VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NAPJATOSTNĚ DEFORMAČNÍ ANALÝZA STOŽÁRU V LELEKOVICÍCH
STRESS-STRAIN ANALYSIS OF THE MAST IN LELEKOVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Matěj Vitouch
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Bc. Matěj Vitouch**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Napjatostně deformační analýza stožáru v Lelekovicích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na stožáru v Lelekovicích jsou připevněny antény všech tří mobilních operátorů a slouží také jako převaděč TV signálu. Tento stožár bude v rámci bakalářské práce modelován prutovou soustavou a posoudí se z hlediska napjatosti a deformace.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše a získání vstupních údajů o stožáru v Lelekovicích.
2. V případě nutnosti úprava topologie stožáru tak, aby byly splněny předpoklady kladené na prutovou soustavu.
3. Vytvoření 3D výpočtového modelu prutové soustavy stožáru a provedení napjatostně deformační analýzy při různém statickém zatěžování.
4. Posouzení změny napjatosti a deformace konstrukce stožáru při změně míry statické neurčitosti uložení.
5. Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením.

Seznam doporučené literatury:

JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. a BURŠA, J. Mechanika těles: Pružnost a pevnost I, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004, ISBN 80-214-2592-x.

FLORIAN, Z., PŘIKRYL, K.a ONDRÁČEK, E. Mechanika těles - statika. Vyd. 3. Brno: PC-DIR, 1995, ISBN 80-214-0694-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá napjatostně deformační analýzou 3D prutové soustavy. Hlavním cílem této práce je vytvoření výpočtového modelu prutové soustavy, který vychází z věže TV převaděče v Lelekovicích, a jeho následná analýza při různém uložení a zatížení. Následuje verifikace analytického modelu numerickým řešením v programu Ansys Workbench.

Klíčová slova

Tlak, tah, prutová konstrukce, prut, mezní stav, Ansys Workbench, Matlab

Abstract

This bachelor thesis is focused on stress and deformation analysis of 3D strut frame. The main goal of this thesis is to create model of strut frame, which is based on TV transmitter in Lelekovice, and his resulting analysis at various degree of static indeterminateness and loads. There is also verification of analytic results by numeric method in Ansys Workbench.

Key words

Compression, tension, strut frame, tension, bar, limit state, Ansys Workbench, Matlab

Bibliografická citace

VITOUCH, Matěj. Napjatostně deformační analýza stožáru v Lelekovicích [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129732. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Vladimír Fuis.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Napjatostně deformační analýza stožáru v Lelekovicích** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Matěj Vitouch

Poděkování
Chtěl bych poděkovat panu Michalu Tolknerovi z Českých radiokomunikací za poskytnutí dokumentace a informací o stožáru, které byly nezbytné pro vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Vladimíru Fuisovi, Ph.D. za jeho rady a připomínky k bakalářské práci.

Obsah

1. Úvod ... 10
2. Teoretická část ... 11
2.1. Vymezení prutu ... 11
2.1.1. Geometické prutuvé předpoklady ... 11
2.1.2. Vazbové a zatěžovací prutové předpoklady ... 11
2.1.3. Deformační prutové předpoklady ... 11
2.1.4. Napjatostní prutové předpoklady ... 11
2.2. Prutová soustava: ... 12
2.3. Statická určitost ... 12
2.3.1. Vnější statická určitost ... 12
2.3.2. Vnitřní statická určitost ... 13
2.4. Obecná styčníková metoda řešení prutových soustav ... 13
2.5. Výpočet deformací a Castiglianova věta ... 14
2.6. Prostý tah a tlak ... 14
2.7. Mezní stavy ... 15
2.7.1. Mezní stav pružnosti ... 15
2.7.2. Mezní stav vzpěrné stability ... 16
2.8. Rešerše stožáru v Lelekovicích ... 18
2.9. Princip fungování analogového vysílání televize ... 20
2.10. Princip fungování digitálního vysílání televize DVB-T ... 21
2.11. Televizní převaděče ... 23
2.12. Přechod z analogového na digitální vysílání v ČR ... 24
3. Analytický výpočet ... 25
3.1. Konstrukce stožáru jako prutová soustava ... 25
3.2. Statický rozbor ... 26
3.2.1. Vnější statická určitost ... 26
3.2.2. Vnitřní statická určitost ... 27
3.3. Rovnice statické rovnováhy ... 29
3.3.1. Styčník 5 ... 31
3.3.2. Styčník 6 ... 32
3.3.3. Styčník 7 ... 33
3.3.4. Styčník 8 ... 34
3.4. Zatěžující prvky ... 35

3.4.1. Zatížení od tíhy konstrukce ... 35
3.4.2. Tíha antén ... 36
3.4.3. Tíha kabeláže ... 37
3.4.4. Zatížení větrem ... 38
3.5. Výpočet normálových sil v prutech ... 40
3.6. Výpočet bezpečnosti ... 40
3.7. Výpočet deformací ... 41
3.8. Varianta I ... 42
3.8.1. Zhodnocení varianty I ... 44
3.9. Varianta II ... 45
3.9.1. Zhodnocení varianty II ... 47
3.10. Varianta III ... 48
3.10.1. Zhodnocení varianty III ... 49
3.11. Varianta IV ... 50
3.11.1. Zhodnocení varianty IV ... 51
3.12. Varianta V ... 52
3.12.1. Zhodnocení varianty V ... 53
4. Numerické řešení ... 54
4.1. Postup řešení soustavy v programu ANSYS Workbench ... 54
4.2. Porovnání numerického a analytického řešení ... 57
5. Závěr ... 60
Literatura a zdroje ... 62
Seznam použitých symbolů a zkratek ... 64
Seznam obrázků ... 66
Seznam tabulek ... 68
Seznam příloh ... 69

1. Úvod

Jako bakalářskou práci jsem si zvolil napjatostně deformační analýzu stožáru TV převaděče v Lelekovicích. Bydlel jsem tehdy asi 200 metrů od stožáru. Bavila mě práce v programu Workbench a chtěl jsem si vyzkoušet jeho fungování na větší konstrukci, než jaké jsme řešili v předmětu MKP v inženýrských výpočtech

Obrázek 1: Věž převaděče v Lelekovicích [7]

Na Fakultě strojního inženýrství už byla vypracována řada prací věnovaných napjatostní analýze mostů nebo stožárů. Protože mým oborem je mechatronika a mám tak blíže spíše k programování v Matlabu než k pružnosti a pevnosti, doufal jsem, že toto téma budu moci pojmout z jiného úhlu pohledu a v něčem ho posunout.

Rozhodl jsem se tedy konstrukci stožáru při tvorbě modelu nezjednodušovat, jako je to běžné v bakalářských pracích zaměřených na analýzu velké konstrukce, a soustředit se na zautomatizování tvorby rovnic statické rovnováhy, výpočtů zatížení a dalších procesů, kterými je nutné při tvorbě výpočtového modelu projít.

Téma bude zpracováno v následujících kroky:

1. Získání vstupních údajů o stožáru v Lelekovicích.
2. Úprava topologie stožáru tak, aby byly splněny předpoklady prutové soustavy.
3. Vytvoření 3D výpočtového modelu prutové soustavy stožáru a provedení napjatostně deformační analýzy při různém statickém zatěžování a různé míře statické neurčitosti.
4. Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením v programu ANSYS Workbench.

2. Teoretická část

Stožár v Lelekovicích v praktické části práce analyzujeme jako prutovou soustavu, což je nejjednodušší modelová soustava prutových a příhradových konstrukcí. [1]

2.1. Vymezení prutu

Prut je teoretický model tělesa, který splňuje tzv. **prutové předpoklady**. [2]

2.1.1. Geometické prutuvé předpoklady

1. Prut je určen střednicí γ a v každém jejím bodě příčným průřezem ψ. Ten obsahuje všechny body normálové roviny tělesa. Průsečík γ a ψ potom nazýváme geometrickým těžiště příčného průřezu.
2. Střednice prutu je hladká spojitá křivka konečné délky.
3. Příčný průřez je spojitá souvislá oblast, která je ohraničená obrysem.
4. Platí, že délka střednice prutu je řádově stejně velká nebo větší než maximální rozměr příčného průřezu.

2.1.2. Vazbové a zatěžovací prutové předpoklady

1. Vazby můžou omezovat jen posunutí a natočení střednice.
2. Veškeré zatížení je soustředěno na střednici prutu γ.

2.1.3. Deformační prutové předpoklady

1. Střednice γ zůstává v celém procesu deformace hladká a spojitá.
2. V procesu deformace zůstává zachována rovnost a kolmost průřezů ke střednici.

2.1.4. Napjatostní prutové předpoklady

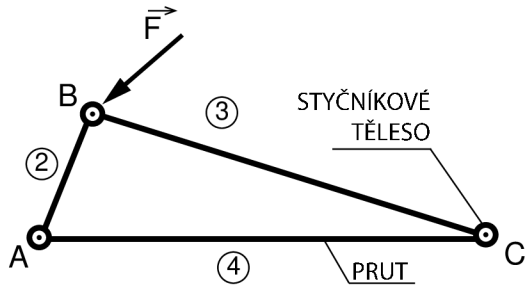
Napjatost v prutu je dána jen normálovým a smykovým napětím v příčném průřezu prutu (prutová napjatost).

2.2. Prutová soustava:

Prutová soustava je definovaná pěti prutovými předpoklady:

1. **Vazby** mezi tělesy jsou pouze typu NNTN. U prostorových úloh se jedná o sférické dvojice a rovinných úloh rotační kinematické dvojice.
2. **Tělesa** v soustavě jsou buďto prutová nebo styčníková a všechny pruty v soustavě jsou přímé.
3. **Vnější síly** působí pouze na tělesa styčníková a uložení k základnímu tělesu je realizováno pouze ve styčnících.
4. **Pruty** jsou nepohyblivé a každý prut je vázán minimálně ke dvěma jiným prutům.

Příklad prutové soustavy je pak na obrázku 1.



Obrázek 2: Jednoduchá prutová soustava (vlastní zpracování dle [1])

- Body A, B, C na obrázku značí jednotlivé styčníky, ale současně i vazby, které styčníky realizují.
- Pruty jsou označeny 2, 3, 4, kde 1 by bylo základní těleso.
- F je úplně zadaný silový prvek.

2.3. Statická určitost

Při řešení prutových soustav je třeba uvažovat vnější a vnitřní statickou určitost.

2.3.1. Vnější statická určitost

Podmínka vnější statické určitosti vypovídá o řešitelnosti neznámých, které jsou tvořeny stykovými silami uvolněného tělesa.

Podmínka vnější statické určitosti pro prutové soustavy říká, že počet vnějších neznámých parametrů stykových sil (μ_A) musí být stejný jako počet použitelných podmínek statické rovnováhy (ν). Tedy

$$\nu = \mu_A \tag{1}$$

2.3.2. Vnitřní statická určitost

Pro určení síly v prutech je třeba ověřovat i vnitřní statickou určitost. Pro prostorovou prutovou soustavu určíme stupeň vnitřní statické určitosti jako

$$s = p - (3k - 6) \tag{2}$$

a pro rovinou jako

$$s = p - (2k - 3) \tag{3}$$

kde k udává počet styčníků a p počet prutů.

Aby byla soustava vnitřně staticky určitá, musí platit, že $s=0$. Pokud je $s>0$, je soustava vnitřně staticky neurčitá a k jejímu řešení je nutné předepsat deformační podmínky. Pokud má soustava stupeň vnitřní statické určitosti menší než 0, jedná se o vnitřně pohyblivou soustavu.

2.4. Obecná styčníková metoda řešení prutových soustav

V této práci je prutová soustava řešená pomocí obecné styčníkové metody. V té se nejprve všechny styčníky uvolní a s použitelnými podmínkami statické rovnováhy se pracuje jako se soustavou lineárních algebraických rovnic. Soustavu lze pak zapsat jako maticovou rovnici ve tvaru

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{4}$$

kde

- **A** – je čtvercová matice soustavy a popisuje soustavu geometricky
- **x** – je sloupcový vektor neznámých parametrů, tedy normálových sil v prutech a stykových sil
- **b** – je sloupcový vektor zadaných silových prvků (zatěžujících sil)

Obecná styčníková metoda je nejběžnější metodou řešení prutových soustav. Maticový zápis usnadňuje kontrolu správnosti rovnic rovnováhy a umožňuje zápis pro prutové soustavy s opakujícími se segmenty algoritmizovat. Toho je využito v praktické části této práce.

2.5. Výpočet deformací a Castiglianova věta

Castiglianova věta říká, že pokud na lineárně pružnou soustavu, jejíž deformace jsou malé, působí osamělé síly, lze posunutí působiště síly F po nositelce vypočítat jako parciální derivaci celkové energie napjatosti W dle síly F. Tedy

$$u = \frac{\partial W}{\partial F} \tag{5}$$

kde u je posunutí působiště dané síly.

Obdobným způsobem lze vypočítat i natočení φ jako parciální derivaci celkové energie napjatosti podle silové dvojice M, která působí ve vyšetřovaném místě.

