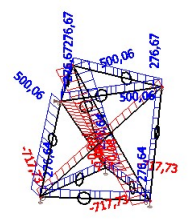
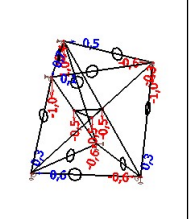
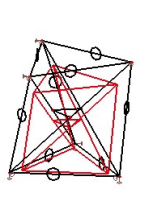
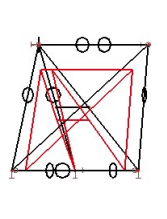
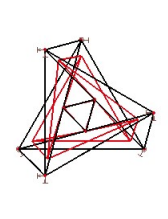
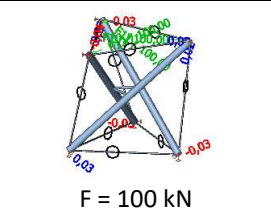
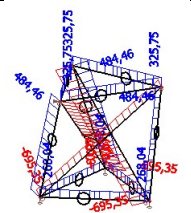
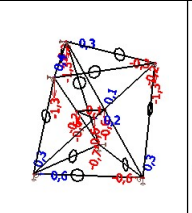
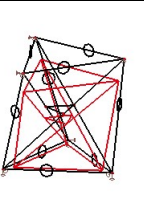
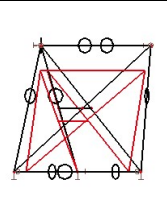
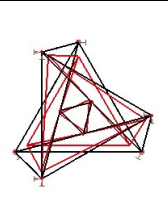
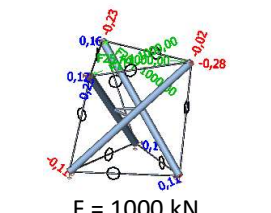
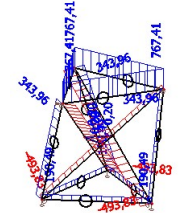
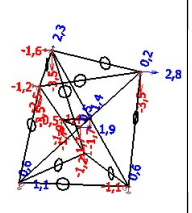
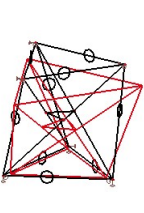
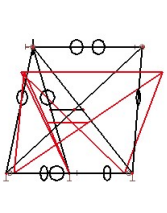
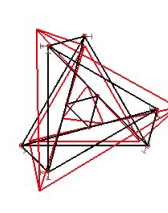
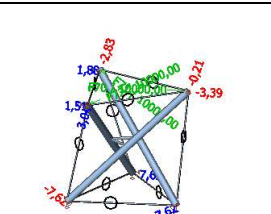
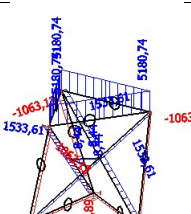
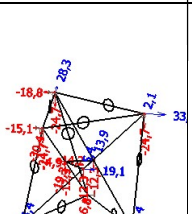
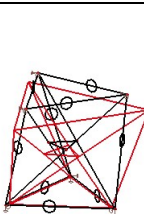
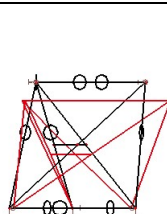
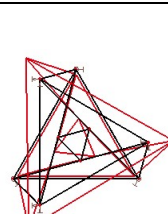
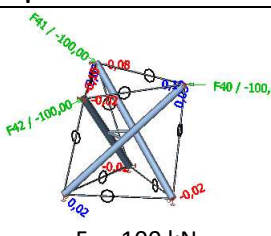
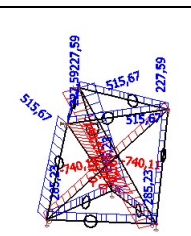
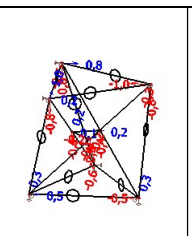
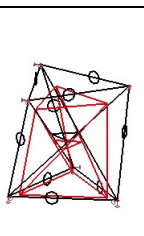
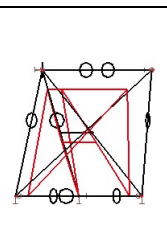
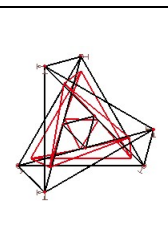
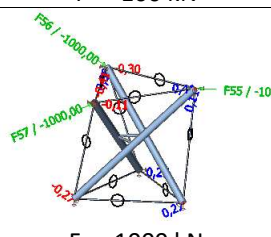
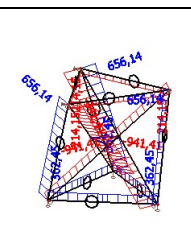
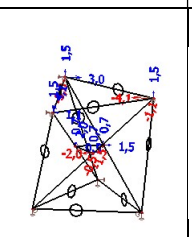
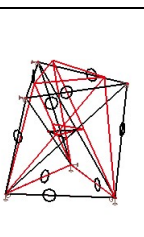
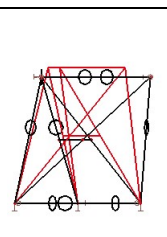
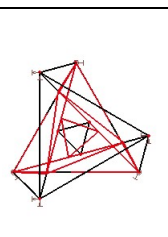
Tab. 3.15c Vodorné roztažení horní podstavy třemi silami – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
<p>F = 10000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -1000 kN</p>					

Tab. 3.15d Vodhorvné roztažení horní podstavy třemi silami – předpjatý antihranol

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
<p>F = 10000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -1000 kN</p>					

Tab. 3.15e Vodrovné roztažení horní podstavy třemi silami – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 <p>F = 100 kN</p>					
 <p>F = 1000 kN</p>					
 <p>F = 10000 kN</p>					
Záporné zatížení					
 <p>F = -100 kN</p>					
 <p>F = -1000 kN</p>					

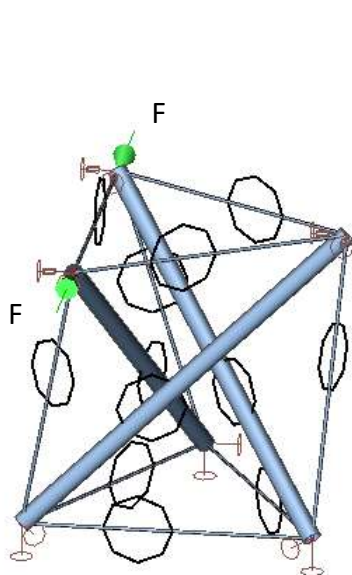
3.2.3.7 Stlačení horního vodorovného táhla

Viz model DIP 002-02-02kl a následující tabulky, obrázky a grafy.

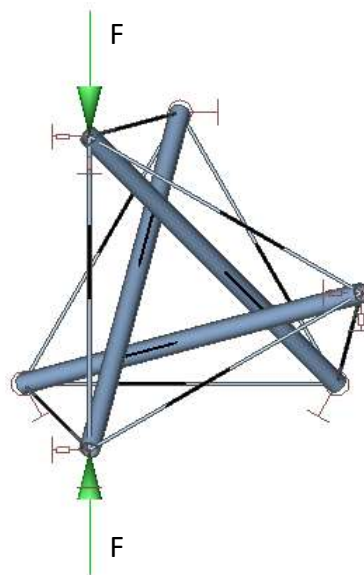
U tohoto zatížení dochází ke globální ztrátě stability, když je kladné.

Je zde stejný vztah mezi zatížením, teplotou a stabilitou jako v kapitole 3.2.3.6.

Při velkém záporném zatížení dojde k vymizení tahu ve všech táhlech kromě natahovaného horního vodorovného táhla.

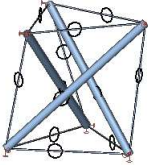
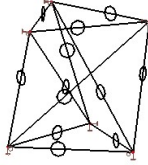
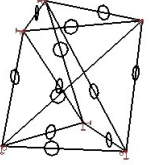
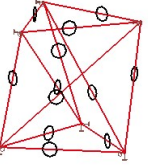
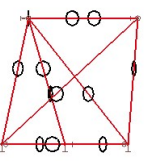
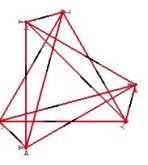
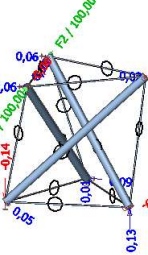
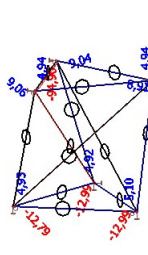
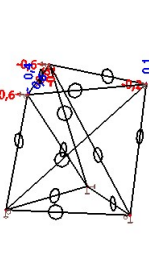
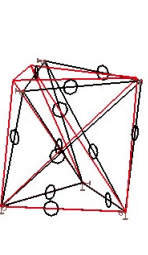
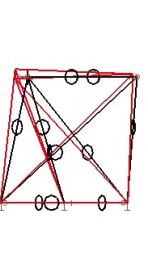
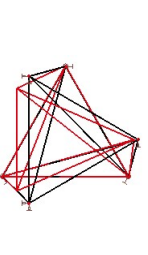
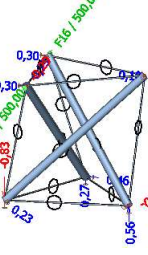
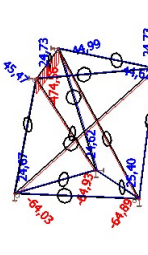
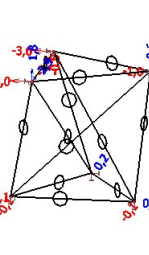
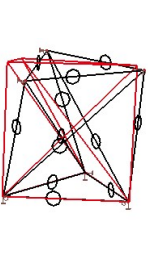
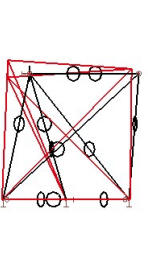
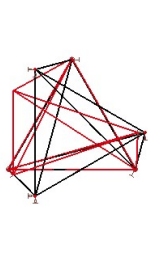
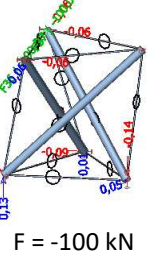
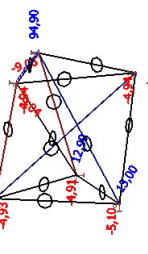
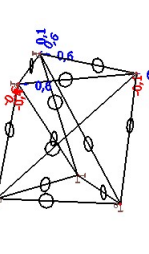
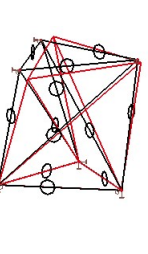
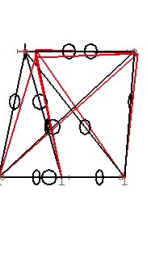
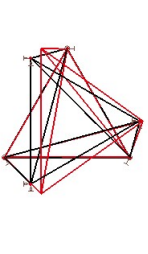
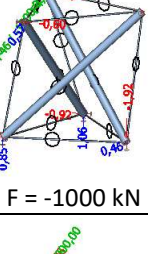
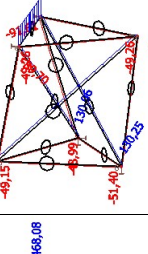
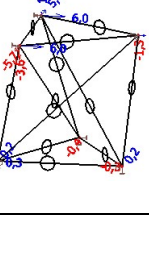
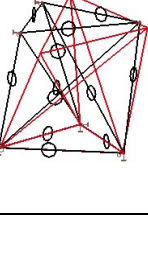
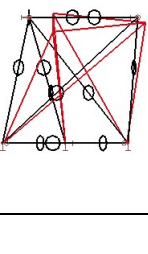
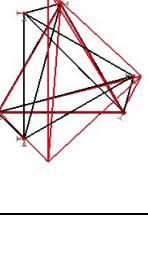
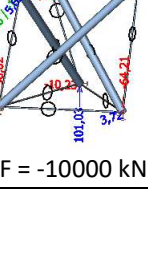
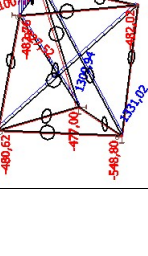
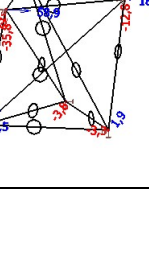
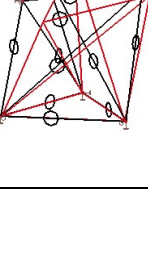
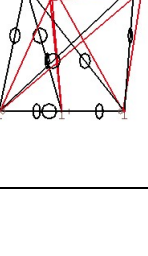
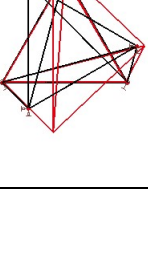


Obr. 3.66a Schéma zatížení – axonometrie

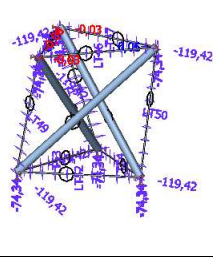
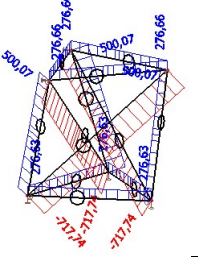
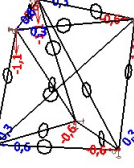
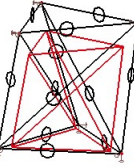
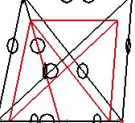
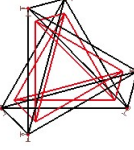
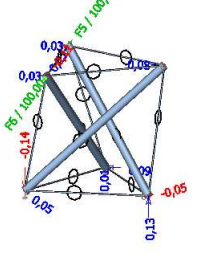
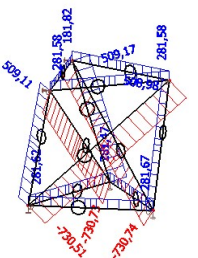
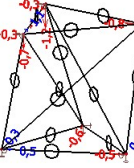
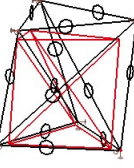
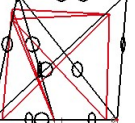
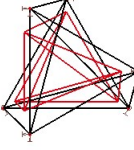
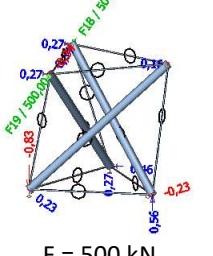
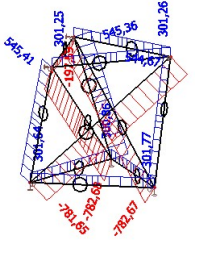
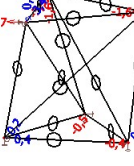
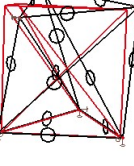
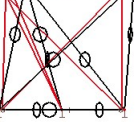
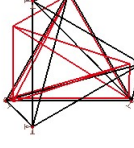
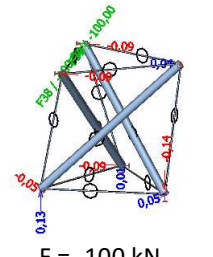
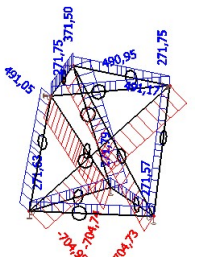
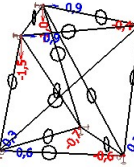
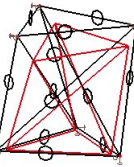
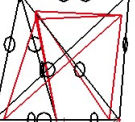
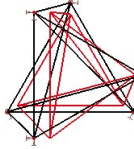
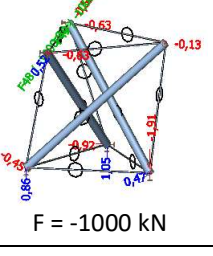
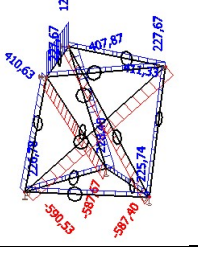
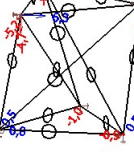
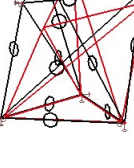
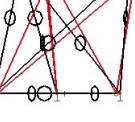
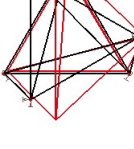


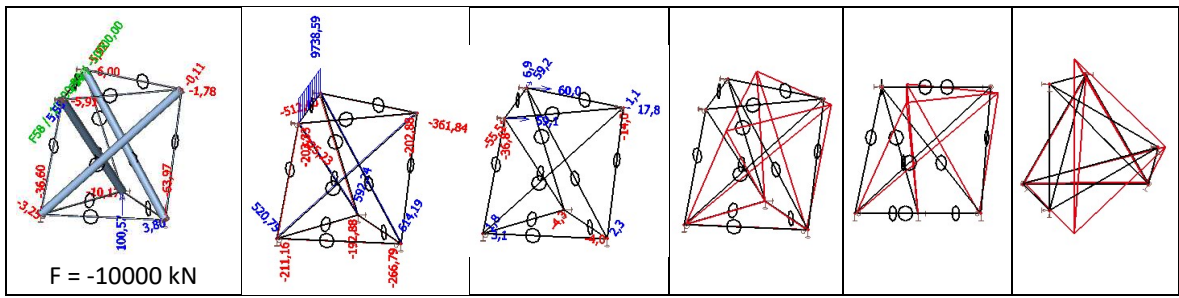
Obr. 3.66b Schéma zatížení – pohled shora