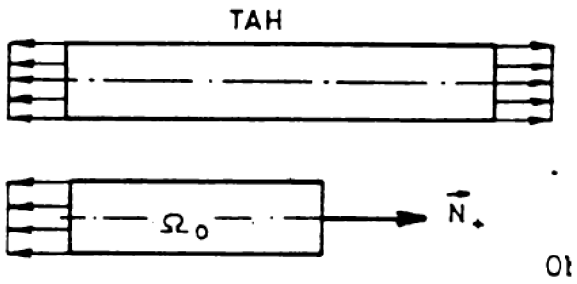
$$\varphi = \frac{\partial W}{\partial M} \tag{6}$$

2.6. Prostý tah a tlak

Prostým tahem a tlakem se rozumí takové zatěžování přímého prutu s konstantním průřezem, při kterém platí následující: [2]

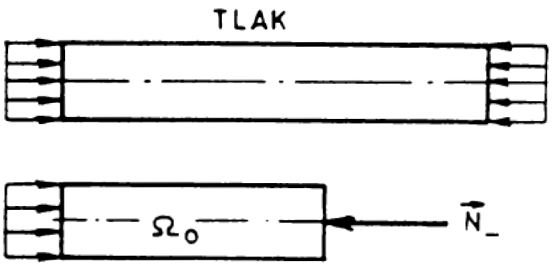
1. Jsou splněny prutové předpoklady.
2. Normálová síla je jediná nenulová složka VVÚ.
3. Příčné průřezy se oddalují nebo přibližují a následně deformují.
4. Při řešení statické rovnováhy je prvek prutu uvolňován ve výchozím nedeformovaném stavu.

Při namáhání tahem je pak normálová síla N orientována kladně ve směru vnější normály (viz obrázek 3).



Obrázek 3: Prut zatěžovaný tahem [2]

Při tlakovém namáhání má stejný směr jako vnitřní normála příčného průřezu uvolněného prvku Ω_0 (viz obrázek 4).



Obrázek 4: Prut zatěžovaný tahem [2]

2.7. Mezní stavy

Mezní stav představuje určitou pomyslnou hranici, po jejímž překročení těleso ztrácí schopnost vykonávat svou původní funkci. Pro správné posouzení prutové soustavy je pak třeba uvažovat mezní stav pružnosti a mezní stav vzpěrné stability.

2.7.1. Mezní stav pružnosti

Po překročení mezního stavu pružnosti (MSP) vznikají v tělese plastické deformace. Normálové napětí, při kterém deformace přestávají být vratné (elastické) a stávají se nevratnými (plastickými), se nazývá mez kluzu. Celkem tedy z hlediska MSP můžou u tělesa nastat tři stavy:

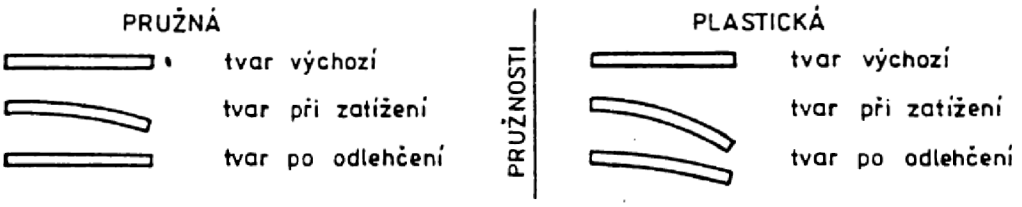
$\sigma <$ Re normálové napětí je menší než výpočtová mez kluzu – dochází tedy pouze k elastickým deformacím.

$\sigma = Re$ – normálové napětí je rovno výpočtové mezi kluzu – elastické deformace přecházejí do plastických.

$\sigma > R_e$ – normálové napětí je větší než výpočtová mez kluzu – dochází k plastickým deformacím v tělese.

Bezpečnost vůči meznímu stavu je asi nejvyužívanějším koeficientem bezpečnosti a určí se jako:

$$k_k = \frac{Re}{\sigma} \tag{7}$$



Obrázek 5: Elastická a plastická deformace [2]

2.7.2. Mezní stav vzpěrné stability

Mezní stav vzpěrné stability (MSVS) je takový stav, kdy se charakter podstatné deformace mění ze stlačování na ohyb. [3] Tento mezní stav uvažujeme u tenkých prutů, které jsou namáhány na ohyb.

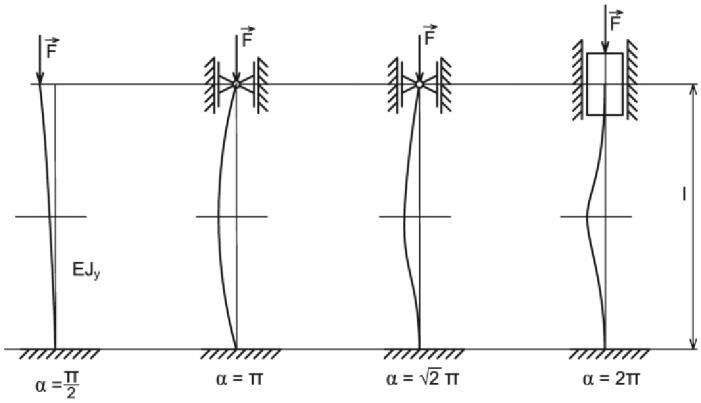
Bezpečnost k MSVS se pak určí jako

$$k_v = \frac{F_v}{F} \tag{8}$$

kde F_v je kritická síla a F je normálová síla v prutu. Pro kritickou sílu pak platí

$$F_v = \frac{\alpha^2 \cdot E \cdot J}{l^2} \tag{9}$$

kde α je součinitel uložení a J je osový kvadratický moment. Součinitel uložení pak může nabývat čtyř hodnot podle druhu uložení (viz obrázek 6).

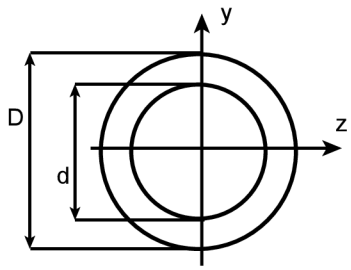


Obrázek 6: součinitel uložení [3]

Věž stožáru v Lelekovicích se skládá z trubkovitých profilů. Osový kvadratický moment se pro ně vypočte jako:

$$J = \pi \cdot \frac{D^4 - d^4}{64} \tag{10}$$

kde D je vnější a d vnitřní průměr (viz obrázek 7).



Obrázek 7:Vnější a vnitřní průměr trubky (vlastní zpracování)

Bezpečnost k meznímu stavu vzpěrné stability je ale třeba ověřovat pouze v případě, že tento stav nastane dříve než mezní stav pružnosti. To lze ověřit porovnáním štíhlosti prutu λ s kritickou štíhlostí λ_k.

Pro štíhlost prutu platí

$$\lambda = \frac{l}{i_y} \tag{11}$$

kde l je délka prutu a i_y je poloměr setrvačnosti průřezu prutu. Ten lze získat jako druhou odmocninu poměru osového kvadratického momentu a obsahu příčného průřezu, tedy

$$i_y = \sqrt{\frac{J_y}{S}} \tag{12}$$

Kritická štíhlost se pak určí ze vztahu

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\alpha^2 \cdot E}{Re}} \tag{13}$$

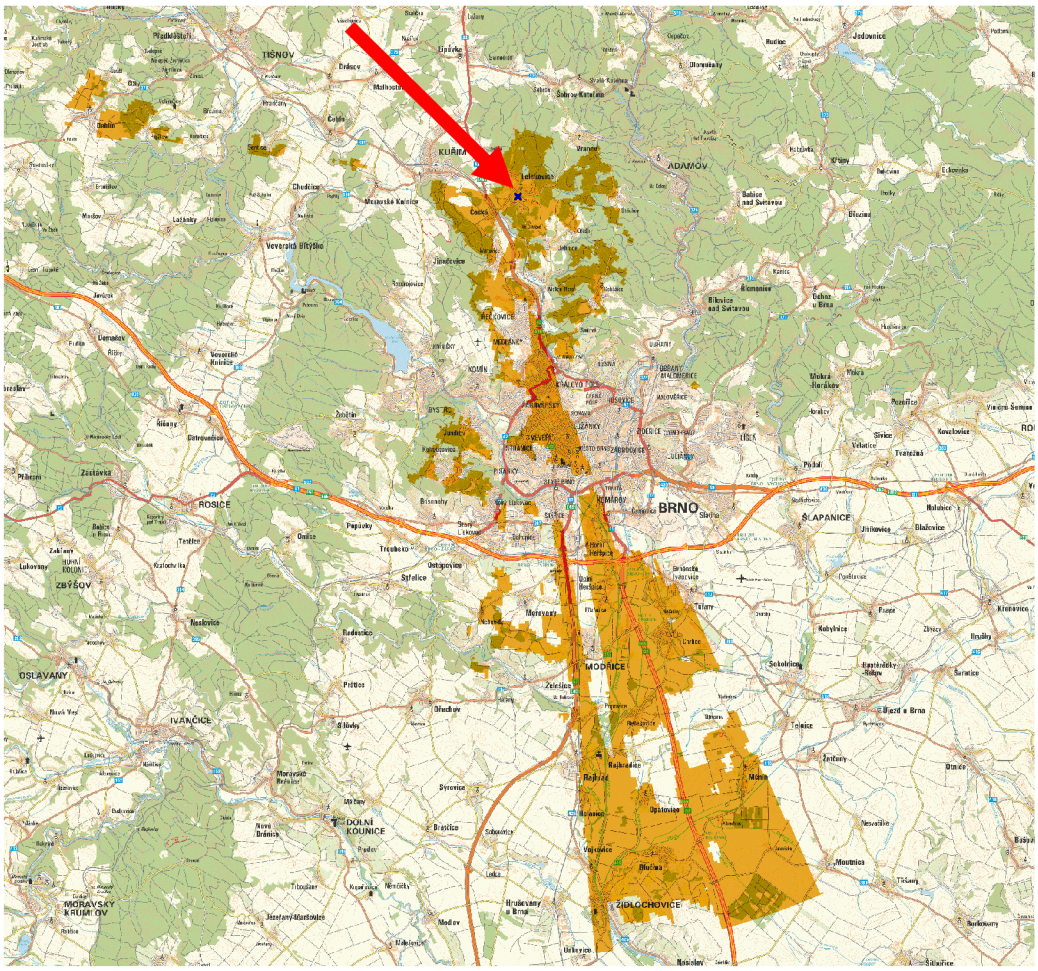
Pokud je štíhlost daného prutu nižší než kritická, dříve nastane MSP a bezpečnost se určí podle vztahu 7.

2.8. Rešerše stožáru v Lelekovicích

Věž stožáru se nachází v Lelekovicích na kopci nad základnou dobrovolných hasičů a je volně přístupná z ulice Plástky.

Stožár byl postaven společností České Radiokomunikace a.s. v roce 1994 a do 31. 1. 2010 sloužil jako převaděč analogového TV signálu. [5] Po přechodu na digitální vysílání byla hlavní anténa ze stožáru odstraněna. Nyní jsou na stožáru umístěny pouze menší antény pro převod mobilního signálu a internetu. Jedná se konkrétně o antény GSM Kathrein 739685 a LTE Kathrein 80010668. Nákres stožáru s původní anténou TV převaděče obsahuje příloha 5.

Antény na stožáru využívají všichni velcí čeští operátoři (T-mobile, Vodafone, O2). [7] Dle webu Českých Radiokomunikací může signál z věže pokrýt nejen Lelekovice, ale také Řečkovice a severozápadní část Brna (viz obrázek 8).



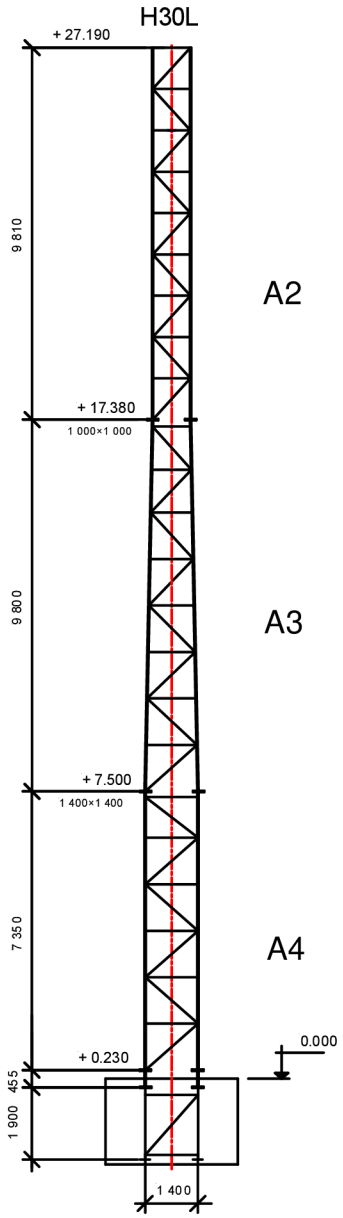
Obrázek 8: Mapa pokrytí signálu převaděče [4]

Samotná výška věže bez antén je 27 metrů. S původní anténou TV převaděče byl stožár vysoký 34 metrů. Technik má přístup k anténám po žebříku se samojistícím systémem, který vede středem věže.

Stožár je sestaven ze tří dílů, které jsou v dokumentaci označovány jako A4, A3 a A2 (viz obrázek 9). Použitá ocel je S 235 dle značení EN 10025-2 s mezí kluzu 235 MPa. [8] Konstrukce věže se skládá z šesti různých profilů (viz tabulka 1).

TR 108/6	TR 108/6	TR 89/3.5	nárožníky
TR 60/3	TR 60/3	TR 44.5/3	diagonály
TR 44.5/3	TR 44.5/3	TR 32/3	svislice
A4	**A3**	**A2**	označení dílu

Tabulka 1: Použité profily na stožáru



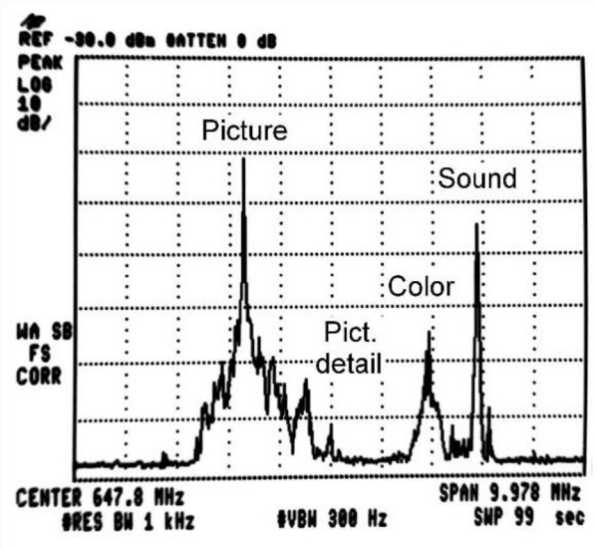
Obrázek 9: Nová podoba stožáru

2.9. Princip fungování analogového vysílání televize

Televizní přenos má část snímací, vysílací a přijímací. Přijímací část je představována koncovou anténou a televizorem.

Z televizních studií putuje signál směrovými spoji na řídící stanice a odtud na televizní vysílače. Řídící stanice zpracovává signály z více televizních studií. Signál se ve formě elektromagnetického vlnění šíří z vysílačů a převaděčů do antén domácností nebo skupinových antén. Ty jej převádějí na signál elektrický, který je zpracován v jednotlivých televizorech. [10]

Všechny vysílané informace musí být tedy reprezentovány jen základními vlastnostmi vlnění – amplitudou, fází a frekvencí. Na vysílaném signálu tak lze sledovat obrazovou složku, barvovou složku a složku zvukovou (viz obrázek 10).



Obrázek 10: Podoba signálu analogového vysílání televize [13]

Signál je vysílaný v tzv. kanálech. Každý představuje jedno frekvenční pásmo, na kterém může být vysílán jeden televizní program. Definovaná pásma i jejich šířka pro přenos analogové televize se přitom ve světě liší. V České republice má kanál šířku 8 MHz. [10]

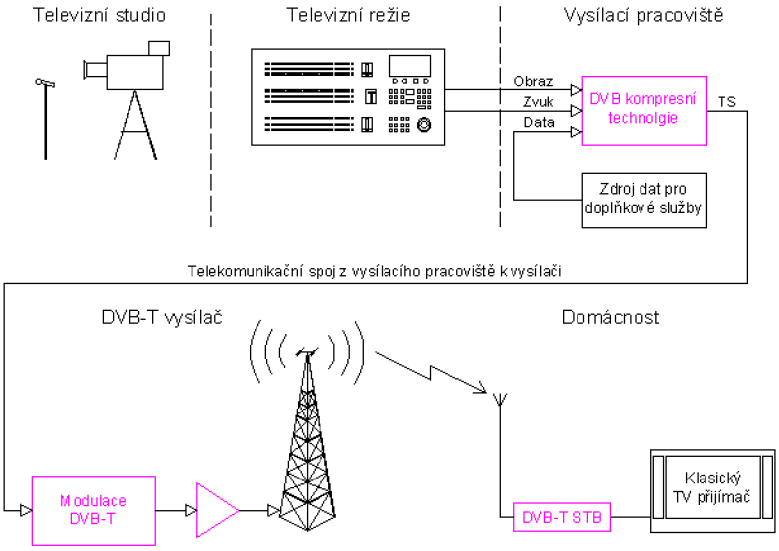
Na obrázku 11 je vidět, že analogový signál jednoho programu nevyplňuje zdaleka celou šířku vymezeného kanálu. To naznačuje, že z hlediska přeneseného množství informací v ohraničeném pásmu není analogové vysílání příliš efektivní.

To ještě umocňuje fakt, že kvůli možnému rušení signálů nemohou sousední vysílače analogové televize vysílat na stejných kanálech. Protože ochranná vzdálenost je závislá na výkonu vysílačů, na pokrytí určitého území jsou potřeba vysílače s velkým vyzářeným výkonem.

2.10. Princip fungování digitálního vysílání televize DVB-T

Z hlediska fungování je princip DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial) zcela odlišný od analogového vysílání televize. [12]

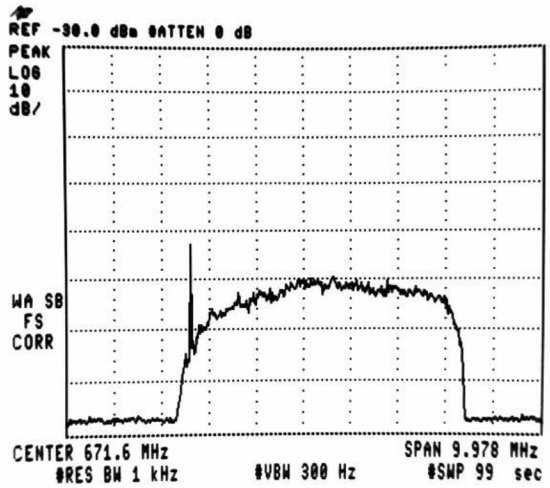
Vstup z televizního studia se rozdělí na složky obrazu a zvuky. Obě složky jsou silně komprimovány a původní bitový tok je zredukován z 166 Mbit/s na 8 – 4 Mbit/s. Informace obrazu a zvuku jsou pak opět spojeny procesem, který se nazývá multiplexování. Do jednoho multiplexu (nebo také MUX) se přitom spojí data z několika televizních stanic a rádií. Vznikne tak výstupní datový tok označovaný jako Transport Stream (viz obrázek 11). V systému DVB-T obsahuje takový tok spojená data ze 4-6 televizních stanic.



Obrázek 11: Princip televize DVB-T [12]

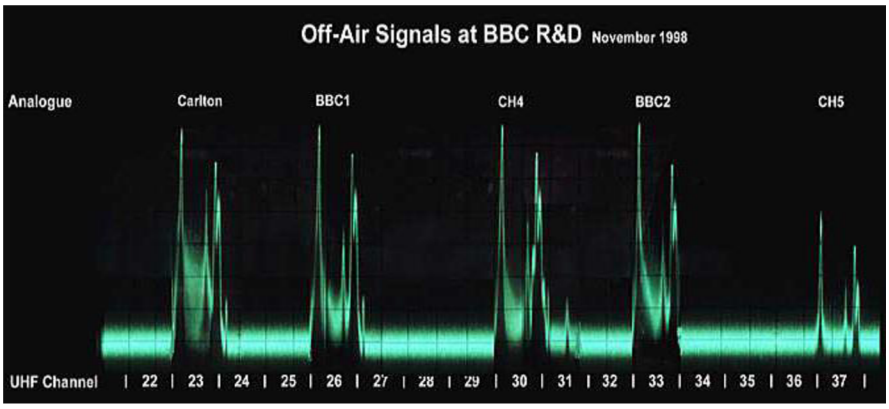
Data v Transport Stream pak putují do modulátoru. Modulovaný signál při přenosu vzduchem daleko lépe odolává překážkám a modulace také slouží jako protichybové zabezpečení. Chyby signálu u analogového vysílání se projeví nekvalitou obrazu či zvuku. U digitálního vysílání je možné určité procento chyb před dekódováním opravit a nedojde tak ke zhoršení kvality obrazu ani zvuku. Pokud ale množství chyb přesáhne určitou hranici, tak jejich oprava není možná a multiplex není možné dekódovat. [9]

Z modulátoru pak signál putuje do vysílače. Protože je digitální signál ČR vysílán ve stejných kanálech jako původní signál analogový, k jeho přijímání lze použít stejnou anténu. Na jednom kanálu už ovšem není vysílaný jeden televizní program, ale celý multiplex (viz obrázek 12).

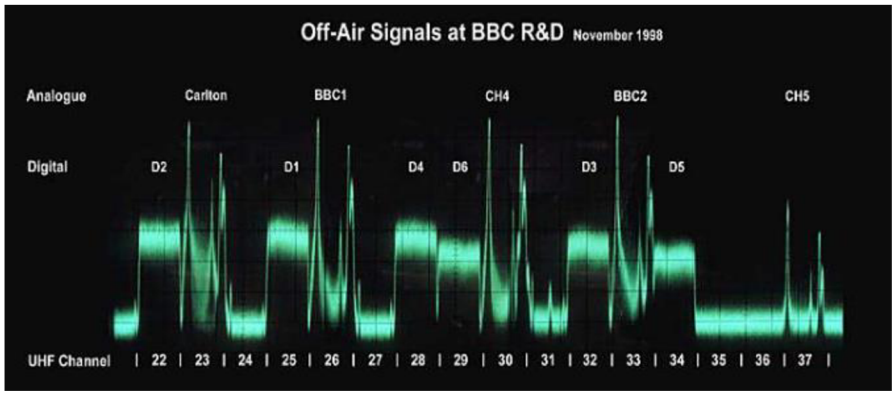


Obrázek 12: Podoba signálu digitálního vysílání televize [13]

Digitální přenos tak umožnuje ve stejné šířce pásma přenášet výrazně více TV programů než přenos analogový. To dobře demonstrují obrázky 13 a 14. Obrázek 13 ukazuje situaci před zahájením digitálního vysílání ve Velké Británii, kdy v daném pásmu bylo vysíláno 5 televizních programů. Obrázek 14 pak ukazuje, že na stejných kanálech bylo po spuštění digitálního vysílání přenášeno 6 multiplexů, z nichž každý může obsahovat až 6 TV programů.



Obrázek 13: Televizní pásma 22-37 BBC před zavedením digitálního vysílání [12]



Obrázek 14: Televizní pásma 22-37 BBC po zavedení digitálního vysílání [12]

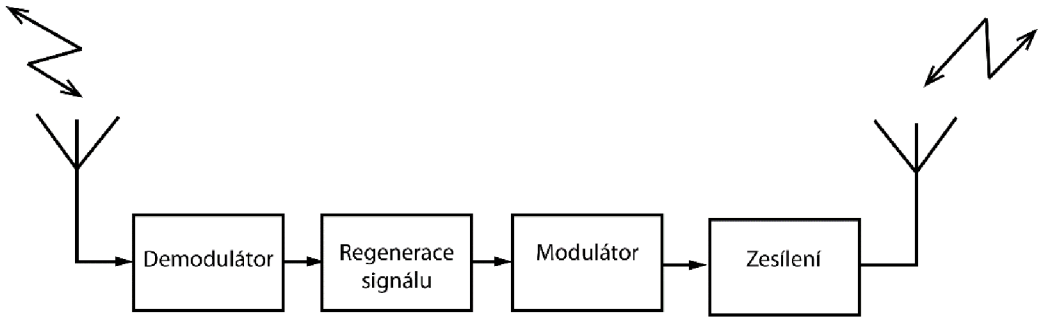
2.11. Televizní převaděče

Televizní signál ze základních televizních vysílačů nedokáže sám o sobě u analogového vysílání ani u DVB uspokojivě pokrýt celé území ČR. Vysílače tedy potřebují síť převáděčů a dokrývačů. Převáděč je zařízení, které přijme televizní signál a rozšíří jej do požadovaného prostoru. [9]

Převaděče digitálního a analogového signálu jsou přitom principiálně odlišně. Jak už bylo zmíněno, při analogovém vysílání nemůžou sousední vysílače vysílat na stejném kanálu kvůli možnému rušení. To znamená, že analogový převaděč musí přijatý signál nejdříve převést na jiný kanál, zesílit, a pak teprve vyslat do vyžadovaného prostoru. To znemožňuje používat více převaděčů v těsné blízkosti. Síť převáděčů tak musí být relativně řídká a musí se jednat o zařízení s velkým výkonem. [10]

U digitálního signálu ale k takovému rušení nedochází. I když interference signálů z různých vysílačů může data ovlivnit, při dekódování signálu dojde k opravě chyb a lze získat neovlivněný signál. Novodobé převaděče tedy vysílají i přijímají signál na stejném kanálu. To umožňuje místo jednoho velkého převaděče použít několik menších a umístit je jen na místa, kde jsou skutečně potřeba.

To ale není jediná výhoda digitálních převaděčů. Zatímco analogové převaděče signál jen zesilují, digitální ho kompletně regenerují. Daný signál totiž demodulují, opraví případné chyby a opět jej modulují. Kvalita signálu na výstupu digitálního převaděče tak může být reálně větší než kvalita přijímaného signálu. Tento proces znázorňuje schéma na obrázku 15.