Tab. 3.16a Stlačení horního vodorovného táhla - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 500 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -1000 kN					
 F = -10000 kN					

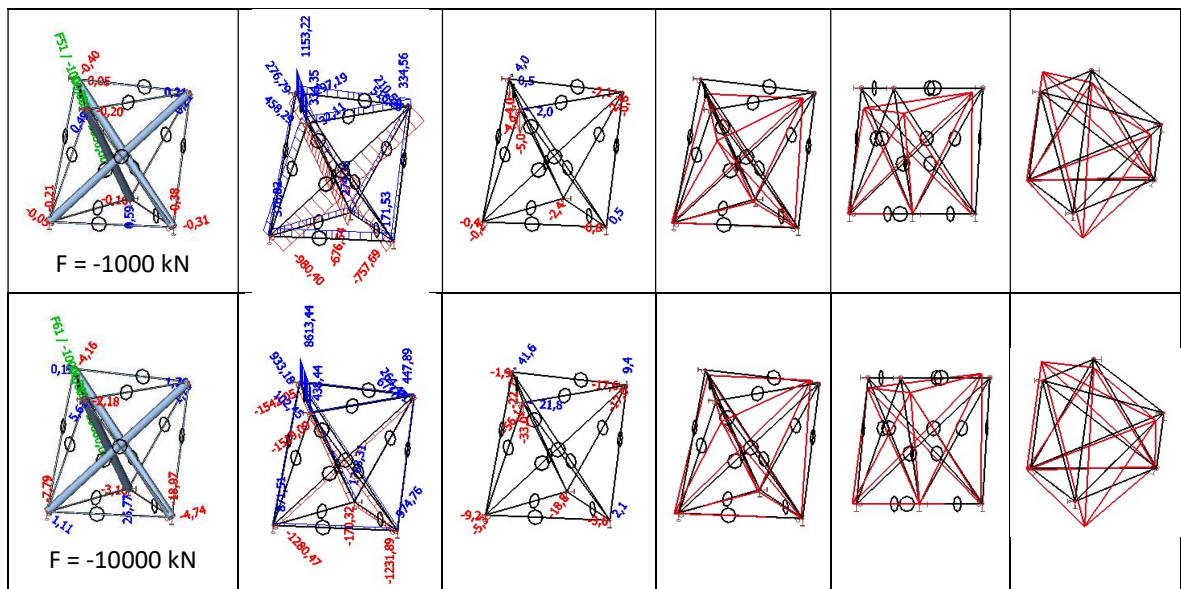
Tab. 3.16b Stlačení horního vodorovného táhla - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 500 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -1000 kN					



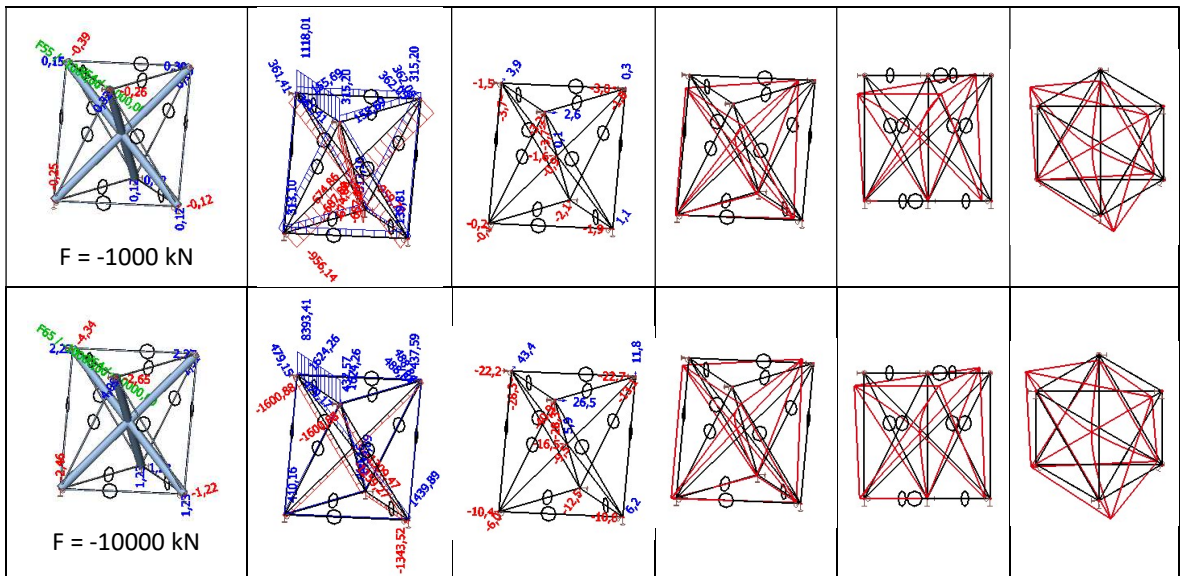
Tab. 3.16c Stlačení horního vodorovného táhla – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					



Tab. 3.16d Stlačení horního vodorovného táhla – předpjatý antihranol

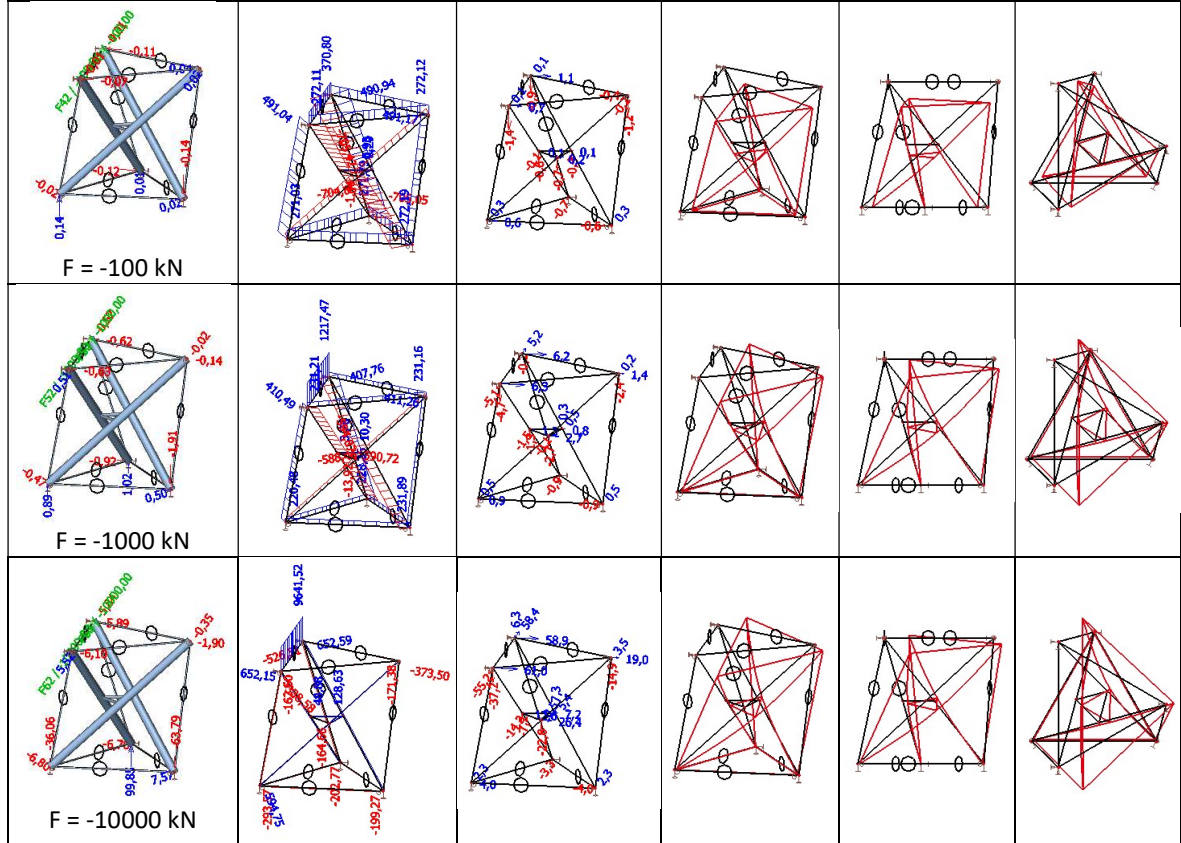
Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F4 / 100,00</p>					
<p>F5 / 500,00</p>					
Záporné zatížení					
<p>F5 / -100</p>					



Tab. 3.16e Stlačení horního vodorovného táhla – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					

Záporné zatížení



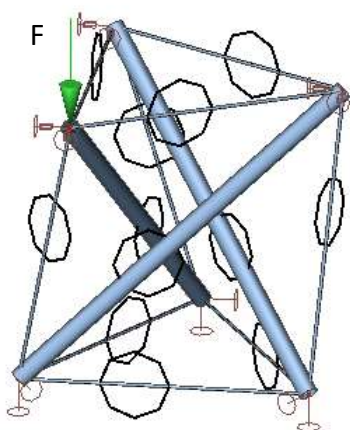
3.2.3.8 Stlačení svislého táhla

Viz model DIP 002-02-02mn a následující tabulky, obrázky a grafy.

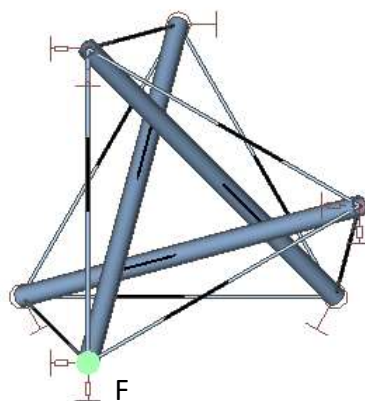
U tohoto zatížení dochází ke globální ztrátě stability, když je kladné.

Je zde stejný vztah mezi zatížením, teplotou a stabilitou jako v kapitole 3.2.3.6.

Při velkém záporném zatížení dojde k vymizení tahu ve všech táhlech kromě natahovaného svislého táhla.



Obr. 3.67a Schéma zatížení – axonometrie

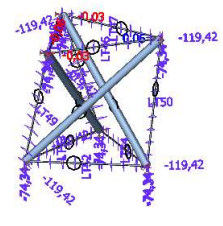
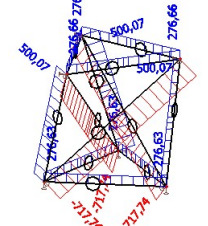
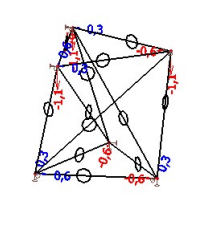
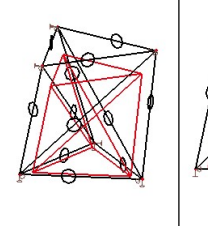
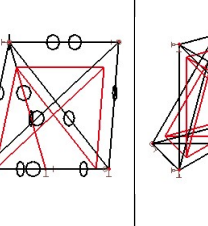
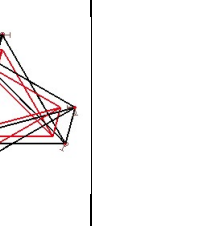
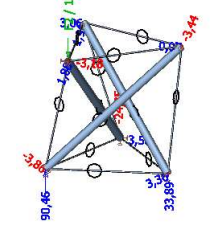
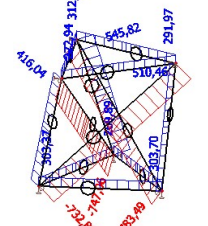
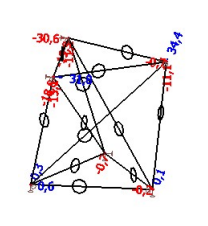
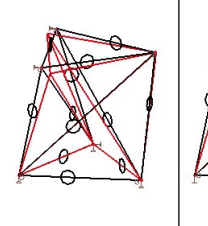
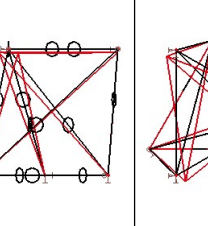
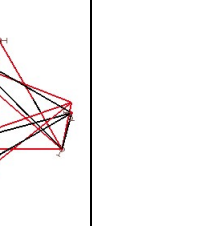
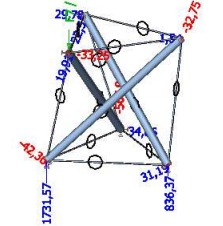
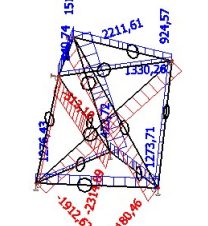
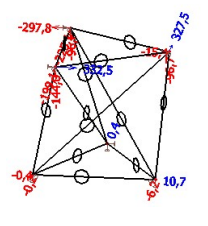
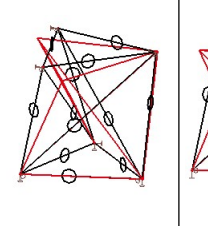
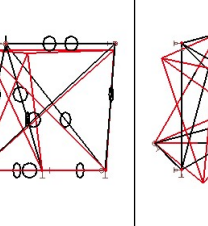
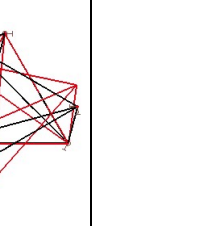
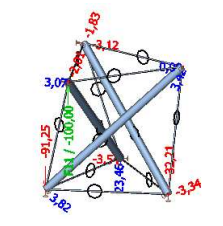
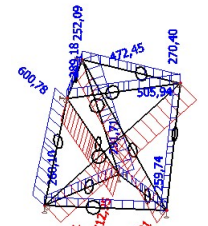
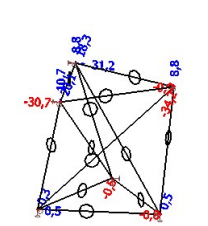
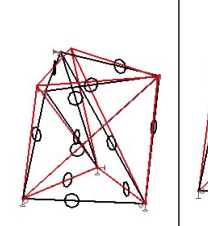
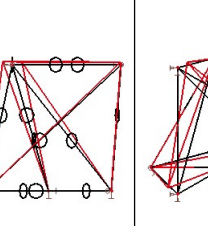
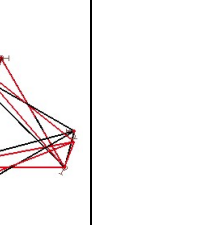
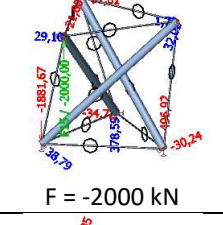
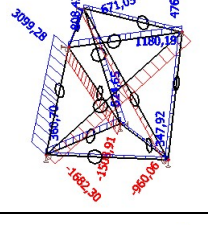
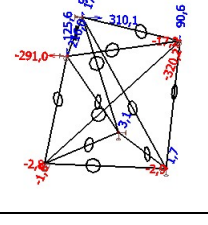
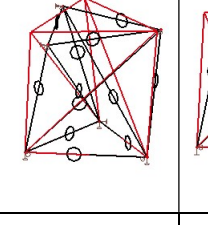
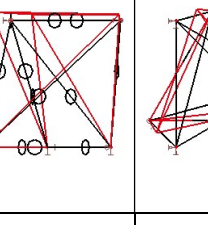
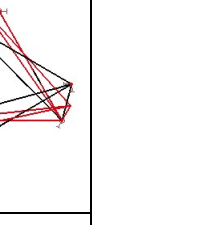
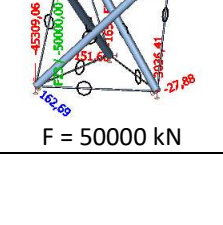
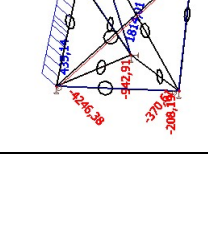
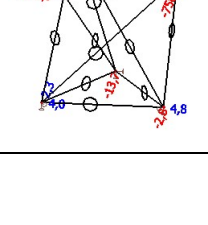
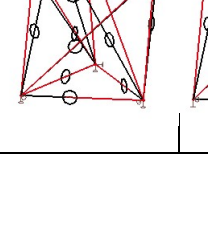
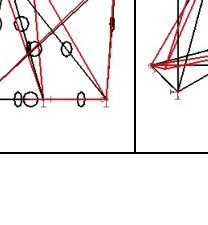
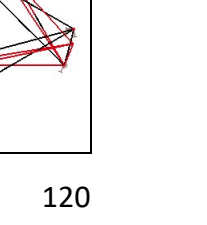


Obr. 3.67b Schéma zatížení – pohled shora

Tab. 3.17a Stlačení svislého táhla - nepředpjatý simplex

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 2000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -2000 kN</p>					
<p>F = -5000 kN</p>					

Tab. 3.17b Stlačení svislého táhla - předpjatý simplex (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 2000 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -2000 kN					
 F = 50000 kN					