Obrázek 15: Schéma fungování digitálního TV převaděče [9]

2.12. Přechod z analogového na digitální vysílání v ČR

Historie digitálního vysílání televize se začala psát v roce 1993, kdy se 83 subjektů (převážně veřejnoprávních, ale i soukromých evropských televizních stanic) sjednotilo v projektu digitalizace televize DVB (Digital Video Broadcasting). Vznikl výbor, který měl za cíl doladit technické specifikace digitálního vysílání a zavést jednotné normy. O rok později se pak k projektu přidala i Česká televize. [11]

První řádný digitální televizní signál byl v Česku odvysílán až 12. května 2000, kdy společnost České radiokomunikace začala ve vybraných částech Prahy experimentální přenos. Byly testovány různé technické parametry signálu, typy kódování, vliv rušení a jiné. Později se k testování přidala také společnost Czech Digital Group. Do komerčního provozu ale digitální pozemní vysílání televize DVB-T přešlo až v říjnu roku 2005.

Hlavním důvodem pomalého přechodu byly legislativní spory mezi Radou pro rozhlasové a televizní vysílání, Českým telekomunikačním úřadem a tehdejším Ministerstvem informatiky. [20] Ačkoliv po technické stránce bylo vysílání pozemní digitální televize již relativně zvládnuté, státní orgány se přely o to, kdo má přechod řídit, kdo bude mít právo poskytovat vysílací licence a jaké budou licenční podmínky.

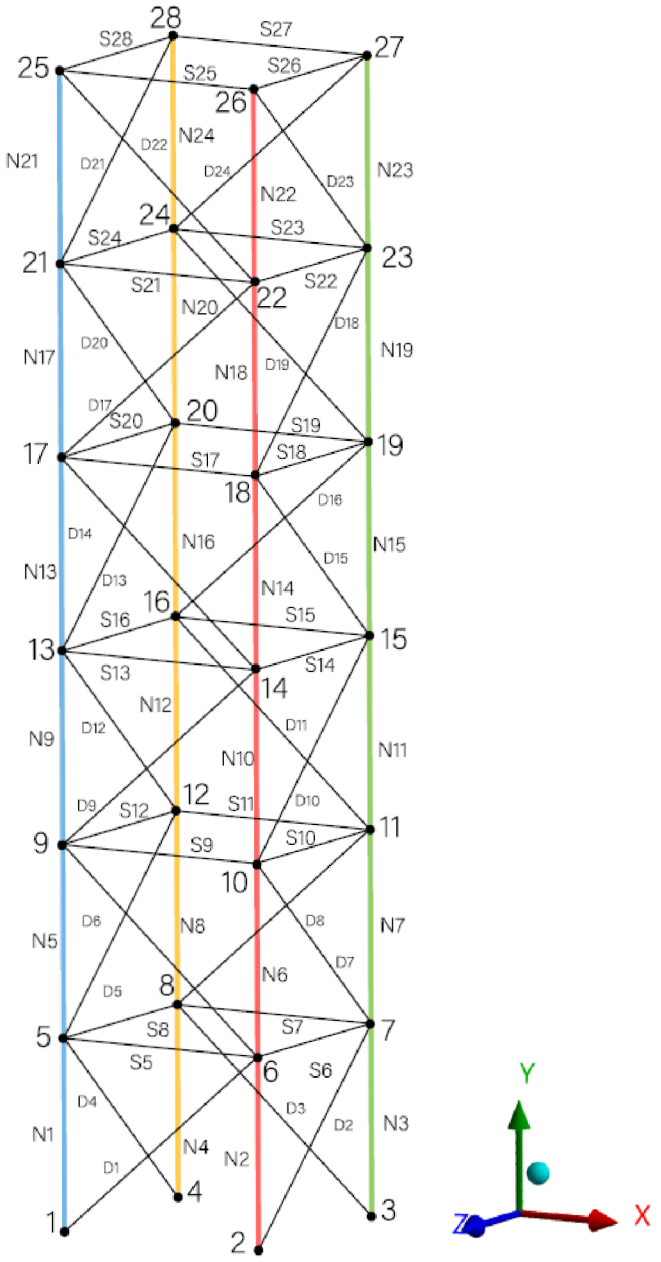
V roce 2005 se konečně společnosti České radiokomunikace podařilo získat řádnou licenci a začalo komerční testovací vysílání v Praze, Brně a Ostravě, které se postupně rozšiřovalo do zbytku republiky.

Od roku 2008 se pak postupně ukončovalo analogové vysílání ve vybraných lokalitách. Poslední analogový vysílač v ČR ukončil provoz v roce 2012.

3. Analytický výpočet

3.1. Konstrukce stožáru jako prutová soustava

Ve výpočtech byla konstrukce stožáru považována za prutovou soustavu, která by se bez modifikací skládala z 276 prutů a 96 styčníků. Pro lepší orientaci v modelu byly pruty rozděleny do tří kategorií – nárožníky (N1 – N92), diagonály (D1 – D92) a svislice (S5 – S96). Nohy stožáru byly označeny řeckými písmeny $\alpha, \beta, \gamma, \delta$. Styčníky byly pak označeny čísly. Označení prutů a styčníků v části A4 je uvedeno na obrázku 16. Označení prutů a styčníků v částech A3 a A2 je v příloze 5.



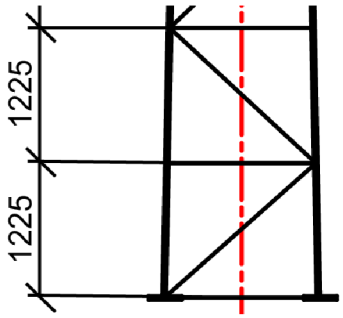
Obrázek 16: Popis prutů a styčníků v A4

Příčné průřezy prutů byly zvoleny tak, aby odpovídaly skutečným profilům použitým na stožáru (dle Tabulky 1). Délky jsou také zvoleny podle skutečného stožáru. Pro části A4 a A2 udává tabulka 2 délky svislic a nárožníků. Délky diagonálních prutů v A4 i A2 pak byly dopočítány z Pythagorovy věty.

1,225 m	1,090 m	nárožníky
1,400 m	1,000 m	svislice
A4	**A2**	označení dílu

Tabulka 2: Délka prutů

V části A3 nejsou délky prutů konstantní. Konstantní zůstává pouze výška jednotlivých segmentů, a to 1,225 m.



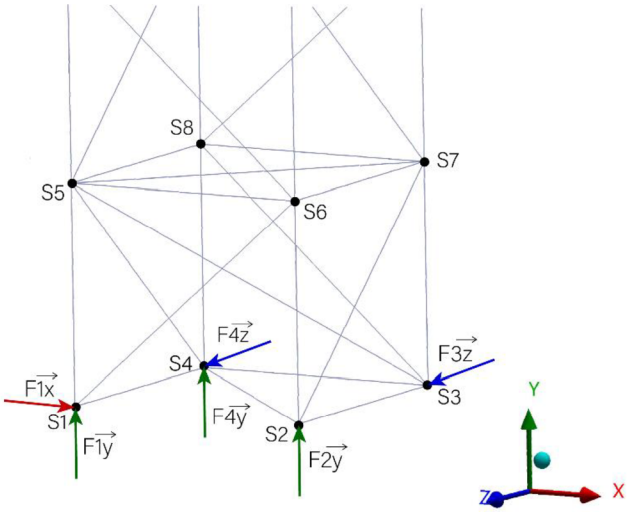
Obrázek 17: Vzdálenost úseků v A3

V analytickém řešení pak byly pro část věže A3 použity délky prutů spočítané v programu ANSYS při řešení numericky.

3.2. Statický rozbor

3.2.1. Vnější statická určitost

Pro odebrání všech stupňů vnější volnosti bylo do soustavy přidáno šest stykových sil $F1x$, $F1y$, $F2y$, $F4y$, $F3z$, $F4z$. Jejich rozložení zobrazuje obrázek 18.



Obrázek 18: Stykové síly

Aby bylo možné zabránit posuvům ve všech směrech a rotacím, bylo potřeba jednu nohu stožáru nechat nepodepřenou ve směru osy y. Do styčníku 3 tedy byla přidaná pouze reakční síla $F3z$. Tím se ale model vzdaluje od reálné konstrukce stožáru. To je zohledněno ve výpočtových variantách přidáním stykové síly do styčníku 3 a předepsáním deformační podmínky.

Soustava je tak z vnějšku staticky určitá a platí, že počet použitelných podmínek statické rovnováhy je stejný jako počet vnějších neznámých parametrů stykových sil.

$$\nu = 6 \tag{14}$$

$$\mu_A = 6 \tag{15}$$

$$\nu = \mu_A \tag{16}$$

3.2.2. Vnitřní statická určitost

Stožár bez úprav tvoří 276 prutů a 96 styčníků. Pro stupeň vnitřní statické určitosti platí podle vztahu 2, že

$$s = 276 - (3 \cdot 96 - 6) = -6 \tag{17}$$

Protože $s < 0$, jedná se o soustavu vnitřně pohyblivou a je potřeba do konstrukce stožáru doplnit šest prutů.

Vnitřní pohyblivost se v soustavě rovnic statické rovnováhy projeví tím, že některé rovnice jsou na sobě závislé a soustava tak není řešitelná. Pruty ale není možné do soustavy doplnit libovolně. Přidání každého prutu totiž do soustavy přidá i další neznámou normálovou sílu. Je tedy nutné, aby doplnění každého prutu zvýšilo počet na sobě nezávislých rovnic statické rovnováhy alespoň o dvě. Při volbě vhodných prutů je navíc potřeba uvažovat správné rozmístění vnějších stykových sil, protože i ty se promítnou v soustavě (viz *3.2.1 Vnější statická určitost*).

Původně bylo experimentováno s postupem, kdy se umístění doplněných prutů testovalo v programu Workbench. Tento postup se ale ukázal jako ne zcela vhodný. Informace o řešitelnosti nebo neřešitelnosti soustavy ANSYS poskytl vždy až s doplněním všech šesti chybějících prutů. Bylo by tak potřeba na jeden pokus doplnit všechny pruty správně.

Protože byl k sestavení rovnic statické rovnováhy použit program Matlab a bylo pracováno s maticovým tvarem soustavy dle vztahu 4 (viz *3.3 Rovnice statické rovnováhy*), bylo možné závislost jednotlivých rovnic sledovat pomocí funkce *rank*, která zobrazuje hodnost matice. Hodnost matice A pak udává počet nezávislých rovnic statické rovnováhy. Byl proto napsán kód, který pomáhal určit, které řádky matice A jsou na sobě závislé (viz obrázek 19).

```
%hledani zavislych radku matice A
    B=zeros(1,288);
        for k = 1:288
            b(k)=rank(B);
            B(k,:)=A(k,:);
            c(k)=rank(B);

           if b(k)==c(k)
              b(k)
           end
        end
```

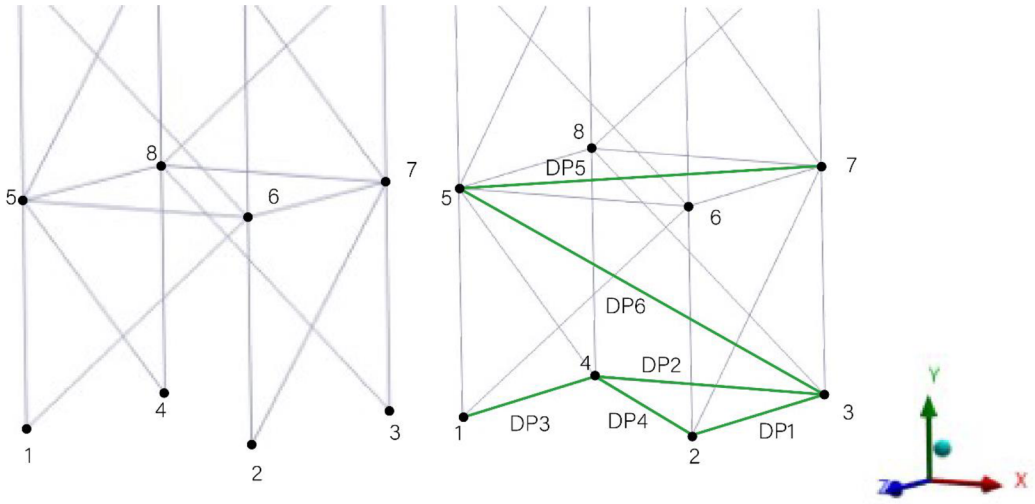
Obrázek 19: Hledání závislých řádků matice A

Tato informace sloužila jako první nápověda, kam mají být pruty doplněny. Přednostně byly přidány pruty do styčníků 2, 3 a 4, které by se zvolenými stykovými silami jinak zůstaly pouze dvojrozměrné.

Přidání prutu do správného styčníku stále ale často znamenalo, že závislost mezi řádky vznikla jinde. Bylo tedy i tak potřeba relativně velké množství pokusů. Na rozdíl od testování v ANSYSu bylo ale možné sledovat vliv doplnění každého prutu samostatně. Tato metoda se tak ukázala výrazně efektivnější.

Výslednou variantu doplnění prutů pak zobrazuje obrázek 20. Doplnění daných prutů odstranilo závislosti řádků v matici systému. Bylo tedy možné model řešit jako prutovou soustavu s vnější i vnitřní statickou určitostí.

Doplněným prutům pak byly přiřazeny příčné průřezy, které logicky odpovídají příčným průřezům ve zbytku stožáru (viz tabulka 3).



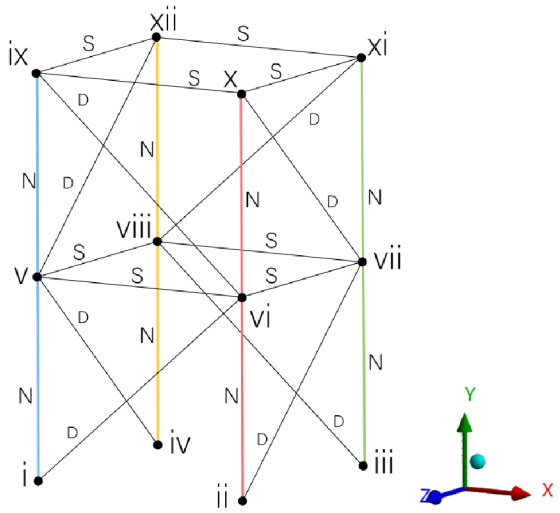
Obrázek 20: Rozmístění doplněných prutů

Doplněný prut	Styčníky	Zvolený profil
DP1	2; 3	TR 44.5/3
DP2	3; 4	TR 44.5/3
DP3	4; 1	TR 44.5/3
DP4	2; 4	TR 60/3
DP5	5; 7	TR 60/3
DP6	3; 5	TR 60/3

Tabulka 3: Profily doplněných prutů

3.3. Rovnice statické rovnováhy

Při analytickém řešení je potřeba řešit soustavu 288 rovnic (3 rovnice pro každý styčník) o 288 neznámých (282 normálových sil v prutech a 6 stykových sil). Sestavení všech rovnic ručně by tak bylo časově velmi náročné. Navíc by bylo téměř nemožné v soustavě odhalit případné chyby. Fakt, že se konstrukce stožárů skládá z opakujících se úseků (viz Obrázek 24), umožnil zápis rovnic z velké části zautomatizovat.



Obrázek 21: Označení prutů a styčníků jednoho úseku věže

Sestavení rovnic bylo provedeno v Matlabu. Byl používán zápis v maticovém tvaru dle vztahu 4. Základ tvoří matice soustavy A, kde sloupce matice představují normálové síly v prutech a síly stykové. Řádky matice A představují rovnice statické rovnováhy pro jednotlivé styčníky ve směrech os x, y, z. Každá hodnota v matici pak představuje násobek dané síly v příslušné rovnici statické rovnováhy. Konkrétní řádky i sloupce matice A jsou vypsány v příloze 1.

Úsek z obrázku 24 se ve věži stožáru opakuje jedenáctkrát. Rovnice ze styčníků 6 tak jdou sestavit obdobným způsobem jako rovnice styčníků 14, 22, … Obdobně pak rovnice styčníků 10, 18, 26 a tak dále. K sestavení matice A tak bylo použito 8 algoritmů, kdy každý sestavuje rovnice pro 11 styčníků. První algoritmus, který sestavuje rovnice pro jedenáct styčníků 6, 14, 30, 38, 46, 54, 62, 70, 78 a 86, je na obrázku 25. Ručně jsou pak sestaveny rovnice pro styčníky spodního (1,2,3,4) a horního patra stožáru (93, 94, 94, 96).

```
% ---------BETA---------------------------------------------

   %--------------stycníky 6, 14, ...--------------------------
          i=0;
           for j=1:p
            %--x-ová složka
               A((j-1)*3+1,i+1)=-1;                          %S5,S13,...
               A((j-1)*3+1,i+93)=-C(2*j-1,1)/dD(2*j-1);      %D1,D9,...
               A((j-1)*3+1,i+98)=-C(2*j,1)/dD(2*j);          %D6,D14,...
               A((j-1)*3+1,i+186)=C(2*j-1,2)/dN(2*j-1);      %N2,N10,...
               A((j-1)*3+1,i+190)=-C(2*j,2)/dN(2*j);         %N6,N14,...
            %--y-ová složka
               A((j-1)*3+2,i+93)=-C(2*j-1,3)/dD(2*j-1);      %D1,D9,...
               A((j-1)*3+2,i+98)=C(2*j,3)/dD(2*j);           %D6,D14,...
               A((j-1)*3+2,i+186)=-C(2*j-1,3)/dN(2*j-1);     %N2,N10,...
               A((j-1)*3+2,i+190)=C(2*j,3)/dN(2*j);          %N6,N14,...
            %--z-ová složka
               A((j-1)*3+3,i+2)=-1;                          %S6, S14,...
               A((j-1)*3+3,i+93)=C(2*j-1,2)/dD(2*j-1);       %D1,D9,...
               A((j-1)*3+3,i+98)=-C(2*j,2)/dD(2*j);          %D6,D14,...
               A((j-1)*3+3,i+186)=C(2*j-1,2)/dN(2*j-1);      %N2,N10,...
               A((j-1)*3+3,i+190)=-C(2*j,2)/dN(2*j);         %N6,N14,...

             i=i+8;
           end
```

Obrázek 22: Algoritmus pro sestavení rovnic rovnováhy vybraných styčníků

V rovnicích rovnováhy je třeba udávat průměty daných sil do směrů os soustavy souřadnic. To lze vyjádřit pomocí goniometrických funkcí a úhlů, které každá síla svírá s danou osou. Díl věže A3 se ale zužuje a tento způsob tak pro něj není vhodný. Vhodnější je vyjádřit průměty pomocí délek jednotlivých prutů, které jsou používány i ve zbytku výpočtu. K tomu byla vytvořena pomocná matice C, která udává délky příslušných složek ve směru souřadnicových os.

Vydělením správné hodnoty z matice C délkou daného prutu je pak získán průmět normálové síly do souřadnicové osy. Celá matice je k nalezení v příloze 1.

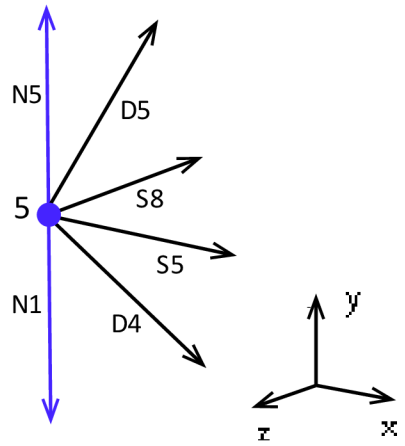
```
%-------------Matice C-----------------
   %-------dlouhe - 1. sloupec---------
      for j=1:23
          C(j,1)=(dS(j)+dS(j+1))/2;
      end
   %-------kratke - 2. sloupec---------
      for j=1:23
          C(j,2)=(dS(j)-dS(j+1))/2;
      end
   %-------y-ove - 3. sloupec----------
      for j=1:23
          C(j,3)=dN(j,1);
      end
```

Obrázek 23: Algoritmus pro sestavení matice C

To, že je soustava v maticovém tvaru, velmi ulehčilo hledání chyb. Díky tomu, že matice byla vytvořená algoritmicky, se v ní totiž případné chyby musejí mnohokrát opakovat. Pro kontrolu také pomohlo, že součet prvků každého sloupce matice soustavy musí být nulový (kromě posledních šesti sloupců, které reprezentují vnější stykové síly).

Pro názornost jsou zde uvedeny levé strany rovnic rovnováhy pro styčníky 5, 6, 7, 8 a následně jsou uvedeny příslušné řádky a sloupce matice A. Celá matice A je pak v příloze 1. Ve zmíněných rovnicích nejsou obsaženy síly doplněných prutů. Ty byly do matice přidány ručně a nejsou tak součástí algoritmů.

3.3.1. Styčník 5



Obrázek 24: Síly v prutech styčníku 5

x: $S5$

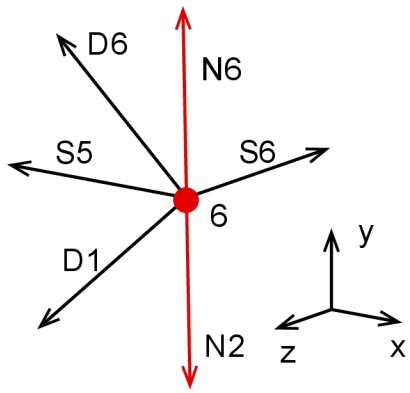
$$y: -N1 + N5 - \frac{D4}{dD4} \cdot \sqrt{dN1^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS4 - \sqrt{2} \cdot dS8}{2}\right)^2} + \frac{D5}{dD5} \cdot \sqrt{dN5^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS8 - \sqrt{2} \cdot dS12}{2}\right)^2} \qquad (18)$$

$$z: -S8 - D4 \cdot \frac{dS4 + dS8}{2 \cdot dD4} - D5 \cdot \frac{dS8 + dS12}{2 \cdot dD5}$$

		S5	S8	D4	D5	N1	N5
	ř. / s.	1	4	96	97	185	189
x	217	**1,00**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
y	218	0,00	0,00	**-0,38**	**0,38**	**-1,00**	**1,00**
z	219	0,00	**-1,00**	**-0,93**	**-0,93**	0,00	0,00

Tabulka 4: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 5

3.3.2. Styčník 6



Obrázek 25: Síly v prutech styčníku 6

$$x: -S5 - D1 \cdot \frac{dS1 + dS5}{2 \cdot dD1} - D6 \cdot \frac{dS5 + dS9}{2 \cdot dD6}$$

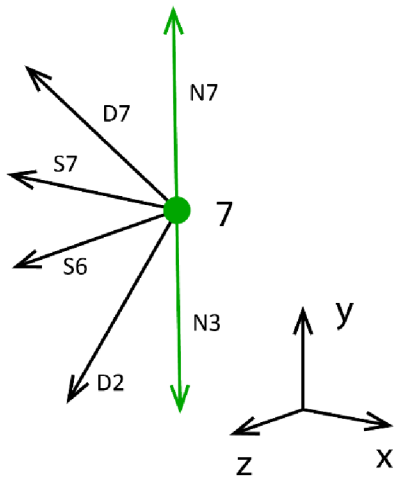
$$y: -N2 + N6 - \frac{D1}{dD1} \cdot \sqrt{dN2^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS1 - \sqrt{2} \cdot dS5}{2}\right)^2} + \frac{D6}{dD6} \cdot \sqrt{dN6^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS5 - \sqrt{2} \cdot dS9}{2}\right)^2} \qquad (19)$$

$$z: -S6$$

		S5	S6	D1	D6	N2	N6
	ř. / s.	1	2	93	98	186	190
x	1	**-1,00**	0,00	**-0,93**	**-0,93**	0,00	0,00
y	2	0,00	0,00	**-0,38**	**0,38**	**-1,00**	**1,00**
z	3	0,00	**-1,00**	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka 5: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 6

3.3.3. Styčník 7



Obrázek 26: Síly v prutech styčníku 7

$$x: -S7$$

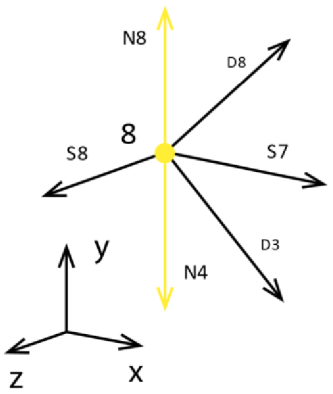
$$y: -N3 + N7 - \frac{D2}{dD2} \cdot \sqrt{dN3^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS2 - \sqrt{2} \cdot dS6}{2}\right)^2} + \frac{D7}{dD7} \cdot \sqrt{dN7^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS6 - \sqrt{2} \cdot dS10}{2}\right)^2} \qquad (20)$$

$$z: S6 + D2 \cdot \frac{dS2 + dS6}{2 \cdot dD2} + D7 \cdot \frac{dS6 + dS10}{2 \cdot dD7}$$

		S6	S7	D2	D7	N3	N7
	ř. / s.	2	3	94	99	187	191
x	73	0,00	**-1,00**	0,00	0,00	0,00	0,00
y	74	0,00	0,00	**-0,38**	**0,38**	**-1,00**	**1,00**
z	75	**1,00**	0,00	**0,93**	**0,93**	0,00	0,00

Tabulka 6: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 7

3.3.4. Styčník 8



Obrázek 27: Síly v prutech styčníku 8

$$x: S7 + D3 \cdot \frac{dS3 + dS7}{2 \cdot dD3} + D8 \cdot \frac{dS7 + dS11}{2 \cdot dD8}$$

$$y: -N4 + N8 - \frac{D3}{dD3} \cdot \sqrt{dN4^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS3 - \sqrt{2} \cdot dS7}{2}\right)^2} + \frac{D8}{dD8} \cdot \sqrt{dN8^2 - \left(\frac{\sqrt{2} \cdot dS7 - \sqrt{2} \cdot dS11}{2}\right)^2} \quad (21)$$

$$z: S8$$

		S7	S8	D3	D8	N4	N8
	ř. / s.	3	4	95	100	188	192
x	145	**1,00**	0,00	**0,93**	**0,93**	0,00	0,00
y	146	0,00	0,00	**-0,38**	**0,38**	**-1,00**	**1,00**
z	147	0,00	**1,00**	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka 7: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 8

3.4. Zatěžující prvky

Všechny zatěžující prvky síly byly zanášeny do sloupcového vektoru G.