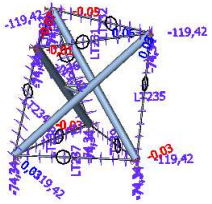
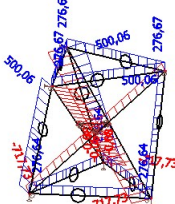
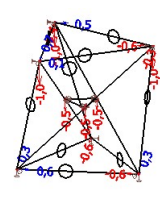
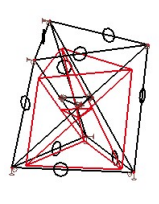
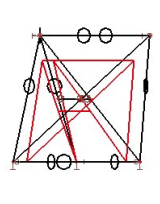
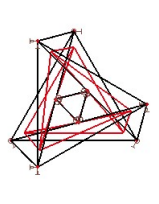
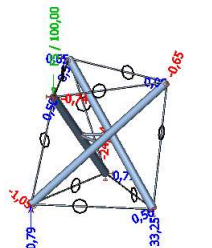
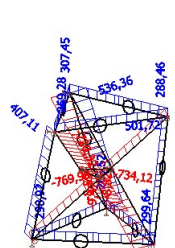
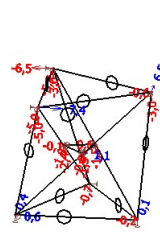
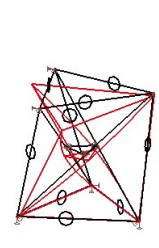
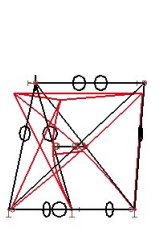
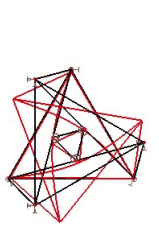
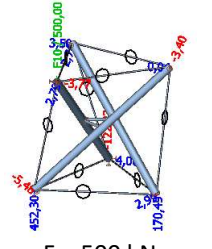
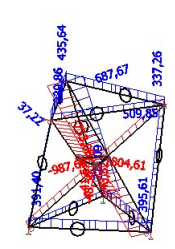
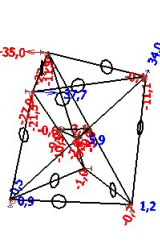
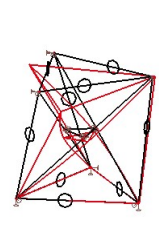
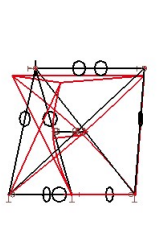
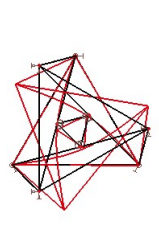
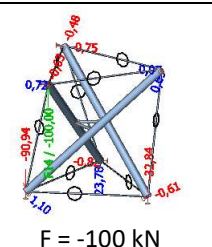
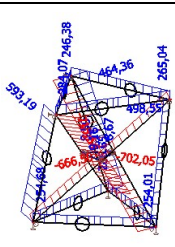
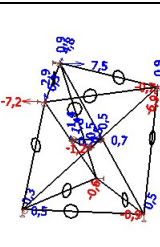
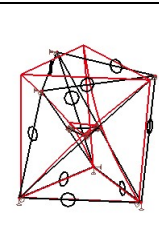
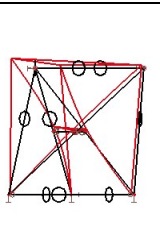
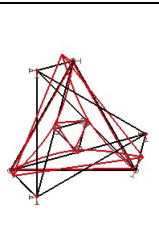
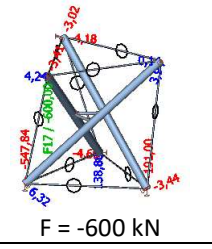
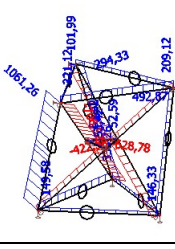
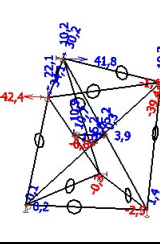
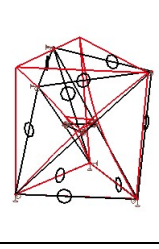
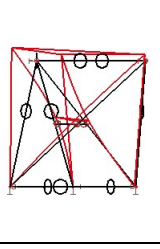
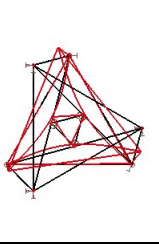
Tab. 3.17c Stlačení svislého táhla – předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
F = 100 kN					
F = 1000 kN					
Záporné zatížení					
F = -100 kN					
F = -2000 kN					

Tab. 3.17d Stlačení svislého táhla – předpjatý antihranol

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
Kladné zatížení:					
<p>F = 100 kN</p>					
<p>F = 1000 kN</p>					
Záporné zatížení					
<p>F = -100 kN</p>					
<p>F = -2000 kN</p>					

Tab. 3.17e Stlačení svislého táhla – předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)

Zatížení a reakce [kN]	Normálové síly [kN]	Posuny [mm]	Deformace axonometrie	Deformace pohled z boku	Deformace pohled shora
Předpětí:					
					
Kladné zatížení:					
 F = 100 kN					
 F = 500 kN					
Záporné zatížení					
 F = -100 kN					
 F = -600 kN					

3.2.3.9 Zatížení teplotními změnami

Viz model DIP 002-02-02qr.

Při rovnoměrném ohřátí nebo ochlazení celé konstrukce nedojde ke změně vnitřních sil u žádné ze zkoumaných konstrukcí, dokonce ani při ohřátí/ochlazení o 1000°C. Při ohřátí/ochlazení o 1000°C se vnitřní síly změní max. o 1%, což považuji za zanedbatelné. Tato změna max. o 1% je pravděpodobně způsobena němými podporami.

Při ohřátí jakékoliv kombinace vzpěr a/nebo ochlazení jakékoliv kombinace táhel dochází k předpětí simplexu.

Při ochlazení jakékoliv kombinace vzpěr a/nebo ohřátí jakékoliv kombinace táhel dochází ke ztrátě stability u nepředpjatého simplexu a při dostatečně velkých teplotních změnách i u předpjatého simplexu, protože dojde k vymizení předpětí.

3.2.4 Dynamika

Viz modely DIP 002-02-02ab5.

Tensegrity konstrukce nemají konstantní tuhost. Tuhost závisí na zatížení/deformacích. Proto tensegrity konstrukce nemají ani konstantní vlastní frekvence kmitání, které závisí na těchto proměnných tuhostech. V této kapitole jsem provedl výpočty vlastních frekvencí kmitání a příslušných vlastních tvarů kmitání pro geometrické tuhosti od předpětí zadáním zatěžovacího stavu předpětí jako počátečního napětí v řešiči programu.

U nepředpjatého simplexu je první vlastní frekvence kmitání prakticky nulová, protože je nulová geometrická tuhost v kroucení. Při zatížení nepředpjatého simplexu sice dojde k přirozenému předpětí, ale výpočet s tímto zatěžovacím stavem jako s počátečním napětím selhal.

Předpjatý simplex má nenulovou geometrickou tuhost, která je tím větší, čím je větší předpětí, proto se první vlastní frekvence zvyšuje s předpětím.

U neztuženého simplexu je prvním vlastním tvarem kroucení a druhým a třetím vlastním tvarem je naklánění.

U simplexu se ztužujícími táhly a u antihranolu je tuhost v kroucení tak vysoká, že kroucení odpovídá až třetímu vlastnímu tvaru/frekvenci. První a druhý vlastní tvar je naklánění.

U simplexu ztuženého trojúhelníkem zůstává prvním vlastním tvarem kroucení a druhým a třetím vlastním tvarem je pohyb trojúhelníku s průhybem vzpěr. Díky vyšší tuhosti v kroucení je vyšší první vlastní frekvence.

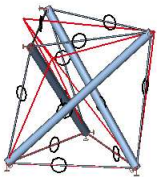
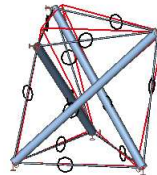
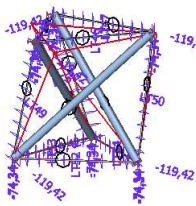
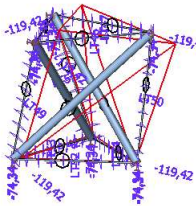
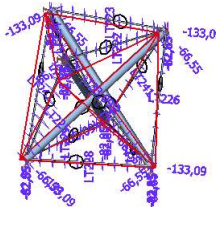
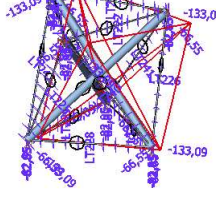
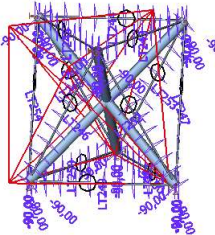
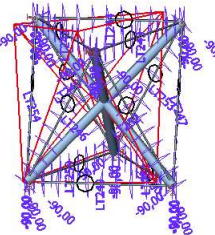
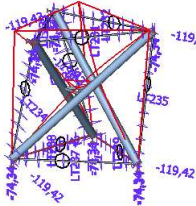
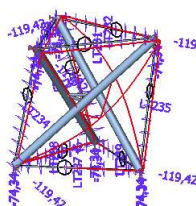
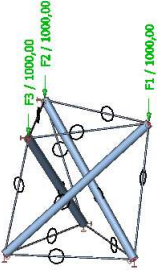
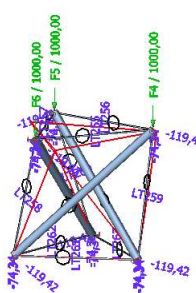
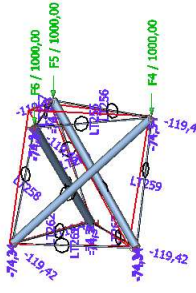
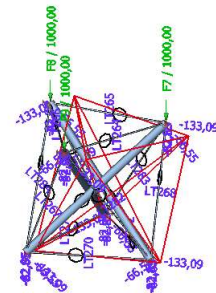
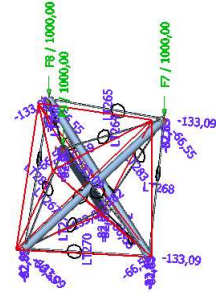
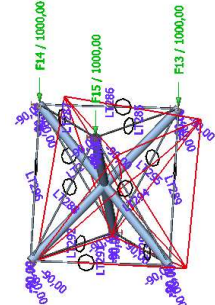
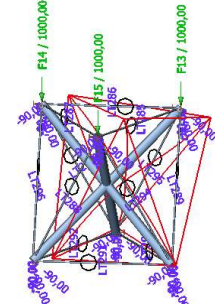
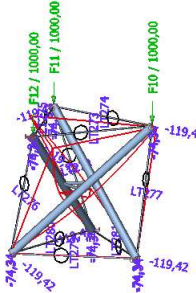
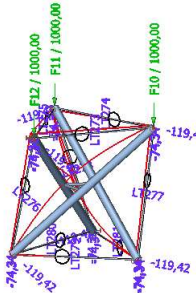
Pokud do zatěžovacího stavu předpětí, který používám při výpočtu jako počáteční napětí pro zajištění geometrické tuhosti, přidám svislé zatížení, změní se vlastní frekvence. V tomto případě se všechny vlastní frekvence snížily. U jiných zatížení by to mohlo být jinak. To, že se všechny vlastní frekvence snížily, by mohlo být příčinou toho, proč nešel spočítat nepředpjatý simplex s tímto počátečním napětím (nulová frekvence už nejde více snížit).

To, že se přidáním zatížení vlastní frekvence snížily, je velice podivné, protože z analýzy v kapitole 3.2.3 vyplývá, že se zvyšujícím se zatížením roste tuhost tensegrity konstrukce. Když roste tuhost, měly by růst vlastní frekvence. Je velmi podivné, že se to děje obráceně. **Musím tedy prohlásit, že si nejsem jistý, zda jsou výsledky z programu správné.**

Ještě mě napadlo, že by zvyšování tuhosti se zvyšujícím se zatížením mohlo platit pouze pro to zatížení, které se zvyšuje, ale pro jiná zatížení, která by působila v kombinaci (např. kroucení trojicí sil) by to platit nemuselo. U tensegrity konstrukcí neplatí princip superpozice a to se projeví při kombinacích zatížení. Vysvětlením snížení vlastní frekvence v kroucení by mohlo být následující chování tensegrity simplexu, pokud by takové chování bylo pravdivé: Když se zvýší svislé zatížení, zvýší se tím tuhost v kroucení

od svislého zatížení, ale může se tím zároveň snížit tuhost v kroucení od zatížení kroucením trojicí sil. To by vysvětlovalo snížení vlastní frekvence. Toto chování nebude v této diplomové práci zkoumat, protože to přesahuje její rozsah. Bylo by dobré, kdyby někdo udělal podrobněji analýzu, kterou jsem udělal v kapitole 3.2.3. Bylo by dobré prozkoumat chování při kombinacích zatížení, a tím potvrdit nebo vyloučit toto chování.

Tab. 3.18 Vlastní tvary a frekvence kmitání

Nepředpjatý simplex	Předpjatý simplex (Nts = 500 kN)	Předpjatý simplex se ztužujícími táhly (Nts = 500 kN)	Předpjatý antihranol	Předpjatý simplex ztužený trojúhelníkem (Nts = 500 kN)
 <p>f1 = 0,06 Hz</p>  <p>f2 = 20,42 Hz</p>	 <p>f1 = 2,60 Hz</p>  <p>f2 = 20,43 Hz</p>	 <p>f1 = 23,28 Hz</p>  <p>f2 = 23,28 Hz</p>	 <p>f1 = 25,83 Hz</p>  <p>f2 = 25,83 Hz</p>	 <p>f1 = 9,28 Hz</p>  <p>f2 = 13,11 Hz</p>
 <p>nejde spočítat – singulární matice</p>	 <p>f1 = 2,43 Hz</p>  <p>f2 = 20,31 Hz</p>	 <p>f1 = 23,20 Hz</p>  <p>f2 = 23,20 Hz</p>	 <p>f1 = 25,75 Hz</p>  <p>f2 = 25,75 Hz</p>	 <p>f1 = 8,58 Hz</p>  <p>f2 = 11,97 Hz</p>

3.3 Soustavy simplexů

V této kapitole prozkoumám chování složitějších konstrukcí, které vzniknou pospojováním více simplexů dohromady. Zároveň zde vyzkouším několik způsobů, jak zvýšit tuhost těchto soustav a vyberu ten nejlepší, který následně použiju v kapitole 4.

Původně jsem chtěl vyzkoušet soustavy simplexů, které se dají použít jako nosné konstrukce pro věže, lávky a střechy. Protože prozkoumání všech těchto konstrukcí by přesahovalo rozsah diplomové práce, vybral jsem si pouze věže.

Vyberu nejlepší konstrukční řešení pro věž a v kapitole 4 toto řešení použiju pro návrh tensegrity rozhledny.

3.3.1 Věže

Tuto kapitolu jsem rozdělil na tři části.

V první části vyzkouším způsob, jak simplexu spojit do věží.

Ve druhé části najdu nejvhodnější konstrukční řešení z hlediska MSÚ (mezních stavů únosnosti) a MSP (mezních stavů použitelnosti).

Ve třetí části najdu maximální výšku věže, při které věž ještě vyhovuje na MSÚ a MSP, pokud bude použita jako nosná konstrukce rozhledny.

3.3.1.1 Nalezení způsobu, jak spojit simplexu

Budu používat 2 způsoby:

- spojování typu Rostock
- spojování typu Needle Tower

Spojování typu Rostock – nečistá tensegrity konstrukce:

Viz kapitola 2.2 - Warnow Tower in Rostock.

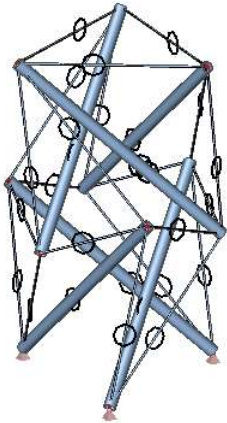
Spojování typu Needle Tower – čistá tensegrity konstrukce:

Viz kapitola 2.2 - Needle Tower II.