V našem modelu se pracuje se třemi typy zatěžujících sil:

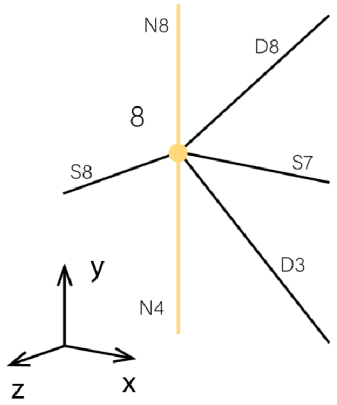
1. Zatížení od tíhy konstrukce
2. Zatížení od tíhy antén a kabeláže
3. Zatížení od větru

Pro všechny varianty je pak společné jen zatížení od vlastní tíhy konstrukce.

3.4.1. Zatížení od tíhy konstrukce

Každému styčníku byla přiřazena tíhová síla odpovídající polovině celkové tíhy všech prutů navázaných do styčníku. Zápis do vektoru G byl opět proveden v Matlabu pomocí cyklu *for* pro všechny styčníky kromě prvního a horního patra věže.

Pro názornost je zde uveden výpočet tíhové síly pro styčník 8.



Obrázek 28: Detail styčníku 8

$$F_{g8} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \rho \cdot (dS8 \cdot sS8 + dS7 \cdot sS7 + dN4 \cdot sN4 + dN8 \cdot sN8 + dD3 \cdot sD3 + dD8 \cdot sD8) \quad (22)$$

kde F_{g8} je tíhová síla působící na styčník 8, ρ je hustota oceli a g gravitační zrychlení. Hodnoty dX, sX pak udávají délku a obsah průřezů daného prutu. Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu použitých zkratek a symbolů.

V Matlabu je pak příslušná hodnota F_{g8} zapsána do řádku 146 vektoru G, který odpovídá y-ové složce zatěžujících sil na styčník 8.

Při výpočtech zanedbáváme hmotnost žebříku, který vede středem stožáru. Žebřík není nosný a jeho přidání by se celkové zatížení změnilo jen málo.

3.4.2. Tíha antén

Na věži stožáru jsou od zastavení analogového vysílání televize umístěny pouze antény telefonních operátorů. Jedná se celkem o pět velkých antén:tři antény GSM Kathrein 739685 a dvě antény LTE Kathrein 80010668 (viz obrázky 29 a 31) . Na každé noze stožáru je připevněna jedna anténa, pouze na noze β jsou antény dvě antény LTE. Výrobce v dokumentaci udává pro anténu K739685 hmotnost 18 kg [16] a pro K80010668 20,5 kg [17]. Protože to ale nezahrnuje montážní materiál, při výpočtech byla uvažována hmotnost jedné antény jako 25 kg. Tíha každé antény je pak rozpočítána do horních třech styčníků nohy stožáru, na které je umístěna. Tíha dalších malých antén na stožáru byla při výpočtech zanedbána.

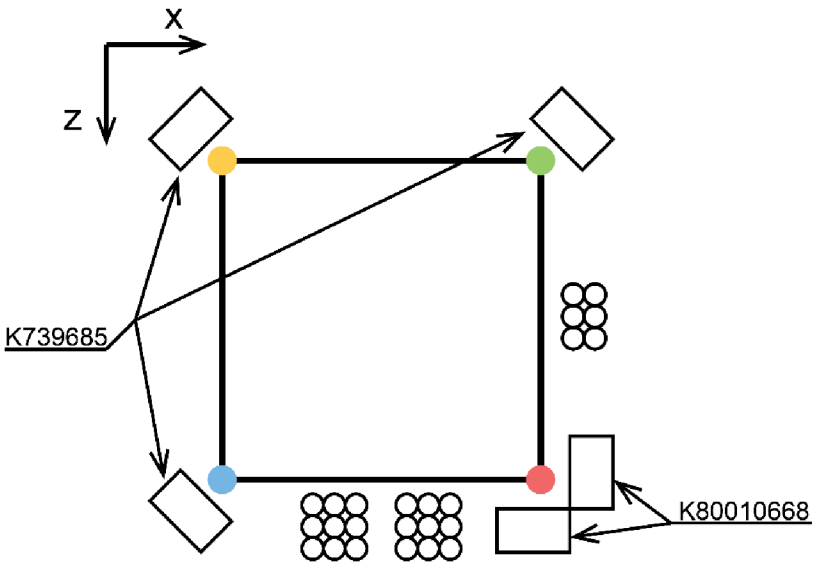
Obrázek 29: Antény na věži převaděče [7]

3.4.3. Tíha kabeláže

Nezanedbatelná je také tíha kabelů, které vedou energii a signál k anténám. Protože kabely nepatří společnosti České radiokomunikace, ale jsou vlastněny a spravovány mobilními operátory, obdržená dokumentace o nich neobsahovala žádné informace. Na místě bylo nalezeno označení kabelů RFS CELLFLEX LCF78-50JA (viz Obrázek 37), což umožnilo dohledat příslušnou dokumentaci výrobce [19]. Ta uvádí měrnou hmotnost jednoho kabelu jako 0,48 kg/m.

Obrázek 30: Detail označení kabelů

Celkově vede na stožár 18 těchto kabelů. Jejich umístění na stožáru zobrazuje obrázek 38. Kabely nevedou od země a na stožár se napojují až mezi styčníky 9, 10 a 10, 11.



Obrázek 31: Rozmístění antén a kabeláže

Pro názornost je ukázán výpočet zatížení od kabeláže na styčníku 14.

$$F_{g14} = \frac{18}{4} \cdot g \cdot m_k \cdot (dN8 + dN14) + \frac{6}{4} \cdot g \cdot m_k \cdot (dN8 + dN14) \qquad (23)$$

kde m_k je měrná hmotnost jednoho kabelu ($m_k = 0{,}48\,\mathrm{kg/m}$). Na styčník 14 tak působí dodatečná zatěžující síla o velikosti 69,22 N.

3.4.4. Zatížení větrem

Při výpočtu zatížení od větru bylo vycházeno z normy ČSN EN 1991-1-4 [18]. Ta uvádí pokyny pro stanovení zatížení větrem při navrhování pozemních a inženýrských staveb s výškou do 200 m.

Sílu větru působící na nosný prvek norma stanoví jako

$$F_w = q_p(z_e) \cdot A_{ref} \tag{24}$$

kde $q_p(z_e)$ je maximální dynamický tlak v referenční výšce a A_{ref} je referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku. Maximální dynamický tlak ve výšce z potom norma definuje jako

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2}\rho \cdot v_m^2(z) \tag{25}$$

kde ρ je měrná hmotnost vzduchu. Pro ČR norma uvádí doporučenou hodnotu $\rho = 1{,}25\ kg/\ m^3$.

v_m je střední rychlost větru, pro kterou platí

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \tag{26}$$

kde $c_r(z)$ je součinitel drsnosti terénu a $c_0(z)$ je součinitel orografie (v našem případě lze uvažovat jako $c_0(z) = 1$). v_b je základní rychlostí větru, která je stanovena dle mapy větrných oblastí. Stožár pak leží ve větrové oblasti II, kde základní rychlost větru je 25,0 m/s [6].

Pro součinitel drsnosti terénu pak platí

$$c_r(z) = k_r \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{27}$$

z_0 je parametr drsnosti terénu. Stožár stojí na zalesněném kopci a spadá tak do kategorie terénu III. To jsou oblasti pravidelně pokryté vegetací, budovami nebo překážkami. Pro parametr drsnosti terénu platí, že $z_{0,III} = 0{,}3$. Vztah ale platí jen pro z vyšší než minimální výška z_{min}, která je pro třetí kategorii terénu 5 metrů. Pro $z < z_{min}$ platí $c_r(z) = c_r(z_{min})$.[1]

$k_r$je součinitel terénu, který se vypočte ze vztahu

$$k_r = 0{,}19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0{,}07} \tag{28}$$

$z_{0,II}$ je 0,05. $I_v(z)$ je pak součinitel intenzity turbulence v referenční výšce, pro který platí

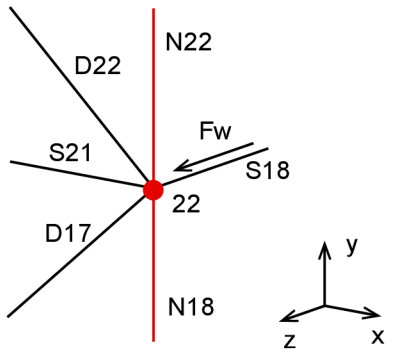
$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \tag{29}$$

[1] Dynamický tlak větru dle ČSN uvažovaly na této fakultě také bakalářské práce *Napjatostně deformační analýza rozhledny Hraniční vrch* [14] a *Napjatostně deformační analýza Kozlovské rozhledny* [15]. Obě práce ale chybně uvádějí pro výšku menší než minimální $c_r(z) = 0$.

kde k_1 je součinitel turbulence s doporučenou hodnotou pro ČR 1,0. Vztah opět platí jen pro z, které je větší než z_{min}. Pro $z < z_{min}$ platí $I_v(z) = I_v(z_{min})$.

Referenční plocha A_{ref} je pak dle kapitoly 7.9 normy vypočítána pro kruhové válce jako $A_{ref} = l \cdot b$, kde l je délka válce a b je jeho průměr.

V našem modelu bylo uvažováno, že na každý styčník působí polovina síly větru z každého navázaného prutu. Jako referenční výška z byla uvažována výška každého styčníku.



Obrázek 32: Detail styčníku 22 se zatížením větrem

Například na styčník 22 ve výšce 6,125 m působí síla $Fw22$ ve směru osy z (viz obrázek 32), pro kterou platí

$$F_{w22} = \frac{1}{2} \cdot q_p(6{,}125) \cdot \left(A_{refN18} + A_{refN22} + A_{refS18} + A_{refS21} + A_{refD17} + A_{refD22}\right) \quad (30)$$

Zvlášť je pak počítáno zatížení větru na kabeláž. Stejně jako pruty byly i kabely z hlediska zatížení větrem považovány za kruhové válce.

Na styčník 22 tak působí ještě dodatečná síla větru od kabeláže F_{w22K}, pro kterou platí

$$F_{w22K} = \frac{1}{2} \cdot q_p(6{,}125) \cdot A_{refK22} \quad (31)$$

Výpočet zatížení od větru je pak v Matlabu realizován pomocí funkce *Fvitr.m*, která je k nalezení v příloze 2.

3.5. Výpočet normálových sil v prutech

Mezi maticí soustavy A a sloupcovým vektorem úplně zadaných zatěžujících sil G platí vztah

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{F} = \mathbf{G} \tag{32}$$

kde F je sloupcový vektor neznámých parametrů a dá se v Matlabu vyjádřit pomocí funkce levostranného dělení jako

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} \backslash \mathbf{G} \tag{33}$$

3.6. Výpočet bezpečnosti

Výpočet bezpečnosti byl proveden pro všechny pruty přímo v Matlabu. Pro každý prut byla napřed vypočtena štíhlost λ, která byla porovnána s kritickou štíhlostí λ_k. Jako koeficient uložení α byla dosazena hodnota π.
Pokud je štíhlost daného prutu větší než kritická a zároveň je prut namáhaný na tlak, určí se bezpečnost podle vztahu 7 jako podíl kritické síly a velikosti normálové síly v prutu. V opačném případě byla bezpečnost určena z MSP jako podíl výpočtové meze kluzu a velikosti normálového napětí v daném prutu.

```
for i=1:282

 Lambda(i,1)=DEL(i)/sqrt(Jy(i)/PRU(i));  %stihlost prutu
 Fv(i)=pi^2*E*Jy(i)/DEL(i)^2;

  %pokud je stihlost vetsi nez kritiucka a prut je namahany na tlak
     if Lambda(i,1)>LambdaK & N(i)<0
         K(i)=Fv(i)/abs(F(i)); %vypocet bezpecnosti K MSP
     else
         K(i)=Re/abs(N(i)); %vypocet bezpecnosti K MSP
     end

end
```

Obrázek 33: Algoritmus výpočtu bezpečnosti v Matlabu

3.7. Výpočet deformací

Deformace jsou počítány pomocí doplňkových sil z Castiglianovy věty. Pro prutovou soustavu jde posunutí každého styčníku vyjádřit v následujícím tvaru:

$$u = \sum_{i=1}^{282} \frac{F(i) \cdot l(i)}{S(i) \cdot E} \cdot \frac{\partial F(i)}{\partial FD} \tag{34}$$

V Matlabu jsou pak deformace zaneseny v matici U, která pro každý styčník udává deformaci ve směrech os x, y a z. Díky tomu, že daná soustava je lineární, parciální derivace můžeme určit také pomocí funkce levostranného dělení

$$\mathbf{PD} = \mathbf{A} \backslash \mathbf{FD} \tag{35}$$

kde PD je vektor parciálních derivací a FD je vektor příslušné doplňkové síly.