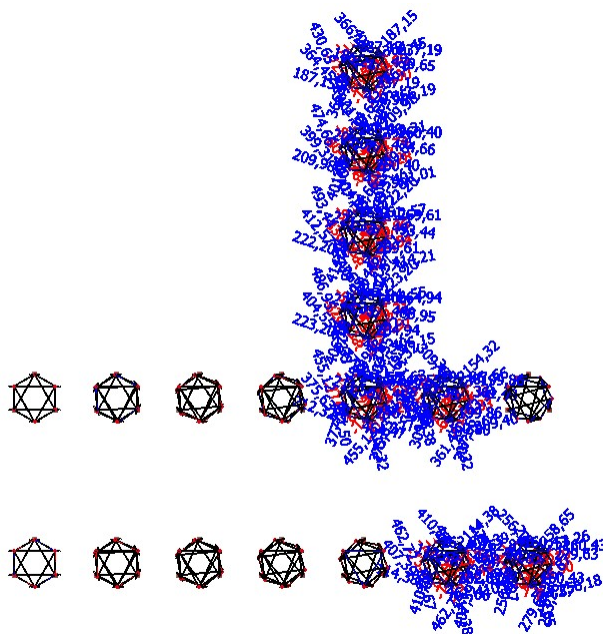
Přidáním spojovacích táhel (která jsou nutná pro zajištění statické určitosti konstrukce) se změní úhel vzájemného pootočení podstav α , při kterém má konstrukce tvar infinitezimálního mechanismu a lze ji předepnout. Spojovací táhla zmenšují tento úhel, protože svým působením krotí podstavy vůči sobě opačným směrem, než je úhel α . Zjistil jsem, že úhel α závisí na více parametrech, jako je např. zapuštění simplexů do sebe, nebo poměr výšky a šířky simplexu. U dvacetistěnu je úhel $\alpha = 0^\circ$. Je to díky poměru šířek dolní a horní podstavy, to je tedy další parametr, na kterém závisí úhel α . Pokud nepoužiju

metodu hledání self-equilibrium z knihy [3], kterou jsem nestihl pořádně nastudovat, nemám žádný způsob, jak tento úhel rychle najít. Nezbyvá mi tedy nic jiného, než vyzkoušet všechny úhly, a ten, u kterého lze konstrukci předepnout, a vycházejí u něj při stejném ochlazení největší vnitřní síly a nejmenší posuny, je ten správný. Je to stejná metoda, kterou jsem ověřil správnost úhlu $\alpha = 30^\circ$ u simplexu v kapitole 3.2.1 obr. 3.10.

Nejdříve jsem tuto metodu použil pro nalezení úhlu α při spojení dvou simplexů, viz obr. 3.68, obr. 3.69 a model DIP 003-00-02. Zde vyšel $\alpha = 22^\circ$. Později, když jsem spojoval více simplexů dohromady, jsem zjistil, že úhel α závisí i na počtu spojovaných simplexů. Pro vyšší věž jsem tedy úhel α musel hledat znovu.



Obr. 3.68 Spojení dvou protisměrných simplexů. Při rozšíření společného šestiúhelníku, zvětšení zapuštění a snížením úhlu α na 0° by vznikl tensegrity icosahedron (dvacetistěn).



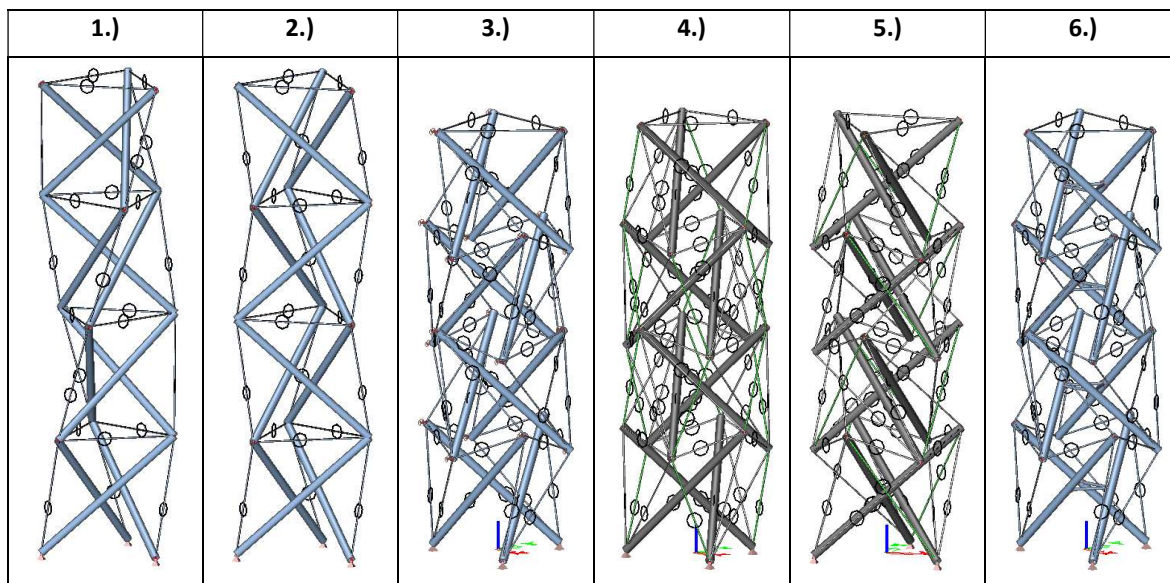
Obr. 3.69 Hledání úhlu α . Úhly rostou zleva doprava od 0° do 30° po 5° . Ve sloupci u první řady rostou úhly směrem nahoru od 20° do 25° po 1° pro nalezení úhlu α s přesností na 1° . V horní řadě je zapuštění simplexů 1 m (simplexy jsou široké i vysoké 5 m). V dolní řadě je zapuštění simplexů 0,5 m. Je vidět, že úhel α závisí i na velikosti zapuštění simplexů do sebe.

3.3.1.2 Výběr nejvhodnějšího konstrukčního řešení

V této části budu zkoumat tyto konstrukce (viz tab. 3.19):

- 1.) Věž typu Rostock – stejnosměrné simplexý (viz model DIP 003-01)
- 2.) Věž typu Rostock – protisměrné simplexý (viz model DIP 003-02)
- 3.) Věž typu Needle Tower – neztužená, $\alpha = 18^\circ$ (viz model DIP 003-03)
- 4.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícími spojovacími táhly, $\alpha = 30^\circ$ (viz model DIP 003-04)
- 5.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícími simplexovými táhly, $\alpha = 45^\circ$ (viz model DIP 003-05)
- 6.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícím trojúhelníkem, $\alpha = 18^\circ$ (viz model DIP 003-07)

Tab. 3.19 Zkoumané konstrukce



Všechny konstrukce jsou sestaveny ze simplexů, které mají stejné rozměry a průřezy jako simplexý, které jsem zkoumal v kapitole 3.2. Věže 1.) a 2.) jsou tedy vysoké 20 m. Věže 3.) - 6.) mají zapuštění simplexů 1 m, a proto jsou vysoké jen 17 m.

U konstrukcí 4.) a 5.) jsou ztužující táhla zobrazena zeleně. U konstrukce 4.) se jedná o dodatečná spojovací táhla mezi simplexý. U konstrukce 5.) se jedná o ztužující šikmá táhla v simplexech jako u konstrukce „simplex se ztužujícími táhly“ na obr. 3.7 v kapitole 3.2.

Konstrukce 4.) a 5.) jsou staticky neurčitě a proto si můžu úhel α zvolit. Provedl jsem podobný výpočet jako na obr. 3.69, abych zjistil, jak se konstrukce při různých úhlech α chovají, pro které úhly α fungují a pro které ne, a abych dokázal zvolit nejvhodnější úhel α .

U staticky neurčitých konstrukcí 4.) a 5.) se po zvolení úhlu α musí ještě vhodně zvolit poměr předpětí skupin táhel tak, aby při předpětí nedošlo ke zkroucení konstrukce. U konstrukcí v této kapitole jsem provedl naladění těchto poměrů předpětí jen nahruho, abych tím neztrácel moc času. Pro rozhodnutí o nejvhodnější konstrukci to výsledky ovlivňuje zanedbatelně.

Staticky neurčitě konstrukce 4.) a 5.) se dají spočítat bez němých podpor, protože neobsahují žádný infinitezimální mechanismus.

Konstrukce jsem zatěžoval následujícími zatíženími a kombinacemi zatížení:

Zatížení (viz následující tabulky):

- v – vodorovné
- s1 – svislé1 (centrické)
- s2 – svislé2 (excentrické)

Kombinace zatížení:

- v
- s1
- s2
- v+s1
- v+s2

Věže se spojováním typu Needle Tower jsou nižší, ale zatížení větrem působící ve styčnicích jsem uvažoval stejné jako u věží se spojováním typu Rostock, protože plocha, na kterou působí vítr, je stejná.

Pro konstrukci rozhledny v kapitole 4 chci zvolit spojování typu Needle Tower, použít tedy čistou tensegrity konstrukci a dokázat, že i čistá tensegrity konstrukce může vyhovět na MSÚ a MSP.

V následujících tabulkách jsou výsledky výpočtů.

Z výsledků vyplývá:

Nejvhodnější z hlediska MSÚ a MSP jsou konstrukce 4.) a 5.).

Konstrukce 4.) se ztužujícími spojovacími táhly je nejvhodnější z hlediska MSP (nejmenší deformace (nejvyšší tuhosti) a nejvyšší vlastní frekvence kmitání).

Z hlediska MSÚ není jasné, zda je vhodnější konstrukce 4.) nebo 5.). U konstrukce 5.) se simplexovými táhly dojde později k vymizení tahu v táhlech, ale vznikají větší normálové síly ve vzpěrách.

Výhodou konstrukce 5.) oproti konstrukci 4.) je kromě pozdějšího vymizení tahu navíc to, že obsahuje méně táhel.

Zdá se, že předpětí nemá vliv na vodorovnou tuhost. To jsem dosud nevěděl, protože výzkum v kapitole 3.2 není dostatečně podrobný pro všechna zatížení.

1.) Věž typu Rostock – stejnosměrné simplexy (viz model DIP 003-01)

Tab. 3.20a Věž typu Rostock – stejnosměrné simplexy – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]

Tab. 3.20b Věž typu Rostock – stejnosměrné simplex – obálka odezvy

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů My ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů Mz ve vzpěrách [kNm]

Tab. 3.20c Věž typu Rostock – stejnosměrné simplex – vlastní tvary a frekvence kmitání

1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
f1 = 1,56 Hz	f2 = 3,16 Hz	f3 = 3,16 Hz	f4 = 3,53 Hz	f5 = 4,09 Hz

2.) Věž typu Rostock – protisměrné simplexý (viz model DIP 003-02)

Tab. 3.21a Věž typu Rostock – protisměrné simplexý – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]

Tab. 3.21b Věž typu Rostock – protisměrné simplexý – obálka odezvy

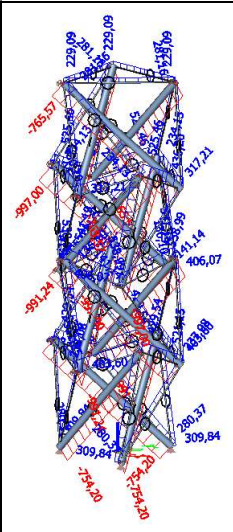
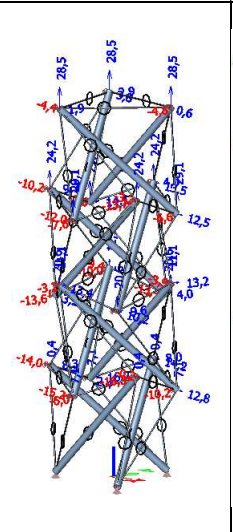
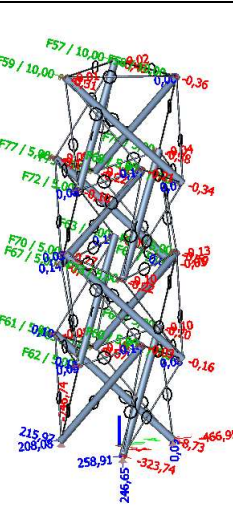
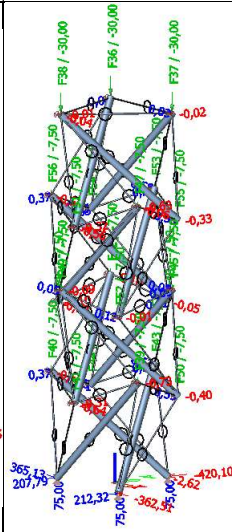
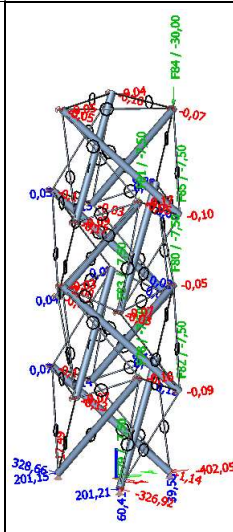
Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů My ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů Mz ve vzpěrách [kNm]

Tab. 3.21c Věž typu Rostock – protisměrné simplexý – vlastní tvary a frekvence kmitání

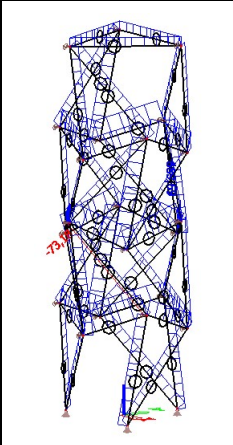
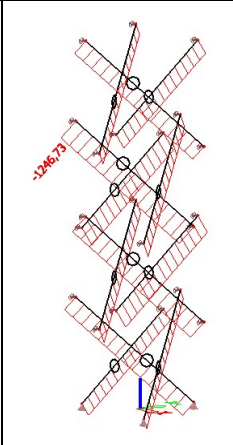
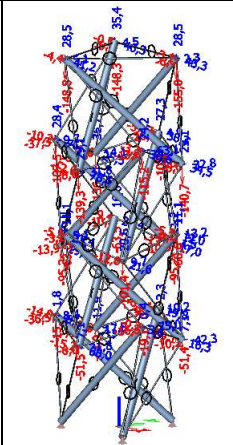
1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
f1 = 1,52 Hz	f2 = 2,94 Hz	f3 = 2,94 Hz	f4 = 2,97 Hz	f5 = 3,87 Hz

3.) Věž typu Needle Tower – neztužená, $\alpha = 18^\circ$ (viz model DIP 003-03)

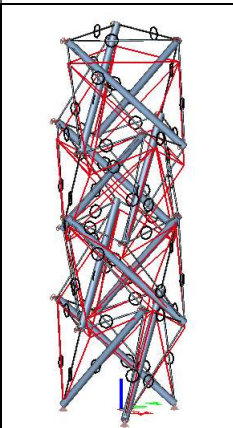
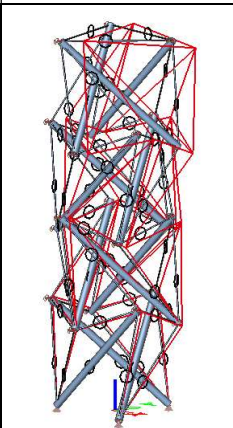
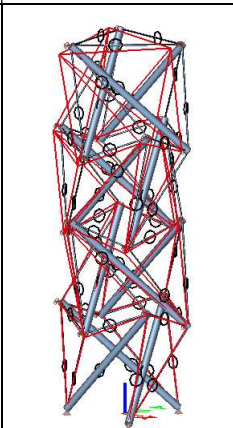
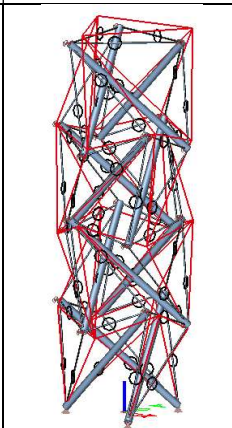
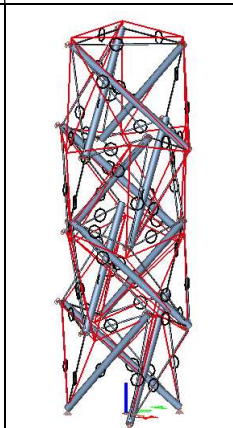
Tab. 3.22a Věž typu Needle Tower – neztužená, $\alpha = 18^\circ$ – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]
				

Tab. 3.22b Věž typu Needle Tower – neztužená, $\alpha = 18^\circ$ – obálka odezvy

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů M_y ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů M_z ve vzpěrách [kNm]
			nevznikají	nevznikají

Tab. 3.22c Věž typu Needle Tower – neztužená, $\alpha = 18^\circ$ – vlastní tvary a frekvence kmitání

1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
				
f1 = 1,43 Hz	f2 = 3,31 Hz	f3 = 3,31 Hz	f4 = 4,88 Hz	f5 = 7,07 Hz

4.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícími spojovacími táhly, $\alpha = 30^\circ$ (viz model DIP 003-04)

Tab. 3.23a Věž typu Needle Tower – se ztužujícími spojovacími táhly, $\alpha = 30^\circ$ – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]

Tab. 3.23b Věž typu Needle Tower – se ztužujícími spojovacími táhly, $\alpha = 30^\circ$ – obálka odezvy

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů M_y ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů M_z ve vzpěrách [kNm]
			nevznikají	nevznikají

Tab. 3.23c Věž typu Needle Tower – se ztužujícími spojovacími táhly, $\alpha = 30^\circ$ – vlastní tvary a frekvence kmitání

1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
$f_1 = 5,18 \text{ Hz}$	$f_2 = 5,18 \text{ Hz}$	$f_3 = 11,33 \text{ Hz}$	$f_4 = 21,38 \text{ Hz}$	$f_5 = 21,38 \text{ Hz}$

5.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícími simplexovými táhly, $\alpha = 45^\circ$ (viz model DIP 003-05)

Tab. 3.24a Věž typu Needle Tower – se ztužujícími simplexovými táhly, $\alpha = 45^\circ$ – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]

Tab. 3.24b Věž typu Needle Tower – se ztužujícími simplexovými táhly, $\alpha = 45^\circ$ – obálka odezvy

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů M_y ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů M_z ve vzpěrách [kNm]
			nevznikají	nevznikají

Tab. 3.24c Věž typu Needle Tower – se ztužujícími simplexovými táhly, $\alpha = 45^\circ$ – vlastní tvary a frekvence kmitání

1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
f1 = 3,55 Hz	f2 = 3,55 Hz	f3 = 9,39 Hz	f4 = 13,20 Hz	f5 = 15,50 Hz

6.) Věž typu Needle Tower – se ztužujícím trojúhelníkem, $\alpha = 18^\circ$ (viz model DIP 003-07)

Tab. 3.25a Věž typu Needle Tower – se ztužujícím trojúhelníkem, $\alpha = 18^\circ$ – zatížení

Normálové síly od předpětí [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]

Tab. 3.25b Věž typu Needle Tower – se ztužujícím trojúhelníkem, $\alpha = 18^\circ$ – obálka odezvy

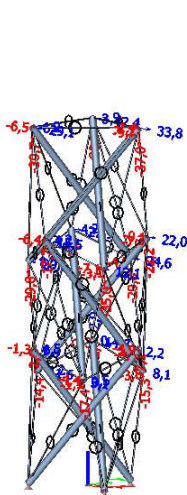
Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	Obálka ohybových momentů M_y ve vzpěrách [kNm]	Obálka ohybových momentů M_z ve vzpěrách [kNm]

Tab. 3.25c Věž typu Needle Tower – se ztužujícím trojúhelníkem, $\alpha = 18^\circ$ – vlastní tvary a frekvence kmitání

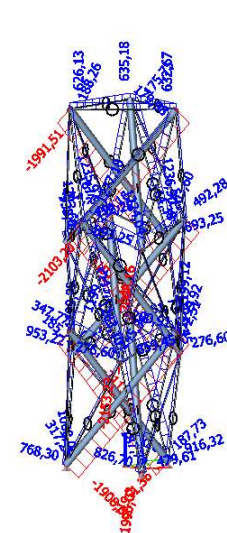
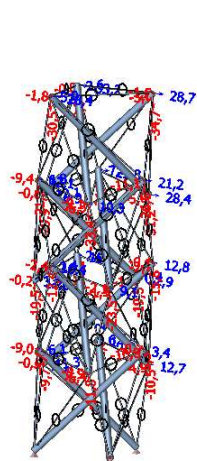
1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
 f1 = 3,28 Hz	 f2 = 3,28 Hz	 f3 = 3,74 Hz	 f4 = 7,17 Hz	 f5 = 10,60 Hz

3.3.1.3 Nalezení maximální výšky

Pro vysoké věže bude vhodné zvětšit poměr mezi výškou a šířkou (stranou trojúhelníkové podstavy) simplexu z 1.1 na 1,5:1. V modelu DIP 003-08 jsem ověřil, že tuhost konstrukce z takovýchto vyšších simplexů je jen o málo menší, viz obr. 3.70a. Dále jsem zjistil, že u těchto vyšších simplexů je menší poměr mezi silami ve vodorovných a svislých táhlech, což je příznivé, viz obr. 3.70b. Další výhodou vyšších simplexů je nižší hmotnost konstrukce věže. Drobnou nevýhodou je větší vzpěrná délka vzpěr.



Obr. 3.70a Vyšší simplex – obálka posunů [mm]



Obr. 3.70b Vyšší simplex – obálka normálových sil [kN]

Pokusil jsem se překonat rekord ve výšce tensegrity věže, proto jsem nedříve při návrhu zvolil výšku 70 m, abych překonal výšku věže v Rostocku 62,3 m. Zvětšil jsem půdorysné rozměry simplexu (stranu trojúhelníku podstavy jsem zvětšil z 5 m na 6 m) a výšku simplexu jsem zvolil jako 1,5 násobek šířky (strany trojúhelníku podstavy), tedy 9 m. Velikost zapuštění simplexů jsem nechal pětinu výšky simplexu, tedy 1,8 m. Průřez vzpěry jsem zvětšil na TR406x20 a průřez táhla na $d = 82$ mm. Věž vysokou necelých 70 m jsem vytvořil z **9 simplexů**. Výška věže je tedy $9 \cdot (9-1,8) + 1,8 = 66,6$ m. Viz modely DIP 003-11 a tab. 3.26a, tab. 3.26b.

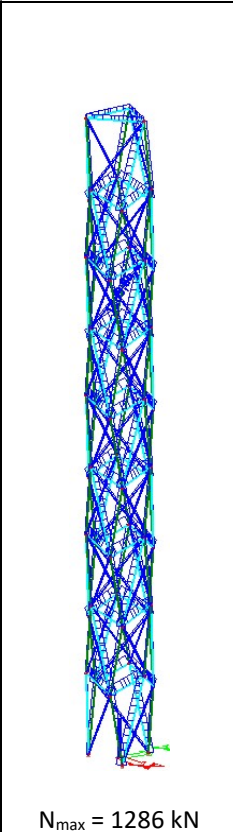
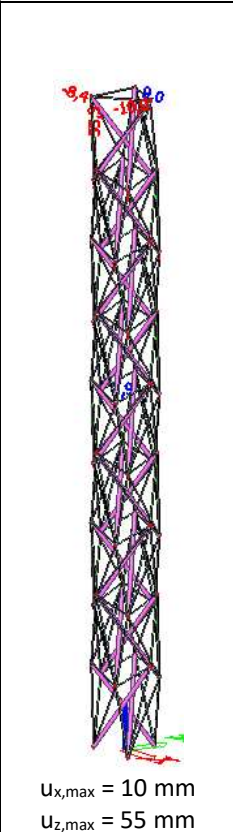
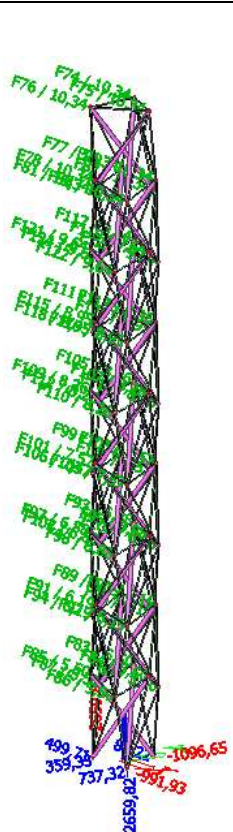
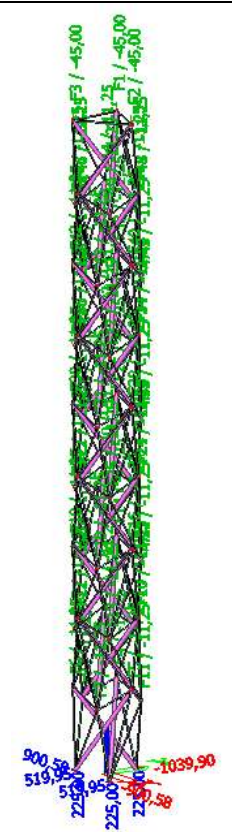
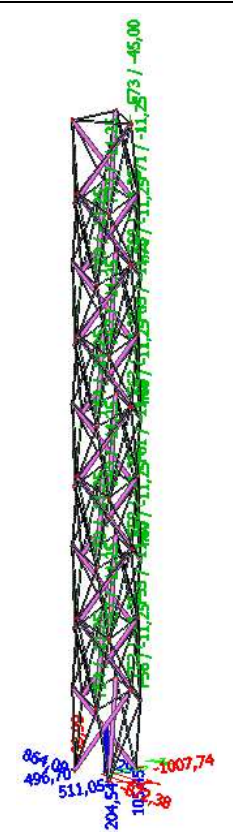
Vodorovné zatížení větrem (návrhové) jsem stanovil podle normy [6] stejným způsobem jako v kapitole 4. Svislé zatížení je odhad návrhového proměnného zatížení od vyhlídkové plošiny a schodiště ($5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ kN/m}^2$). Kombinace zatížení jsou stejné jako v předchozích výpočtech.

Protože jsem předpokládal, že budou rozhodující MSP, zvolil jsem typ konstrukce 4.) se spojovacími táhly. Úhel α jsem u této věže zvolil 40° .

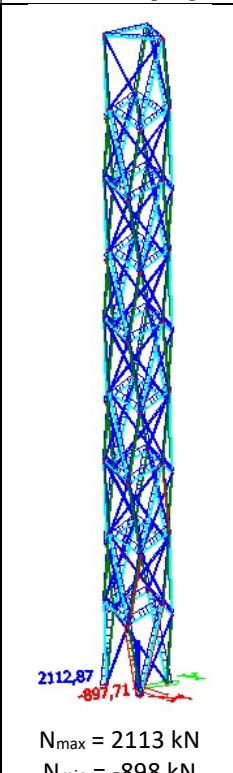
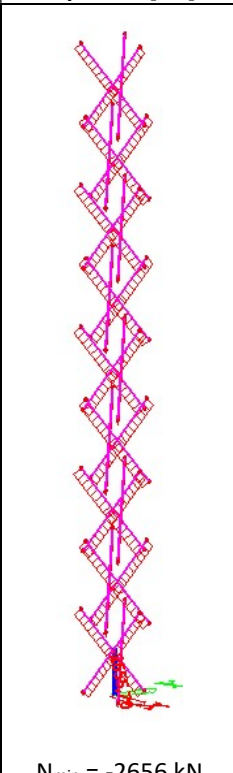
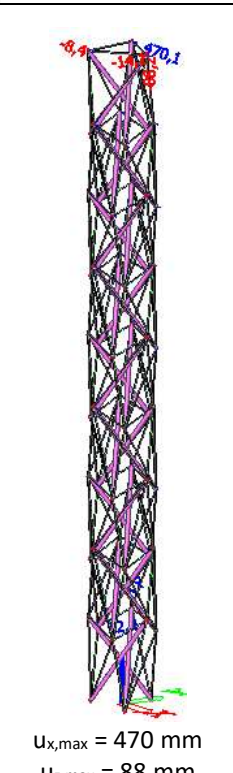
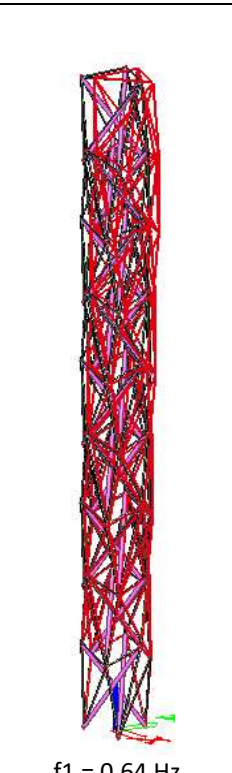
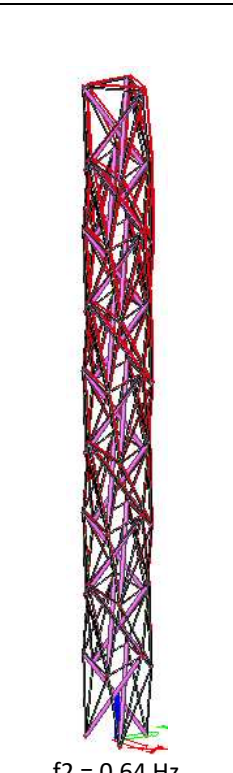
U obrázků v následujících tabulkách jsou použity tyto barvy:

- magenta – vzpěry
- tyrkysová – vodorovná a svislá táhla
- tmavě modrá – spojovací táhla nutná pro zajištění statické určitosti konstrukce
- zelená – ztužující táhla (spojovací nebo simplexová)

Tab. 3.26a Věž vysoká 66,6 m se spojovacími táhly – předpětí a zatížení

Normálové síly od předpětí v táhlech [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]
 <p>$N_{max} = 1286 \text{ kN}$</p>	 <p>$U_{x,max} = 10 \text{ mm}$ $U_{z,max} = 55 \text{ mm}$</p>			

Tab. 3.26b Věž vysoká 66,6 m se spojovacími táhly – odezva

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
 <p>$N_{max} = 2113 \text{ kN}$ $N_{min} = -898 \text{ kN}$</p>	 <p>$N_{min} = -2656 \text{ kN}$</p>	 <p>$U_{x,max} = 470 \text{ mm}$ $U_{z,max} = 88 \text{ mm}$</p>	 <p>$f_1 = 0,64 \text{ Hz}$</p>	 <p>$f_2 = 0,64 \text{ Hz}$</p>

U tohoto zjednodušeného výpočtu jsem neuvažoval vlastní tíhu konstrukce. Nicméně vypadá to, že na MSP by konstrukce vyhověla (je to na hraně), ale na MSÚ nevyhovuje. V některých táhlech vymizí tah. Problém s MSÚ se mi nedaří vyřešit ani změnou úhlu α , ani rozšířením půdorysu, ani změnou poměru předpětí nebo zvýšením předpětí (navíc předpětí už moc zvyšovat nemůžu kvůli únosnosti průřezů a táhla už zesilovat nechci, protože taková konstrukce už by postrádala výhody tensegrity konstrukce – nízkou hmotnost, krásu atd.). Změnou konstrukčního řešení (použitím simplexových táhel místo spojovacích táhel) by došlo ke zdvojnásobení deformací a konstrukce by nevyhověla na MSP.

Když jsem provedl výpočet s vyloučeným tlakem v táhlech, výpočet selhal, protože vymizel tah v tolika táhlech, že konstrukce přestala být stabilní. Když jsem zvýšil předpětí a znova jsem provedl výpočet s vyloučeným tlakem v táhlech, vymizel tah v menším počtu táhel a konstrukce zůstala stabilní, ale vymizením tahu v těchto táhlech se snížila tuhost konstrukce a ta pak nevyhověla na MSP.

Možná, že by se mi povedlo navrhnout čistou tensegrity věž vysokou 66,6 m, která vyhoví na MSÚ a MSP, ale potřeboval bych na to víc času, protože bych musel udělat rozsáhlejší parametrickou studii pro nalezení nejvhodnějšího konstrukčního řešení.

V této práci tedy udělám závěr, že **čistou tensegrity věž vysokou 66,6 m, která by vyhovovala na MSÚ a MSP, pokud má sloužit jako nosná konstrukce rozhledny, nedokážu navrhnout.**

Musím tedy výšku snížit. Další pokus je věž vysoká 52,2 m. Skok ze 66,6 m na 52,2 m jsem odhadl podle výsledků z předchozího výpočtu a ze vztahů mezi výškami věží a deformacemi (čtvrté mocniny délek atd.).

Rozměry simplexů, zapuštění a průřezy jsou stejné jako u předchozí věže. Úhel α zůstává 40°. Zatížení je stejné (kromě zatížení větrem, které se zmenšilo, když se zmenšila výška věže), a přidal jsem zatížení od vlastní tíhy, které jsem přidal do příslušných kombinací. Výsledky od předpětí jsou včetně vlastní tíhy. Věž je sestavená ze **7 simplexů**. Výška věže je tedy $7 \cdot (9 - 1,8) + 1,8 = 52,2$ m.

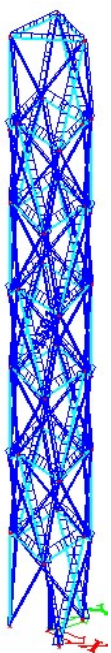

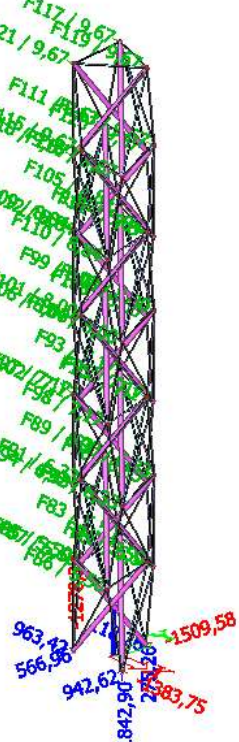
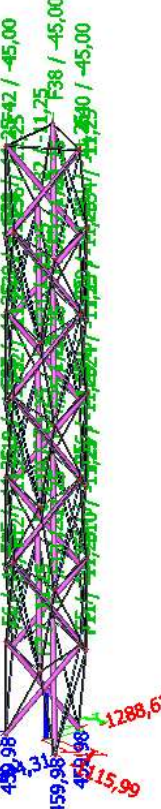
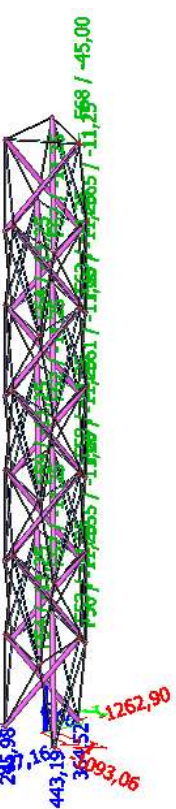
Protože si stále nejsem jistý, zda je vhodnější konstrukce se spojovacími táhly nebo konstrukce se simplexovými táhly, vyzkoušel jsem zde obě konstrukční řešení. Viz tab. 3.27a-3.28b a modely DIP 003-12 a DIP 003-13. U simplexových táhel je úhel $\alpha = 45^\circ$.