Algoritmus pro výpočet parciálních derivací sil v Matlabu pak ukazuje obrázek 34. Při zpracování výsledků pak ještě byla určena celková velikost posunutí každého styčníku jako

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \tag{36}$$

```
%%Deformace

    U=zeros(288,1);

     for p=1:288 %pro kazdy stycnik a kazdy smer

         FD=zeros(288,1); % doplnkova sila
         FD(p,1)=1;

        PD=zeros(288,1); %matice parcialnich derivaci

        PD=A\FD; %parcialni derivace

            for i=1:282 %pro kazdou silu v prutu
                U(p)=U(p)+(PD(i)*F(i)*DEL(i)/(E*PRU(i)));
            end

     end
```

Obrázek 34: Výpočet deformace v Matlabu

3.8. Varianta I

Jako první byl výpočet proveden pro staticky určitou variantu, kdy noha γ není podepřená ve směru osy y. Jediné zatížení, které bylo v této variantě uvažováno, je zatížení vlastní tíhou konstrukce.

Tabulka zobrazuje pruty s nenulovým napětím.

	Prut	Síly	Napětí	Bezpečnost
		[N]	[MPa]	-
3	**S7**	-7329.70	-18.74	12.21
21	**S25**	80.26	0.21	1145.28
22	**S26**	80.26	0.21	1145.28
23	**S27**	80.26	0.21	1145.28
24	**S28**	80.26	0.21	1145.28
25	**S29**	-7.23	-0.02	12717.79
26	**S30**	-7.23	-0.02	12717.79
27	**S31**	-7.23	-0.02	12717.79
28	**S32**	-7.23	-0.02	12717.79
29	**S33**	-7.43	-0.02	12375.93
30	**S34**	-7.43	-0.02	12375.93
31	**S35**	-7.43	-0.02	12375.93
32	**S36**	-7.43	-0.02	12375.93
33	**S37**	-7.34	-0.02	12524.31
34	**S38**	-7.34	-0.02	12524.31
35	**S39**	-7.34	-0.02	12524.31
36	**S40**	-7.34	-0.02	12524.31
37	**S41**	-7.15	-0.02	12856.79
38	**S42**	-7.15	-0.02	12856.79
39	**S43**	-7.15	-0.02	12856.79
40	**S44**	-7.15	-0.02	12856.79
41	**S45**	-7.07	-0.02	12996.78
42	**S46**	-7.07	-0.02	12996.78
43	**S47**	-7.07	-0.02	12996.78
44	**S48**	-7.07	-0.02	12996.78
45	**S49**	-7.00	-0.02	13127.97
46	**S50**	-7.00	-0.02	13127.97
47	**S51**	-7.00	-0.02	13127.97
48	**S52**	-7.00	-0.02	13127.97
49	**S53**	-6.96	-0.03	9224.72
50	**S54**	-6.96	-0.03	9224.72
51	**S55**	-6.96	-0.03	9224.72
52	**S56**	-6.96	-0.03	9224.72
53	**S57**	-30.08	-0.11	2001.18
54	**S58**	-30.08	-0.11	2001.18
55	**S59**	-30.08	-0.11	2001.18

	Prut	Síly	Napětí	Bezpečnost
		[N]	[MPa]	-
56	**S60**	-30.08	-0.11	2001.18
94	**D2**	-9739.48	-9.57	23.10
95	**D3**	9739.48	9.57	24.56
185	**N1**	193.06	0.10	2340.29
186	**N2**	-6155.55	-3.20	73.40
187	**N3**	228.13	0.12	1980.59
188	**N4**	-12569.04	-6.54	35.95
189	**N5**	-5786.19	-3.01	78.09
190	**N6**	-5786.19	-3.01	78.09
191	**N7**	-5786.19	-3.01	78.09
192	**N8**	-5786.19	-3.01	78.09
193	**N9**	-5416.83	-2.82	83.41
194	**N10**	-5416.83	-2.82	83.41
195	**N11**	-5416.83	-2.82	83.41
196	**N12**	-5416.83	-2.82	83.41
197	**N13**	-5047.47	-2.63	89.51
198	**N14**	-5047.47	-2.63	89.51
199	**N15**	-5047.47	-2.63	89.51
200	**N16**	-5047.47	-2.63	89.51
201	**N17**	-4678.11	-2.43	96.58
202	**N18**	-4678.11	-2.43	96.58
203	**N19**	-4678.11	-2.43	96.58
204	**N20**	-4678.11	-2.43	96.58
205	**N21**	-4308.74	-2.24	104.86
206	**N22**	-4308.74	-2.24	104.86
207	**N23**	-4308.74	-2.24	104.86
208	**N24**	-4308.74	-2.24	104.86
209	**N25**	-3939.90	-2.05	114.68
210	**N26**	-3939.90	-2.05	114.68
211	**N27**	-3939.90	-2.05	114.68
212	**N28**	-3939.90	-2.05	114.68
213	**N29**	-3574.87	-1.86	126.39
214	**N30**	-3574.87	-1.86	126.39
215	**N31**	-3574.87	-1.86	126.39
216	**N32**	-3574.87	-1.86	126.39
217	**N33**	-3214.46	-1.67	140.56

	Prut	Síly	Napětí	Bezpečnost
		[N]	[MPa]	-
218	**N34**	-3214.46	-1.67	140.56
219	**N35**	-3214.46	-1.67	140.56
220	**N36**	-3214.46	-1.67	140.56
221	**N37**	-2858.11	-1.49	158.08
222	**N38**	-2858.11	-1.49	158.08
223	**N39**	-2858.11	-1.49	158.08
224	**N40**	-2858.11	-1.49	158.08
225	**N41**	-2505.97	-1.30	180.30
226	**N42**	-2505.97	-1.30	180.30
227	**N43**	-2505.97	-1.30	180.30
228	**N44**	-2505.97	-1.30	180.30
229	**N45**	-2158.18	-1.12	209.35
230	**N46**	-2158.18	-1.12	209.35
231	**N47**	-2158.18	-1.12	209.35
232	**N48**	-2158.18	-1.12	209.35
233	**N49**	-1814.64	-0.94	248.99
234	**N50**	-1814.64	-0.94	248.99
235	**N51**	-1814.64	-0.94	248.99
236	**N52**	-1814.64	-0.94	248.99
237	**N53**	-1475.08	-0.77	306.30
238	**N54**	-1475.08	-0.77	306.30
239	**N55**	-1475.08	-0.77	306.30
240	**N56**	-1475.08	-0.77	306.30
241	**N57**	-1238.91	-1.32	178.33
242	**N58**	-1238.91	-1.32	178.33
243	**N59**	-1238.91	-1.32	178.33
244	**N60**	-1238.91	-1.32	178.33
245	**N61**	-1094.39	-1.16	201.87
246	**N62**	-1094.39	-1.16	201.87
247	**N63**	-1094.39	-1.16	201.87
248	**N64**	-1094.39	-1.16	201.87

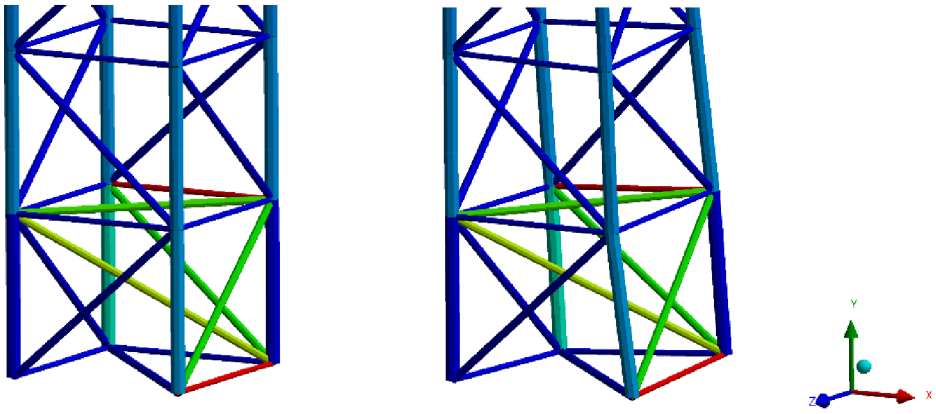
	Prut	Síly	Napětí	Bezpečnost
		[N]	[MPa]	-
249	**N65**	-949.87	-1.01	232.59
250	**N66**	-949.87	-1.01	232.59
251	**N67**	-949.87	-1.01	232.59
252	**N68**	-949.87	-1.01	232.59
253	**N69**	-805.36	-0.86	274.32
254	**N70**	-805.36	-0.86	274.32
255	**N71**	-805.36	-0.86	274.32
256	**N72**	-805.36	-0.86	274.32
257	**N73**	-660.84	-0.70	334.31
258	**N74**	-660.84	-0.70	334.31
259	**N75**	-660.84	-0.70	334.31
260	**N76**	-660.84	-0.70	334.31
261	**N77**	-516.33	-0.55	427.88
262	**N78**	-516.33	-0.55	427.88
263	**N79**	-516.33	-0.55	427.88
264	**N80**	-516.33	-0.55	427.88
265	**N81**	-371.81	-0.40	594.19
266	**N82**	-371.81	-0.40	594.19
267	**N83**	-371.81	-0.40	594.19
268	**N84**	-371.81	-0.40	594.19
269	**N85**	-227.30	-0.24	971.98
270	**N86**	-227.30	-0.24	971.98
271	**N87**	-227.30	-0.24	971.98
272	**N88**	-227.30	-0.24	971.98
273	**N89**	-82.78	-0.09	2668.81
274	**N90**	-82.78	-0.09	2668.81
275	**N91**	-82.78	-0.09	2668.81
276	**N92**	-82.78	-0.09	2668.81
277	**DP1**	7329.70	18.74	12.54
281	**DP5**	10365.77	10.18	23.08
282	**DP6**	-12189.42	-11.98	11.78

Tabulka 8:Výsledné síly a napětí varianty I

3.8.1. Zhodnocení varianty I

Největší napětí je v doplněném prutu DP1, který spojuje styčníky 2 a 3 (18,74 MPa). Nejmenší bezpečnost v této variantě je ale v doplněném prutu DP6 mezi styčníky 3 a 5. Tento prut je totiž namáhaný na tlak a jeho bezpečnost vyplývá ze vzpěrné stability. Konkrétní hodnota bezpečnosti pro tento prut pak vychází 11,78.

Výsledky napětí a bezpečnosti jsou silně ovlivněny tím, že noha γ není vůbec podepřená ve směru osy y, a tato varianta tak příliš neodpovídá reálnému stožáru. Ve všech dalších variantách výpočtu tedy bylo uvažováno podepření všech noh ve směru osy y a vnější statická neurčitost.



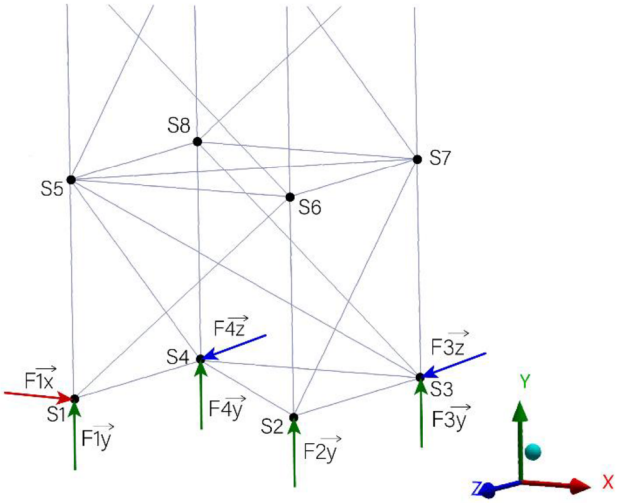
Obrázek 35: Deformace spodní část stožáru ve variantě I

Největší směrová deformace je ve styčnících 95 a 94, a to 17,21 mm ve směru osy z. Velikost celkové deformace je pak největší ve styčníku 95, a to 23,53 mm. Ačkoliv styčník 3 nemá zamezený pohyb ve směru osy y, jeho posuv ve směru této osy bude jen 0,99 mm. Jeho posuv ve směru osy x je pak 1,07 mm. Stožár se tak bude vyvracet paradoxně opačným směrem od styčníku 3 a bude se naklánět ve směru osy z. Situace je dobře patrná z obrázku 35. Vlevo je skutečná velikost deformací. Vpravo je pak pro názornost efekt deformací zvětšený stonásobně. Všechny deformace jsou uvedeny v příloze 1. Tabulka 10 pak zobrazuje velikosti vnějších stykových sil.