Výpočty jsem u obou modelů provedl s vyloučením tlaku v táhlech. To způsobí při vymizení tahu v některých táhlech snížení tuhosti pro další přírůstky zatížení. Ve výsledcích jsou tedy správné hodnoty posunů s vlivem vymizení tahu v táhlech.

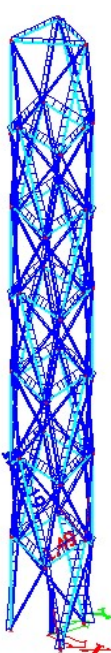
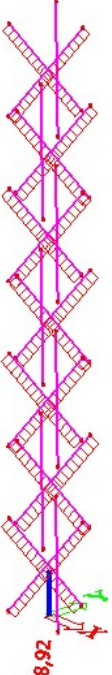
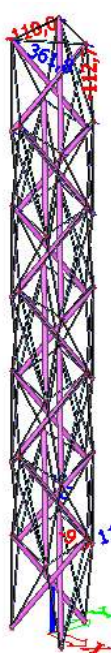

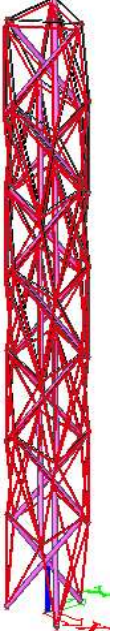
Z výsledků vyplývá, že varianta 4.) se spojovacími táhly je vhodnější z hlediska MSP i MSÚ. Tuto variantu použiju v kapitole 4 jako nosnou konstrukci rozhledny. Hmotnost věže je 84 t.

Protože MSÚ i MSP jsou na hraně, **považuji výšku 52,2 m za nalezenou maximální výšku.**

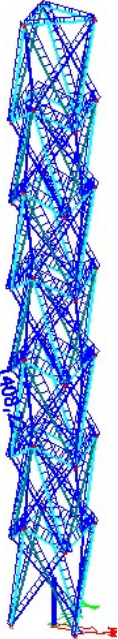


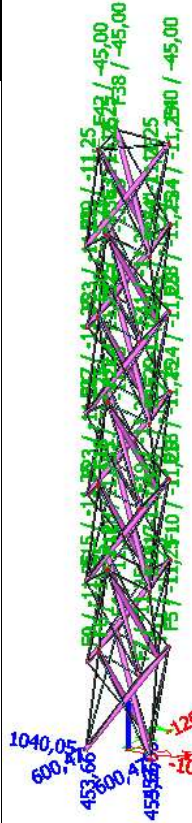
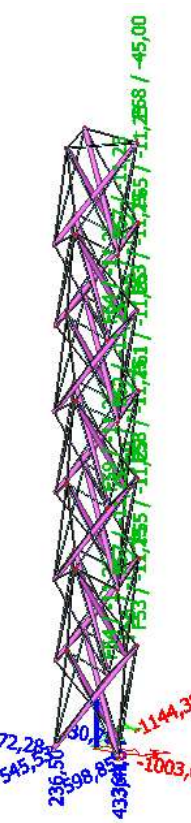
Tab. 3.27a Věž vysoká 52,2 m se spojovacími táhly – předpětí a zatížení

Normálové síly od předpětí v táhlech [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]
 <p>$N_{max} = 1592 \text{ kN}$</p>	 <p>$U_{x,max} = 9 \text{ mm}$ $U_{z,max} = 81 \text{ mm}$</p>	 <p> $F117 / 9,67$ $F119 / 9,67$ $F121 / 9,67$ $F111 / 11,25$ $F115 / 11,25$ $F105 / 11,25$ $F109 / 11,25$ $F110 / 11,25$ $F99 / 11,25$ $F103 / 11,25$ $F93 / 11,25$ $F107 / 11,25$ $F97 / 11,25$ $F83 / 11,25$ $F87 / 11,25$ $F86 / 11,25$ $F85 / 11,25$ $F84 / 11,25$ $F82 / 11,25$ $F81 / 11,25$ $F80 / 11,25$ $F79 / 11,25$ $F78 / 11,25$ $F77 / 11,25$ $F76 / 11,25$ $F75 / 11,25$ $F74 / 11,25$ $F73 / 11,25$ $F72 / 11,25$ $F71 / 11,25$ $F70 / 11,25$ $F69 / 11,25$ $F68 / 11,25$ $F67 / 11,25$ $F66 / 11,25$ $F65 / 11,25$ $F64 / 11,25$ $F63 / 11,25$ $F62 / 11,25$ $F61 / 11,25$ $F60 / 11,25$ $F59 / 11,25$ $F58 / 11,25$ $F57 / 11,25$ $F56 / 11,25$ $F55 / 11,25$ $F54 / 11,25$ $F53 / 11,25$ $F52 / 11,25$ $F51 / 11,25$ $F50 / 11,25$ $F49 / 11,25$ $F48 / 11,25$ $F47 / 11,25$ $F46 / 11,25$ $F45 / 11,25$ $F44 / 11,25$ $F43 / 11,25$ $F42 / 11,25$ $F41 / 11,25$ $F40 / 11,25$ $F39 / 11,25$ $F38 / 11,25$ $F37 / 11,25$ $F36 / 11,25$ $F35 / 11,25$ $F34 / 11,25$ $F33 / 11,25$ $F32 / 11,25$ $F31 / 11,25$ $F30 / 11,25$ $F29 / 11,25$ $F28 / 11,25$ $F27 / 11,25$ $F26 / 11,25$ $F25 / 11,25$ $F24 / 11,25$ $F23 / 11,25$ $F22 / 11,25$ $F21 / 11,25$ $F20 / 11,25$ $F19 / 11,25$ $F18 / 11,25$ $F17 / 11,25$ $F16 / 11,25$ $F15 / 11,25$ $F14 / 11,25$ $F13 / 11,25$ $F12 / 11,25$ $F11 / 11,25$ $F10 / 11,25$ $F9 / 11,25$ $F8 / 11,25$ $F7 / 11,25$ $F6 / 11,25$ $F5 / 11,25$ $F4 / 11,25$ $F3 / 11,25$ $F2 / 11,25$ $F1 / 11,25$ </p>	 <p> $F25 / 42 / -45,00$ $F24 / 42 / -45,00$ $F23 / 42 / -45,00$ $F22 / 42 / -45,00$ $F21 / 42 / -45,00$ $F20 / 42 / -45,00$ $F19 / 42 / -45,00$ $F18 / 42 / -45,00$ $F17 / 42 / -45,00$ $F16 / 42 / -45,00$ $F15 / 42 / -45,00$ $F14 / 42 / -45,00$ $F13 / 42 / -45,00$ $F12 / 42 / -45,00$ $F11 / 42 / -45,00$ $F10 / 42 / -45,00$ $F9 / 42 / -45,00$ $F8 / 42 / -45,00$ $F7 / 42 / -45,00$ $F6 / 42 / -45,00$ $F5 / 42 / -45,00$ $F4 / 42 / -45,00$ $F3 / 42 / -45,00$ $F2 / 42 / -45,00$ $F1 / 42 / -45,00$ </p>	 <p> $F25 / 42 / -45,00$ $F24 / 42 / -45,00$ $F23 / 42 / -45,00$ $F22 / 42 / -45,00$ $F21 / 42 / -45,00$ $F20 / 42 / -45,00$ $F19 / 42 / -45,00$ $F18 / 42 / -45,00$ $F17 / 42 / -45,00$ $F16 / 42 / -45,00$ $F15 / 42 / -45,00$ $F14 / 42 / -45,00$ $F13 / 42 / -45,00$ $F12 / 42 / -45,00$ $F11 / 42 / -45,00$ $F10 / 42 / -45,00$ $F9 / 42 / -45,00$ $F8 / 42 / -45,00$ $F7 / 42 / -45,00$ $F6 / 42 / -45,00$ $F5 / 42 / -45,00$ $F4 / 42 / -45,00$ $F3 / 42 / -45,00$ $F2 / 42 / -45,00$ $F1 / 42 / -45,00$ </p>

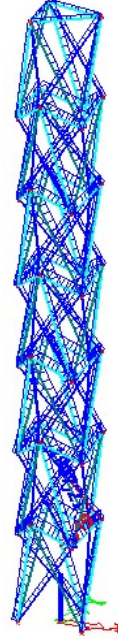
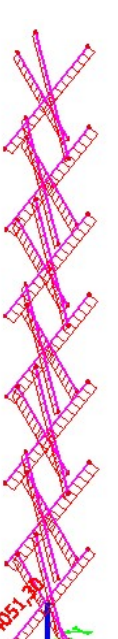
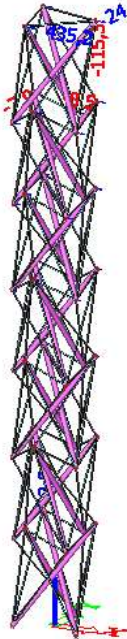


Tab. 3.27b Věž vysoká 52,2 m se spojovacími táhly – odezva

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
 <p>$N_{max} = 1917 \text{ kN}$ $N_{min} = -1,49 \text{ kN}$</p>	 <p>$N_{min} = -3329 \text{ kN}$</p>	 <p>$u_{x,max} = 362 \text{ mm}$ $u_{z,max} = 113 \text{ mm}$</p>	 <p>$f_1 = 1,02 \text{ Hz}$</p>	 <p>$f_2 = 1,02 \text{ Hz}$</p>

Tab. 3.28a Věž vysoká 52,2 m se simplexovými táhly – předpětí a zatížení

Normálové síly od předpětí v táhlech [kN]	Posuny od předpětí [mm]	Zatížení a reakce – vodorovné [kN]	Zatížení a reakce – svislé1 [kN]	Zatížení a reakce – svislé2 [kN]
 <p>$N_{max} = 1409 \text{ kN}$</p>	 <p>$u_{x,max} = 9 \text{ mm}$ $u_{z,max} = 73 \text{ mm}$</p>	 <p> $F117 / 9,67$ $F121 / 9,67$ $F111 / 9,67$ $F115 / 9,67$ $F118 / 9,67$ $F105 / 9,67$ $F109 / 9,67$ $F112 / 9,67$ $F99 / 9,67$ $F101 / 9,67$ $F106 / 9,67$ $F93 / 9,67$ $F97 / 9,67$ $F102 / 9,67$ $F89 / 9,67$ $F91 / 9,67$ $F94 / 9,67$ $F83 / 9,67$ $F85 / 9,67$ $F87 / 9,67$ </p> <p> $757,02$ $163,36$ $918,28$ $1082,23$ $1393,60$ $1836,28$ </p>	 <p> $1040,05$ $600,416$ $43600,47$ $433,566$ $1200,95$ $-1040,05$ </p>	 <p> $972,28$ $545,549$ $29598,85$ $433,566$ $1144,38$ $-1003,07$ </p>

Tab. 3.28b Věž vysoká 52,2 m se simplexovými táhly – odezva

Obálka normálových sil v táhlech [kN]	Obálka normálových sil ve vzpěrách [kN]	Obálka posunů [mm]	1. vlastní tvar	2. vlastní tvar
 <p>$N_{max} = 1908 \text{ kN}$ $N_{min} = -1,49 \text{ kN}$</p>	 <p>$N_{min} = -4052 \text{ kN}$</p>	 <p>$u_{x,max} = 436 \text{ mm}$ $u_{z,max} = 116 \text{ mm}$</p>	 <p>$f_1 = 0,72 \text{ Hz}$</p>	 <p>$f_2 = 0,72 \text{ Hz}$</p>

4 ZJEDNODUŠENÝ NÁVRH A POSOUZENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE TENSEGRITY ROZHLEDNY

V této kapitole použiju poznatky získané z předchozích kapitol pro návrh a posouzení reálné konstrukce.

4.1.1 Návrh

4.1.1.1 Dispozice

Viz model DIP 004-03.

Je použita výsledná konstrukce z kapitoly 3.3, tedy věž vysoká 52,2 m se ztužujícími spojovacími táhly. Strana trojúhelníku podstavy simplexu je 6 m. Simplexy jsou vysoké 9 m. Zapuštění simplexů je 1,8 m. Úhel $\alpha = 40^\circ$.

Po přesnějším stanovení zatížení a kombinací zatížení v této kapitole a následně provedených výpočtech jsem musel zesílit táhla i vzpěry, aby konstrukce vyhověla na MSÚ.

Hmotnost nosné konstrukce je 100 t.

Nebudou zde žádné výkresy, protože to přesahuje rozsah této diplomové práce. Rozměry konstrukce jsou jasné z popisu nebo z modelu.

4.1.1.2 Materiály

Vzpěry – S355

Táhla – Macalloy 520

4.1.1.3 Průřezy

Vzpěry – TR406x25

Táhla – Macalloy 520 M90 (průměr táhla je 87 mm)

4.1.2 Zatížení (charakteristické hodnoty)

4.1.2.1 Zatěžovací stavy

Vlastní tíha – g_0 :

Spočítá program.

Ostatní stálé zatížení – g₂:

Jedná se o zatížení od schodiště s podestami a vyhlídkové plošiny.

Zatížení od vyhlídkové plošiny odhaduji na $g_2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

Odhaduji, že schodiště s podestami bude mít poloviční půdorysnou plochu připadající na jeden simplex, než je plocha vyhlídkové plošiny, ale dvojnásobné zatížení. To znamená, že ostatní stálé zatížení připadající na jeden simplex bude u všech simplexů stejné.

půdorysná plocha vyhlídkové plošiny $A = 0,5 \cdot (6 \cdot 6) = 18 \text{ m}^2$

síla na jeden simplex (rozdělí se rovnoměrně do všech styčníků horní podstavu) $F_{g_2} = A \cdot g_2 = 18 \cdot 0,5 = \mathbf{9 \text{ kN}}$.

V nejvyšším simplexu bude zatížení dvojnásobné (**18 kN**), protože to bude zatížení od vyhlídkové plošiny + zatížení od schodiště.

Proměnné svislé užité zatížení (dav lidí) – s:

Vztahy mezi půdorysnými plochami a rozdělení zatížení do simplexů jsou stejné jako u zatížení g₂.

dav lidí $q = 5 \text{ kN/m}^2$ (podle [8])

$F_{q, \text{schodiště}} = A \cdot q = 9 \cdot 5 = \mathbf{45 \text{ kN}}$

$F_{q, \text{plošina}} = A \cdot q + F_{q, \text{schodiště}} = 18 \cdot 5 + 45 = \mathbf{135 \text{ kN}}$

Toto zatížení bude ve dvou vystřídáných zatěžovacích stavech:

- s₁ – plné centrické zatížení
- s₂ – excentrické zatížení

Proměnné vodorovné zatížení větrem – v:

Zatížení stanovím zjednodušeně podle [6].

větrná oblast III, kategorie terénu II

rychlost větru $v_b = 27,5 \text{ m/s}$

základní dynamický tlak $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 27,5^2 = 473 \text{ Pa} = 0,473 \text{ kN/m}^2$

součinitel expozice pro výšku 53,5 m (včetně výšky zábradlí) $C_e(53,5) = 3,5$

součinitel expozice pro výšku 6 m $C_e(6) = 2,0$

maximální dynamický tlak pro výšku 53,5 m $q_p(53,5) = q_b \cdot C_e(53,5) = 0,473 \cdot 3,5 = 1,66 \text{ kN/m}^2$

maximální dynamický tlak pro výšku 6 m $q_p(6) = q_b \cdot C_e(6) = 0,473 \cdot 2,0 = 0,95 \text{ kN/m}^2$

odhad celkového součinitele vnějšího tlaku (součet tlaku a sání) $C_{pe} = 1 + 0,7 = 1,7$

odhad součinitele plnosti $\phi = 0,25$

plocha připadající na 1 simplex (včetně zapuštění, protože v zapuštění je dvojnásobný součinitel plnosti) $A = 6 \cdot 9 = 54 \text{ m}^2$

plocha, na kterou působí tlak $A_{ref} = A \cdot \phi = 54 \cdot 0,25 = 13,5 \text{ m}^2$

Celková síla na jeden simplex ve výšce 53,5 m $F_w(53,5) = q_p(53,5) \cdot C_{pe} \cdot A_{ref} = 1,66 \cdot 1,7 \cdot 13,5 = 38 \text{ kN}$

Celková síla na jeden simplex ve výšce 6 m $F_w(6) = q_p(6) \cdot C_{pe} \cdot A_{ref} = 0,95 \cdot 1,7 \cdot 13,5 = 22 \text{ kN}$

Síly $F_w(53,5)$ a $F_w(6)$ se rozdělí rovnoměrně na všechny styčnický příslušných podstav příslušného simplexu.

Rozložení velikosti zatížení od větru po výšce věže je podle normy [6] Obrázek 7.4.

Zatížení větrem bude ve 4 zatěžovacích stavech:

- v1 – x+
- v2 – x-
- v3 – y+
- v4 – y-

Předpětí – p:

Ztužující spojovací táhla jsou ochlazená teplotou -180°C .

Všechna ostatní táhla jsou ochlazená teplotou -90°C .

Tab. 4.1 Zatěžovací stavy

g2	s1	s2	v1	v2	v3	v4

4.1.2.2 Kombinace zatížení

Pro MSP mají mít podle normy [5] všechna stálá zatížení a předpětí součinitel zatížení 1,0 a všechna nahodilá zatížení mají součinitel zatížení 1,0 (nepříznivá) nebo 0,0 (příznivá).

Pro MSÚ mají mít podle normy [5] všechna stálá zatížení a předpětí součinitel zatížení 1,35 (nepříznivá) nebo 1,0 (příznivá).

Pro MSÚ mají mít podle normy [5] všechna proměnná zatížení součinitel zatížení 1,5 (nepříznivá) nebo 0,0 (příznivá), pokud se jedná o dominantní zatížení. Pokud se nejedná o dominantní zatížení, můžou se zatížení redukovat kombinačním součinitelem, ale potom je potřeba udělat více kombinací, aby se každé zatížení vystřídalo na pozici dominantního zatížení. Abych nemusel dělat příliš mnoho nelineárních kombinací, nebudu používat kombinační součinitele, to je na straně bezpečné.

Pro MSÚ týkající se stability konstrukce mají mít podle normy [5] stabilizující zatížení součinitel zatížení 0,9.

Podle [4] byly u věže v Rostocku uvažovány součinitele zatížení pro předpětí 1,35 a 0,65. Kromě výše uvedených pravidel z normy [5] použiju v kombinacích i toto pravidlo podle [4], které je oproti normě [5] na straně bezpečné.

Protože chování této konstrukce je velmi složité, není jasné které zatížení je kdy příznivé, nepříznivé, stabilizující.

Nevím, zda nejistoty v předpětí 1,35 a 0,65 musí nebo nemusí být i v kombinacích MSP, proto vyzkouším obě možnosti.

Podle výše uvedených pravidel jsem vytvořil následující nelineární kombinace zatížení.

Protože program SCIA Engineer nemá (pro mě z naprosto nepochopitelných důvodů) možnost generovat nelineární kombinace podle nastavení skupin zatížení (výběrová, standard) stejně jako u lineárních kombinací, musel jsem všechny nelineární kombinace zadat ručně.

A protože studentská verze programu SCIA Engineer má (pro mě z naprosto nepochopitelných důvodů) zakázanou možnost exportovat tabulky do jiného formátu než pdf (tlačítko export pro jiné formáty je neaktivní), nezbyvá mi nic jiného, než vložit výpis nelineárních kombinací zatížení jako screenshoty z pdf.

Tab. 4.2 Nelineární kombinace zatížení

1. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
MSP (p)	Použitelnost	p - předpětí	1,00
MSP (g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé	1,00 1,00 1,00
MSP (s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1	1,00 1,00 1,00 1,00
MSP (s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2	1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv1 (v1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v1 - vtr1	1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv1 (v1+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v1 - vtr1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv1 (v1+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v1 - vtr1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1 (p)	Použitelnost	p - předpětí	0,65
MSPp1 (g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé	0,65 1,00 1,00
MSPp1 (s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1	0,65 1,00 1,00 1,00
MSPp1 (s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2	0,65 1,00 1,00 1,00
MSPp1v1 (v1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v1 - vtr1	0,65 1,00 1,00 1,00
MSPp1v1 (v1+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v1 - vtr1	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1v1 (v1+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v1 - vtr1	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp2 (p)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
MSPp2 (g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé	1,35 1,00 1,00
MSPp2 (s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1	1,35 1,00 1,00 1,00
MSPp2 (s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2	1,35 1,00 1,00 1,00
MSPp2v1 (v1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v1 - vtr1	1,35 1,00 1,00 1,00
MSPp2v1 (v1+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35

2. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
		g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v1 - vtr1	1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp2v1 (v1+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v1 - vtr1	1,35 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv2 (v2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v2 - vtr2	1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv2 (v2+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v2 - vtr2	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv2 (v2+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v2 - vtr2	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1v2 (v2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v2 - vtr2	0,65 1,00 1,00 1,00
MSPp1v2 (v2+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v2 - vtr2	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1v2 (v2+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v2 - vtr2	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp2v2 (v2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v2 - vtr2	1,35 1,00 1,00 1,00
MSPp2v2 (v2+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v2 - vtr2	1,35 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp2v2 (v2+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v2 - vtr2	1,35 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv3 (v3+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v3 - vtr3	1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv3 (v3+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v3 - vtr3	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPv3 (v3+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v3 - vtr3	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1v3 (v3+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé v3 - vtr3	0,65 1,00 1,00 1,00
MSPp1v3 (v3+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s1 - užitné1 v3 - vtr3	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00
MSPp1v3 (v3+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí g - vlastní tíha g2 - ostatní stálé s2 - užitné2 v3 - vtr3	0,65 1,00 1,00 1,00 1,00

3. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s2 - užitné2	1,00
		v3 - vtr3	1,00
MSPp2v3 (v3+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		v3 - vtr3	1,00
MSPp2v3 (v3+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s1 - užitné1	1,00
		v3 - vtr3	1,00
MSPp2v3 (v3+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s2 - užitné2	1,00
		v3 - vtr3	1,00
MSPv4 (v4+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,00
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPv4 (v4+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,00
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s1 - užitné1	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPv4 (v4+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,00
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s2 - užitné2	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp1v4 (v4+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp1v4 (v4+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s1 - užitné1	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp2v4 (v4+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp2v4 (v4+s1+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s1 - užitné1	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp2v4 (v4+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s2 - užitné2	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSPp1v4 (v4+s2+g+g2)	Použitelnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,00
		g2 - ostatní stálé	1,00
		s2 - užitné2	1,00
		v4 - vtr4	1,00
MSÚp1 (p)	Únosnost	p - předpětí	0,65
MSÚg1p1 (g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
MSÚg1p1 (s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
MSÚg1p1 (s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
MSÚg1p1v1 (v1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg1p1v1 (v1+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65

4. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg1p1v1 (v1+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚp2 (p)	Únosnost	p - předpětí	1,35
MSÚg1p2 (g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
MSÚg1p2 (s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
MSÚg1p2 (s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
MSÚg1p2v1 (v1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg1p2v1 (v1+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg1p2v1 (v1+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg2p1 (g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
MSÚg2p1 (s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
MSÚg2p1 (s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
MSÚg2p1v1 (v1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg2p1v1 (v1+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg2p1v1 (v1+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg2p2 (g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
MSÚg2p2 (s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
MSÚg2p2 (s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
MSÚg2p2v1 (v1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v1 - vtr1	1,50
MSÚg2p2v1 (v1+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
MSÚg2p2v1 (v1+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35

5. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. (-)
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v1 - vítr1	1,50
MSÚg2p2v1 (v1+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v1 - vítr1	1,50
MSÚg1p1v2 (v2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p1v2 (v2+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p1v2 (v2+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p2v2 (v2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p2v2 (v2+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p2v2 (v2+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg2p1v2 (v2+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg2p1v2 (v2+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg2p2v2 (v2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg2p2v2 (v2+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg2p2v2 (v2+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v2 - vítr2	1,50
MSÚg1p1v3 (v3+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p1v3 (v3+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p1v3 (v3+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v3 - vítr3	1,50

6. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. (-)
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p2v3 (v3+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p2v3 (v3+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p2v3 (v3+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p1v3 (v3+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p1v3 (v3+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p1v3 (v3+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p2v3 (v3+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p2v3 (v3+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užitné1	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg2p2v3 (v3+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užitné2	1,50
		v3 - vítr3	1,50
MSÚg1p1v4 (v4+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg1p1v4 (v4+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg1p1v4 (v4+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg1p2v4 (v4+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg1p2v4 (v4+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s1 - užitné1	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg1p2v4 (v4+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	0,90
		g2 - ostatní stálé	0,90
		s2 - užitné2	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p1v4 (v4+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35

7. část

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p1v4 (v4+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užité1	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p1v4 (v4+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	0,65
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užité2	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p2v4 (v4+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p2v4 (v4+s1+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s1 - užité1	1,50
		v4 - vítr4	1,50
MSÚg2p2v4 (v4+s2+g+g2)	Únosnost	p - předpětí	1,35
		g - vlastní tíha	1,35
		g2 - ostatní stálé	1,35
		s2 - užité2	1,50
		v4 - vítr4	1,50

3. část

Jméno	Výpis
	MSPv4 (v4+g+g2) MSPv4 (v4+s1+g+g2) MSPv4 (v4+s2+g+g2)
MSP s nejistotami předpětí	MSP (p) MSP (g+g2) MSP (s1+g+g2) MSP (s2+g+g2) MSPv1 (v1+g+g2) MSPv1 (v1+s1+g+g2) MSPv1 (v1+s2+g+g2) MSPp1 (p) MSPp1 (g+g2) MSPp1 (s1+g+g2) MSPp1 (s2+g+g2) MSPp1v1 (v1+g+g2) MSPp1v1 (v1+s1+g+g2) MSPp1v1 (v1+s2+g+g2) MSPp2 (p) MSPp2 (g+g2) MSPp2 (s1+g+g2) MSPp2 (s2+g+g2) MSPp2v1 (v1+g+g2) MSPp2v1 (v1+s1+g+g2) MSPp2v1 (v1+s2+g+g2) MSPv2 (v2+g+g2) MSPv2 (v2+s1+g+g2) MSPv2 (v2+s2+g+g2) MSPp1v2 (v2+g+g2) MSPp1v2 (v2+s1+g+g2) MSPp1v2 (v2+s2+g+g2) MSPp2v2 (v2+g+g2) MSPp2v2 (v2+s1+g+g2) MSPp2v2 (v2+s2+g+g2) MSPv3 (v3+g+g2) MSPv3 (v3+s1+g+g2) MSPv3 (v3+s2+g+g2) MSPp1v3 (v3+g+g2) MSPp1v3 (v3+s1+g+g2) MSPp1v3 (v3+s2+g+g2) MSPp2v3 (v3+g+g2) MSPp2v3 (v3+s1+g+g2) MSPp2v3 (v3+s2+g+g2) MSPv4 (v4+g+g2) MSPv4 (v4+s1+g+g2) MSPv4 (v4+s2+g+g2) MSPp1v4 (v4+g+g2) MSPp1v4 (v4+s1+g+g2) MSPp1v4 (v4+s2+g+g2) MSPp2v4 (v4+g+g2) MSPp2v4 (v4+s1+g+g2) MSPp2v4 (v4+s2+g+g2)
MSÚ+MSP s nejistotami předpětí	MSÚp1 (p) MSÚg1p1 (g+g2) MSÚg1p1 (s1+g+g2) MSÚg1p1 (s2+g+g2) MSÚg1p1v1 (v1+g+g2) MSÚg1p1v1 (v1+s1+g+g2) MSÚg1p1v1 (v1+s2+g+g2) MSÚp2 (p) MSÚg1p2 (g+g2) MSÚg1p2 (s1+g+g2) MSÚg1p2 (s2+g+g2) MSÚg1p2v1 (v1+g+g2) MSÚg1p2v1 (v1+s1+g+g2) MSÚg1p2v1 (v1+s2+g+g2) MSÚg2p1 (g+g2) MSÚg2p1 (s1+g+g2) MSÚg2p1 (s2+g+g2) MSÚg2p1v1 (v1+g+g2) MSÚg2p1v1 (v1+s1+g+g2) MSÚg2p1v1 (v1+s2+g+g2) MSÚg2p2 (g+g2) MSÚg2p2 (s1+g+g2) MSÚg2p2 (s2+g+g2) MSÚg2p2v1 (v1+g+g2) MSÚg2p2v1 (v1+s1+g+g2) MSÚg2p2v1 (v1+s2+g+g2)

4. část

Jméno	Výpis
	MSÚg1p1v2 (v2+g+g2) MSÚg1p1v2 (v2+s1+g+g2) MSÚg1p1v2 (v2+s2+g+g2) MSÚg1p2v2 (v2+g+g2) MSÚg1p2v2 (v2+s1+g+g2) MSÚg1p2v2 (v2+s2+g+g2) MSÚg2p1v2 (v2+g+g2) MSÚg2p1v2 (v2+s1+g+g2) MSÚg2p1v2 (v2+s2+g+g2) MSÚg2p2v2 (v2+g+g2) MSÚg2p2v2 (v2+s1+g+g2) MSÚg2p2v2 (v2+s2+g+g2) MSÚg1p1v3 (v3+g+g2) MSÚg1p1v3 (v3+s1+g+g2) MSÚg1p1v3 (v3+s2+g+g2) MSÚg1p2v3 (v3+g+g2) MSÚg1p2v3 (v3+s1+g+g2) MSÚg1p2v3 (v3+s2+g+g2) MSÚg2p1v3 (v3+g+g2) MSÚg2p1v3 (v3+s1+g+g2) MSÚg2p1v3 (v3+s2+g+g2) MSÚg2p2v3 (v3+g+g2) MSÚg2p2v3 (v3+s1+g+g2) MSÚg2p2v3 (v3+s2+g+g2) MSÚg1p1v4 (v4+g+g2) MSÚg1p1v4 (v4+s1+g+g2) MSÚg1p1v4 (v4+s2+g+g2) MSÚg1p2v4 (v4+g+g2) MSÚg1p2v4 (v4+s1+g+g2) MSÚg1p2v4 (v4+s2+g+g2) MSÚg2p1v4 (v4+g+g2) MSÚg2p1v4 (v4+s1+g+g2) MSÚg2p1v4 (v4+s2+g+g2) MSÚg2p2v4 (v4+g+g2) MSÚg2p2v4 (v4+s1+g+g2) MSÚg2p2v4 (v4+s2+g+g2) MSP (p) MSP (g+g2) MSP (s1+g+g2) MSP (s2+g+g2) MSPv1 (v1+g+g2) MSPv1 (v1+s1+g+g2) MSPv1 (v1+s2+g+g2) MSPp1 (p) MSPp1 (g+g2) MSPp1 (s1+g+g2) MSPp1 (s2+g+g2) MSPp1v1 (v1+g+g2) MSPp1v1 (v1+s1+g+g2) MSPp1v1 (v1+s2+g+g2) MSPp2 (p) MSPp2 (g+g2) MSPp2 (s1+g+g2) MSPp2 (s2+g+g2) MSPp2v1 (v1+g+g2) MSPp2v1 (v1+s1+g+g2) MSPp2v1 (v1+s2+g+g2) MSPv2 (v2+g+g2) MSPv2 (v2+s1+g+g2) MSPv2 (v2+s2+g+g2) MSPp1v2 (v2+g+g2) MSPp1v2 (v2+s1+g+g2) MSPp1v2 (v2+s2+g+g2) MSPp2v2 (v2+g+g2) MSPp2v2 (v2+s1+g+g2) MSPp2v2 (v2+s2+g+g2) MSPv3 (v3+g+g2) MSPv3 (v3+s1+g+g2) MSPv3 (v3+s2+g+g2) MSPp1v3 (v3+g+g2) MSPp1v3 (v3+s1+g+g2) MSPp1v3 (v3+s2+g+g2) MSPp2v3 (v3+g+g2) MSPp2v3 (v3+s1+g+g2) MSPp2v3 (v3+s2+g+g2) MSPv4 (v4+g+g2) MSPv4 (v4+s1+g+g2) MSPv4 (v4+s2+g+g2)

5. část

Jméno	Výpis
	MSPv4 (v4+s2+g+g2) MSPp1v4 (v4+g+g2) MSPp1v4 (v4+s1+g+g2) MSPp2v4 (v4+g+g2) MSPp2v4 (v4+s1+g+g2) MSPp2v4 (v4+s2+g+g2) MSPp1v4 (v4+s2+g+g2)

4.1.3 Vnitřní síly, deformace a reakce

Tab. 4.4 Maximální vnitřní síly [kN]

	předpětí bez vlastní tíhy - MSP bez nejistot předpětí	předpětí s vlastní tíhou - MSP bez nejistot předpětí	MSÚ	MSP s nejistotami předpětí	MSP bez nejistot předpětí
maxN v táhlech	1634	1679	2 862	2 364	1 804
maxN ve vzpěrách	-3108	-3144	-4 469	-4 311	-3 231

Tab. 4.5 Maximální posuny [mm]

	předpětí bez vlastní tíhy - MSP bez nejistot předpětí	předpětí s vlastní tíhou - MSP bez nejistot předpětí	MSÚ	MSP s nejistotami předpětí	MSP bez nejistot předpětí
vodorovný posun	7,3	8,4	706	297	140
svislý posun	70	73	119	106	83

Ohybový moment ve vzpěře od zatížení větrem:

$$q_p(53,5) = 1,66 \text{ kN/m}^2$$

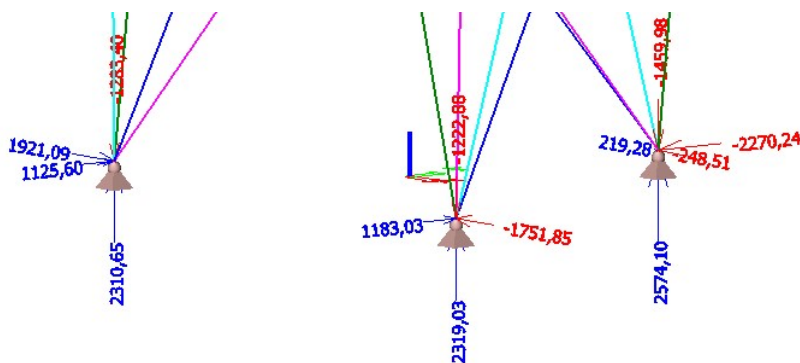
$$C_{pe} = 1,7$$

$$\text{šířka vzpěry } b = 0,406 \text{ m}$$

$$\text{spojité zatížení na vzpěru } f_{w,Ed} = q_p(53,5) \cdot C_{pe} \cdot b \cdot \gamma_f = 1,66 \cdot 1,7 \cdot 0,406 \cdot 1,5 = 1,72 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = 0,125 \cdot f_{w,Ed} \cdot L^2 = 0,125 \cdot 1,72 \cdot 11,3^2 = \mathbf{28 \text{ kNm}}$$

Reakce:



Obr. 4.1 Obálka reakcí – MSÚ [kN]

4.1.4 Posouzení

MSÚ

Táhla:

Tab. 4.6 Únosnosti táhel Macalloy 520 [107]

Závít	Jednotka	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90	M100
Průměr táhla	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Min. mez kluzu	kN	28	41	77	122	176	284	411	566	746	1030	1360	1985	2531	2862	3585
Min. mez pevnosti	kN	35	52	98	155	223	360	522	719	946	1308	1727	2520	3212	3633	4551
Hmotnost táhla	Kg/m	0,50	0,75	1,40	2,20	3,00	4,80	7,10	9,40	12,50	16,70	22,20	32,00	41,50	46,70	58,00

Pružná únosnost:

$$N_{Ed} = 2862 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 2862 \text{ kN} \Rightarrow \text{VYHOVUJE (využití 100\%)}$$

Plastická únosnost:

$$N_{Ed} = 2862 \text{ kN} < N_{Rd} = 3633 \text{ kN} \Rightarrow \text{VYHOVUJE (využití 79\%)}$$

Vzpěry:

Průřezové charakteristiky jsou z tabulek [9].

Vzpěrný tlak – posudek podle normy [7]:

Ocelový prut - vpěr, prostý tlak, tah		PSÁT POUZE DO ZELENÝCH BUNĚK!	
f _{yk} [MPa]	355,00	vpěrný tlak:	N _{b,rd} [kN]
gamma M1	1,00		5 167,482
f _{yd} [MPa]	355,00		0,865
E [GPa]	210,00		VYHOVUJE
vzpěra TR406x25		prostý tlak:	N _{c,rd} [kN]
A [mm ²]	29 920,0		10 621,600
I [cm ⁴]	54 500,00		VYHOVUJE
i [mm]	134,96		
alfa	0,49		
L _{cr} [mm]	11 300,0	tah:	N _{t,rd} [kN]
N _{cr} [kN]	8 846,239		10 621,600
lambda	83,726		VYHOVUJE
lambda _{rel}	1,096		
fi	1,320		
chi	0,487		
N _{c,ed} [kN]	4 469,000		
N _{t,ed} [kN]	0,000		

$$N_{Ed} = 4469 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 5167 \text{ kN} \Rightarrow \text{VYHOVUJE (využití 87\%)}$$

Kombinace vzpěrného tlaku a prostého ohybu (zjednodušeně):

$$\text{Pružná únosnost v ohybu } M_{Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0} = (2690 \cdot 355 / 1,0) \cdot 10^3 = 954 \text{ kNm}$$

$$(N_{Ed} / N_{b,Rd}) + (M_{Ed} / M_{Rd}) = (4469 / 5167) + (28 / 954) = 0,865 + 0,030 = 0,895 < 1,0 \Rightarrow$$

VYHOVUJE (využití 90%)

MSP

Maximální dovolený vodorovný posun $u_{dov} = H/150 = 52200 / 150 = 348 \text{ mm}$

MSP bez nejistot předpětí:

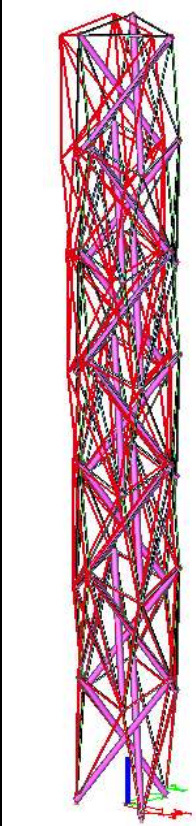
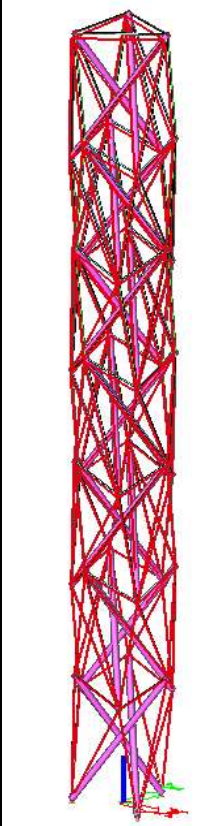
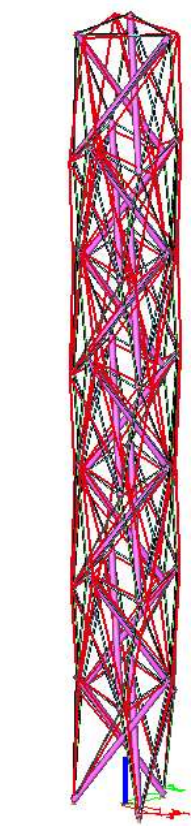
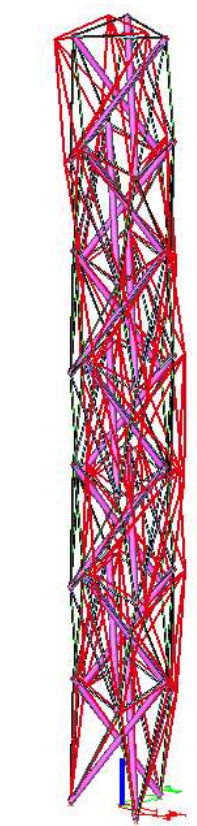
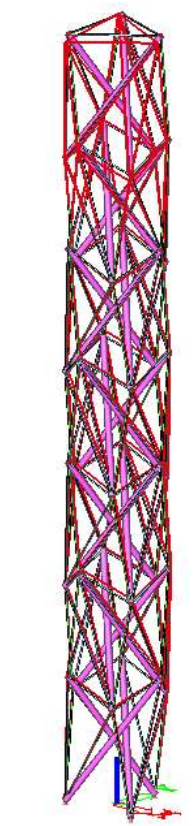
$u = 140 \text{ mm} < u_{dov} = 348 \text{ mm} \Rightarrow \text{VYHOVUJE (H/372)}$

MSP s nejistotami předpětí:

$u = 297 \text{ mm} < u_{dov} = 348 \text{ mm} \Rightarrow \text{VYHOVUJE (H/175)}$

4.1.5 Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání

Tab. 4.7 Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání

1. vlastní tvar	2. vlastní tvar	3. vlastní tvar	4. vlastní tvar	5. vlastní tvar
				
f1 = 1,00 Hz	f2 = 1,00 Hz	f3 = 3,25 Hz	f4 = 5,46 Hz	f5 = 5,46 Hz

První dva vlastní tvary jsou naklánění věže (první vlastní tvar konzoly). Třetí vlastní tvar je kroucení. Čtvrtý a pátý vlastní tvar je druhý vlastní tvar konzoly.

4.1.6 Závěr

Podle zjednodušeného posouzení se zdá, že konstrukce vyhovuje na MSÚ a MSP.

Aby bylo jisté, že je konstrukce bezpečná, bylo by vhodné posoudit ještě následující věci:

- globální stabilita
- aeroelasticita
- zemětřesení
- progresivní kolaps

Dále by bylo vhodné:

- zatížení větrem stanovit přesněji
- navrhnout a posoudit schodiště a jeho umístění a zavěšení a přesněji stanovit ostatní stálé zatížení, jeho roznos a roznos užitého zatížení, nebo umístit schodiště přímo do modelu
- navrhnout a posoudit konstrukci vyhlídkové plošiny a přesněji stanovit ostatní stálé zatížení, jeho roznos a roznos užitého zatížení, nebo umístit plošinu přímo do modelu
- navrhnout a posoudit styčníky
- navrhnout a posoudit podpory a základy, případně zavést tuhost podpor do výpočetního modelu nosné konstrukce

Schodiště doporučuji zavěsit pomocí táhel za styčníky nosné konstrukce, aby byla zachována čistota tensegrity konstrukce a aby nevznikaly ohybové momenty ve vzpěrách. Podesty by měly být zavěšeny za styčníky, které jsou nad nimi, a stabilizovány táhly, které se připojí ke styčnickům pod nimi. Při návrhu schodiště je nutno se vyhnout kolizím průchozího prostoru s nosnou konstrukcí. Doporučuji řešit v 3D modelu.

Vyhlídkovou plošinu doporučuji navrhnout přes celou horní trojúhelníkovou podstavu horního simplexu. **Navrhují desku z vícevrstvého nosného skla**, cca 5-7 vrstev. Horní vrstva musí být z plaveného skla, které slouží jako ochrana prostředních nosných vrstev proti rozbití a dolní vrstva musí být z kaleného skla, které se v případě rozbití rozsype na střípky o velikosti max 1 cm. Desku doporučuji navrhnout s únosností 5x vyšší, než je minimální nutná a nepočítat s horní a dolní vrstvou. Skleněná deska bude uložena na ocelových nosnících pomocí „spiderů“. Ocelové nosníky budou uloženy na styčnicích simplexu. Aby byly menší ohybové momenty ve skleněné desce, doporučuji středy nosníků propojit dalšími nosníky (vepsat menší trojúhelník o straně 3 m do velkého trojúhelníku u straně 6 m).

Pokud jde o návrh styčnicků, je dobré si uvědomit, že jakýkoliv směr v prostoru se dá určit dvěma úhly ve dvou na sebe kolmých rovinách. Styčnickový plech se navrhne vždy tak, aby byl svar mezi plechem a trubkou rovnoběžný s osou trubky. Umístění plechu bude dáno úhlem v rovině kolmé na osu trubky. Druhým (kolmým) úhlem určujícím směr táhla je úhel mezi táhlem a trubkou v jejich společné rovině, který lze nastavit libovolně otáčením

táhla okolo čepu. Styčníky je vhodné navrhovat tak, aby se osy všech táhel protínaly v jednom bodě na ose trubky, aby nedocházelo k přidavným namáháním.

Pokud jde o návrh podpor/základů, problém s velkými vodorovnými reakcemi lze vyřešit přidáním táhel mezi podpory a předepnout je. Aby se o táhla nezakopávalo, měly by být pod pochozí plochou.

Výškový rekord:

Věž je vysoká **52,2 m**. Vzhledem k tomu, že se jedná o výšku nejvyššího styčníku tensegrity konstrukce (bez nějaké 12,5 m vysoké antény, která by ještě na vrcholu věže mohla být, nebo zábradlí na vyhlídkové plošině), překonal jsem výšku tensegrity konstrukce věže v Rostocku bez antény (49,8 m – výška nejvyššího styčníku simplexu). **To znamená, že pokud by moje 52,2 m vysoká věž byla zrealizována, byl by tím překonán rekord ve výšce nejvýše umístěného styčníku simplexu v tensegrity věži, i přesto že moje věž je čistá tensegrity konstrukce, zatímco věž v Rostocku (dosavadní rekord 49,8 m) je nečistá tensegrity konstrukce. Navíc moje věž má 2x větší tuhost než věž v Rostocku a díky tomu vyhovuje na MSP pro použití jako nosná konstrukce rozhledny.** Dosáhl jsem toho tím, že jsem použil chytré konstrukční řešení pro zvýšení tuhosti – použití dodatečných ztužujících spojovacích táhel.

Hmotnost věže je 100 t, což je více než u věže v Rostocku (50 t). Snížení hmotnosti bych mohl dosáhnout tím, že bych nadimenzoval skupiny vzpěr a táhel podle maximálních normálových sil, které v nich působí, a ne podle maximální normálové síly na celé konstrukci. V takovém případě je nutno zkontrolovat MSP, protože se tím sníží tuhost konstrukce.

5 ZÁVĚR

Byla provedena rešerše, zjednodušený výzkum statického působení tensegrity konstrukcí, parametrické studie pro nalezení vhodných konstrukčních řešení a zjednodušený návrh a posouzení 52,2 m vysoké reálné tensegrity věže, která slouží jako nosná konstrukce rozhledny a pravděpodobně vyhovuje na mezní stavy únosnosti a použitelnosti.

Protože rozsah diplomové práce je omezený, nebylo možné vše provést v dostatečně velkém rozsahu. Aby bylo možné s jistotou navrhovat bezpečné tensegrity konstrukce, bylo by vhodné nejdříve udělat následující věci:

- Nastudovat problematiku stability, prestressed stability a superstability z knihy [3] a s pomocí získaných poznatků najít vhodný způsob, jak posuzovat globální stabilitu tensegrity konstrukcí.
- Výzkum v kapitole 3.2 provést pro všechna zatížení ve stejné podrobnosti jako pro první dvě zatížení a provést tento výzkum i pro kombinace těchto zatížení, protože u tensegrity konstrukcí neplatí princip superpozice.
- Prozkoumat progresivní kolaps tensegrity konstrukcí a nalézt konstrukční řešení pro jeho zamezení, nebo navrhnout vhodné paralelní systémy.
- Prozkoumat, jak se tensegrity konstrukce chovají při zemětřesení.
- Provést experimenty s fyzickými konstrukcemi pro ověření správnosti výpočtů.
- Před návrhem tensegrity věže provést rozsáhlejší parametrickou studii pro optimalizaci konstrukčního řešení a pro lepší porozumění chování těchto konstrukcí.

Kromě toho by bylo vhodné udělat:

- Nastudovat způsob hledání geometrie tensegrity konstrukcí z knihy [3] a aplikovat tento způsob při návrhu reálné konstrukce se složitým tvarem.
- Kromě věží prozkoumat i jiné soustavy simplexů, jako jsou nosné konstrukce pro lávky nebo mosty a nosné konstrukce pro střechy.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

6.1 Seznam použité literatury

- [1] Wang Bin Bing: Free-standing Tension Structures - From Tensegrity Systems to Cable-strut Systems, Spon Press, ISBN 0-415-33595-7,
- [2] Gómez Jáuregui Valentín: Tensegrity Structures and their Application to Architecture, Books and Science, ISBN 978-84-8102-575-0,
- [3] Jing Yao Zhang, Makoto Ohsaki: Tensegrity Structures - Form, Stability, and Symmetry, Mathematics for Industry, ISBN 978-4-431-54812-6,
- [4] Schlaich Mike: The Messeturm in Rostock – A Tensegrity Tower, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures – Vol. 45 (2004) n.2 August n.145 (93-98),
- [5] ČSN EN 1990 ed. 2: 2015 (73 0002) Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí,
- [6] ČSN EN 1991-1-4 ed. 2: 2013 (73 0035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem,
- [7] ČSN EN 1993-1-1 ed. 2: 2011 (73 1401) Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby,
- [8] ČSN EN 1991-1-1: 2004 (73 0035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1 Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb,
- [9] Sokol, Z., Wald, F.: Ocelové konstrukce – Tabulky; ČVUT 2013; ISBN 978-80-01-04655-5.
- [10] Fuller, R. B.: Building construction. U. S. Patent No. 2,682,235, June 29, 1954.
- [11] Snelson, K.: Continuous tension, discontinuous compression structures. U.S. Patent No. 3,169,611 Feb. 16, 1965

6.2 Seznam použitých internetových zdrojů

- [101] <http://www.tensegriteit.nl/e-well-known.html>
- [102] <http://www.tensegriteit.nl/e-simple.html>
- [103] <https://cz.pinterest.com/pin/511862313875765477/>
- [104] [https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Kenneth Snelson Needle Tower.JPG](https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Kenneth_Snelson_Needle_Tower.JPG)
- [105] [https://tensegritywiki.com/wiki/Warnow Tower#The Messeturm in Rostock-A Tensegrity Tower by Schlaich](https://tensegritywiki.com/wiki/Warnow_Tower#The_Messeturm_in_Rostock-A_Tensegrity_Tower_by_Schlaich)
- [106] <https://www.asb.sk/stavebnictvo/inzinierske-stavby/mosty/konstrukcne-jedinecny-most-kurilpa>
- [107] http://www.tension.cz/www/media/files/pdf-k-pripojeni_12/macalloy-520_51.pdf