	Vnější stykové síly [N]
F1y	-14.73
F2y	12777.19
F4y	12791.92
F1x	0.00
F3z	0.00
F4z	0.00

Tabulka 9: Stykové síly varianty I

3.9. Varianta II



Obrázek 36: Stykové síly staticky neurčitého uložení

Aby byl vyřešen problém varianty I, kdy se věž stožáru naklání ve směru osy z, byla do styčníku 3 přidána styková síla *F3y* (viz obrázek 36). Zvýšil se tak stupeň vnější statické neurčitosti, a proto byla předepsána deformační podmínka pro nulový posuv styčníku 3 ve směru osy y ve tvaru:

$$\sum_{i=1}^{282} \frac{F(i) \cdot l(i)}{S(i) \cdot E} \cdot \frac{\partial F(i)}{\partial F_{3y}} = 0 \qquad (37)$$

To vyžaduje výpočet velkého množství parciálních derivací podle neznámé síly. Dosud používaný zápis rovnic v maticovém tvaru na to není úplně vhodný. V Matlabu tedy bylo využito doplňku Symbolic Toolbox a maticový zápis byl převeden na zápis symbolický (viz obrázek 37).

```
Asym=sym(zeros(288,288));

   for i=1:288 %vytvori matici symbolickych hodnot
       for j=1:288
           if A(j,i)~=0
             Asym(j,i)=Fsym(i)*A(j,i); %priradi prvkum matice nezname
           end
       end

   end
```

Obrázek 37: Převod na symbolické rovice

Pro výpočet parciálních derivací je potřeba vyjádřit všechny síly v prutech a vnější stykové síly na doplněné síle $F3y$. To je v Matlabu možné provést pomocí příkazu *solve*. Tento postup byl úspěšně vyzkoušen na menší soustavě rovnic. U naší soustavy, která se skládala téměř ze tří set rovnic, nedokázal ale Matlab ani během cca deseti hodin závislosti vyjádřit.

Vyjádření tedy bylo provedeno v programu Maple, který je pro řešení takto velké soustavy symbolických rovnic daleko lépe optimalizován. Byla proto vytvořena funkce *toMAPLE.m*, kde je matici Asym přiřazena odpovídající hodnota matice G (viz obrázek 38) a zápis rovnic se uloží jako soubor *AsymM.txt*. Rovnice z tohoto souboru je možné přímo zkopírovat do Maplu. Funkce je k nalezení v příloze 2.

```
%%Prevod do Mapelu
Asym=sum(Asym'); %secte vsechyn prvky v radku matice A pro reseni rovic
Asym=Asym';


Asym = arrayfun(@char, Asym, 'uniform', 0);


AsymM={};
   for i=1:288
       AsymM{i,1}=[Asym{i,1} '=' num2str(G(i),14)];
   end

AsymM{140,1}=[AsymM{140,1} '-F3Y']; %prida doplnkovou silu F3Y
```

Obrázek 38: Převod do programu Maple

V Maplu pak byla vyjádřena závislost všech neznámých na síle $F3y$ a ta byla dopočítána z deformační podmínky (viz obrázek 39). Tyto výpočty Maplu trvaly jen několik málo minut. Hodnota síly $F3y$ pak byla zanesena zpátky do Matlabu, kde byl dokončen výpočet normálových sil, deformací a bezpečnosti. Kód Maplu je příloze 3.

```
for i from 1 by 1 to 282do F(i) := rhs(VYJADRENI[1, i] ) end do:

PODMI1 := 0 :

E := 210·10^9 :

for i from 1 by 1 to 282 do PODMI1 := PODMI1 + (F(i)·DELKA(i)) / (E·PRUREZ(i)) ·diff(F(i), F3Y) end do:
>
solve( {PODMI1 = 0}, {F3Y} );
                                                    {F3Y = 6292.942903}
```

Obrázek 39: Výpočet síly F3Y v programu Maple

Tento postup byl pak použit u všech variant s alespoň jedním stupněm statické neurčitosti (varianty 2 až 5).

Z hlediska zatížení byly v této variantě uvažovány stejné podmínky jako v předchozí, tedy pouze zatížení vlastní tíhy konstrukce.

3.9.1. Zhodnocení varianty II

Hodnota síly $F3y$ byla v Maplu vypočítána jako 6292.942903 N. Přidání této stykové síly výrazně snížilo napětí v doplněných prutech DP1 a DP6 a bezpečnost konstrukce se tak při stejném zatížení zvýšila téměř osminásobně (viz Tabulka 8).

Kompletní výsledky napětí i deformací pro variantu 2 obsahuje příloha 1.

	Varianta I	**Varianta II**
Celková bezpečnost	11,49	71,99
Prut s nejnižší bezpečností	DP6	N4
Napětí v DP1	18,74 MPa	0,35 MPa
Napětí v DP6	-11,98 MPa	-0,23 MPa
Napětí v N4	-6,54 MPa	-3,26 MPa
Maximální velikost deformace	23, 5 mm (styč. 95)	0,3 mm (styč. 94)
Posunutí styčníku 3 ve směry y	1,0 mm	0,0 mm

Tabulka 10: Srovnání napětí variant I a II

	Varianta I [N]	**Varianta II [N]**
F1y	-15	6278
F2y	12777,2	6484
F3y	-	62923
F4y	12791,9	64989
F1x	0	0
F3z	0	0
F4z	0	0

Tabulka 11: Stykové síly varianty I a II

3.10. Varianta III

Tato varianta se od předchozích liší v zatížení, kdy je kromě vlastní tíhy konstrukce uvažována také tíha antén a kabeláže. V Matlabu je toto dodatečné zatížení realizováno pomocí funkce *tihaAnten.m*, která je uvedena v příloze 2.

```
%--------------Zatizeni od anten------------

    mx=25;      %hmostnost anteny v kg
    x=(mx*g)/3; %dodatecnr zatiženi jednoho stycniku

        %---ALFA
        G(287,1)=G(287,1)+2*x;     %stycnik 93
        G(281,1)=G(281,1)+2*x;     %stycnik 89
        G(248,1)=G(248,1)+2*x;     %stycnik 85

        %---BETA
        G(71,1)=G(71,1)+x;       %stycnik 94
        G(65,1)=G(65,1)+x;       %stycnik 90
        G(32,1)=G(32,1)+x;       %stycnik 86

        %---GAMMA
        G(143,1)=G(143,1)+x;      %stycnik 95
        G(137,1)=G(137,1)+x;      %stycnik 91
        G(104,1)=G(104,1)+x;      %stycnik 87

        %---DELTA
        G(215,1)=G(215,1)+x;      %stycnik 96
        G(209,1)=G(206,1)+x;      %stycnik 92
        G(176,1)=G(176,1)+x;      %stycnik 88
```

Obrázek 40: Přidání tíhy antén

V této funkci je napřed rozpočítána tíha všech pěti antén mezi jednotlivé styčníky (viz obrázek 40), a pak je příslušným styčníkům přiřazeno dodatečné zatížení od kabeláže. Nejvíce zatěžovaná pak bude noha β, na které jsou umístěny dvě antény a zároveň je zatěžována kabely ze dvou stran. Obrázek 41 ukazuje výpočet zatížení od kabeláže na noze α.

```
%---Alfa
   for j=2:11 %kabely zacinaji na stycniku 9
      G((j-1)*3+218,1)=G((j-1)*3+218,1)+(18/4)*g*mk*(dN(2*j)+dN(2*j-1));
   end

   for j=2:11
      G((j-1)*3+251,1)=G((j-1)*3+251,1)+(18/4)*g*mk*(dN(2*j)+dN(2*j+1));
   end

   %stycnik 9
      G(251,1)=G(251,1)+(18/2)*g*mk*(0.5*dN(3)+D);
```

Obrázek 41: Přidání tíhy antén větru

I v této variantě byla síla $F3y$ dopočítána v Maplu a její hodnota vyšla jako 6907.624817 N.

3.10.1. Zhodnocení varianty III

Největší velikost napětí byla v prutu N2, a to -4,0 MPa. To byl také prut s nejnižší bezpečností, a to 58,45. Největší směrová deformace byla ve styčnících 93 a 96, a to 0,60 mm proti směru osy *z*. Ze získaných výsledků lze vidět, že tíha antén a kabeláže nemá na hodnoty napětí a bezpečnosti nijak velký vliv. Je to dáno také tím, že stožár byl dimenzován na výrazně větší a těžší anténu analogového TV převaděče.

	Nejvíce napínané pruty
N2	-4,0 MPa
N1	-3,9 MPa
N6	-3,8 Mpa

Tabulka 12: Pruty s největším napětím varianty III

	Vnější stykové síly [N]
F1y	7655
F2y	8091
F3y	6908
F4y	6932
F1x	0
F3z	0
F4z	0

Tabulka 13: Vnější stykové síly varianty III

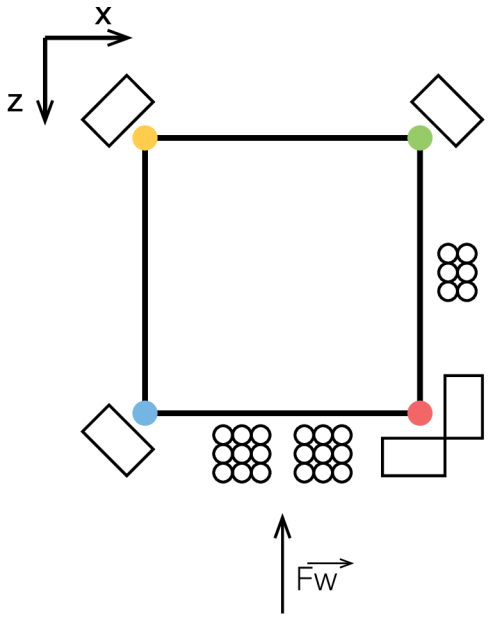
3.11. Varianta IV

Ve variantě 4 bylo kromě zatížení z varianty 3 počítáno také se zatěžující silou větru.

Protože relativně velkou plochu mezi nohami stožáru α a β vyplňují kabely, velikost zatížení bude záležet také na směru větru. Nejhorší pak bude situace, kdy vítr stožár naklání proti směru osy z (viz obrázek 42). Jako referenční plocha kabelů A_{refK} byla v tomto směru uvažována referenční plocha šesti kabelů. Výrobce pro jeden kabel udává vnější průměr 27,8 mm [19].

Výpočet zatížení větrem byl proveden v Matalbu pomocí funkce *Fvitr.m*, která je umístěna v příloze 2. Při výpočtech byl zanedbán vliv větru na antény a také vliv větru na šest kabelů mezi nohami stožáru β a γ.

Síla $F3y$ v Maplu byla vypočítána jako -133812.1846 N.



Obrázek 42: Směr větru

3.11.1. Zhodnocení varianty IV

Přidání zatížení větrem relativně výrazně zvýší napětí v dolních prutech stožáru. Velikost napětí je největší v prvním nárožníku N1 a to -77.8 MPa. To je také prut s nejnižší bezpečností, a to 3,02.

Deformace se pak nejvíce projevila na styčníku 93, který byl posunutý ve směru větru o 109 mm. Kompletní výsledky jsou opět uvedeny v příloze 1.

	Vnější stykové síly [N]
F1y	149733
F2y	148811
F3y	-133812
F4y	-135146
F1x	0
F3z	-13655
F4z	-13655

Tabulka 14: Vnější stykové síly varianty IV

Přidání zatížení větrem snížilo vypočtenou bezpečnost stožáru o celý řád. Proto byla ve variantě V uvažována modifikace, kdy byl do stožáru doplněn ještě jeden prut mezi styčníky 2 a 5 s cílem snížit napětí v prutu N1 a zvýšit bezpečnost konstrukce.

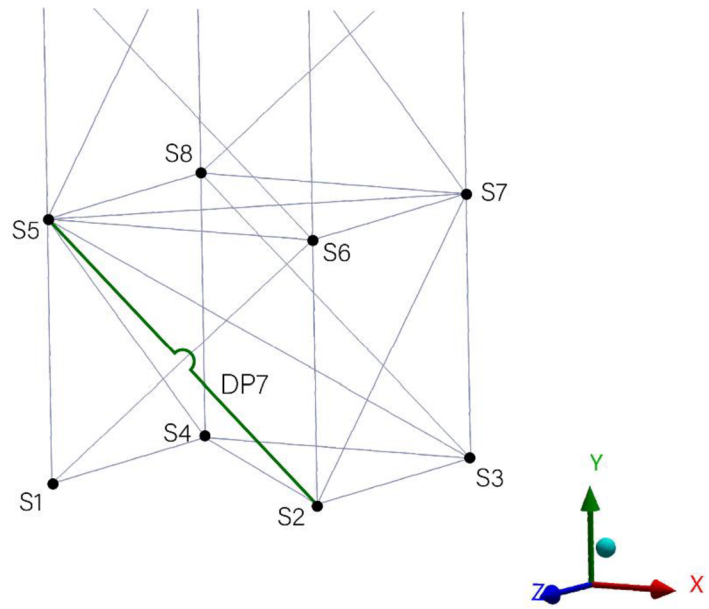
3.12. Varianta V

Pro snížení napětí v prutu N1 byl v této variantě výpočtu přidán prut DP7 mezi styčníky 2 a 5 (viz Obrázek 43). To zvyšuje stupeň vnitřní statické neurčitosti. Proto byla v programu Maple přidána druhá deformační podmínka ve tvaru:

$$\sum_{i=1}^{283} \frac{F(i) \cdot l(i)}{S(i) \cdot E} \cdot \frac{\partial F(i)}{\partial DP7} = 0 \qquad (38)$$

kde $DP7$ je normálová síla v sedmém doplněném prutu.

Mění se tím také rovnice statické rovnováhy pro styčníky 2 a 5 ve směrech os x a y. Aby zůstala zachována struktura matice A z ostatních variant, byl vliv síly $DP7$ doplněn až při převodu do Maplu. Tam byla v této variantě kromě síly $F3y$ vypočítána také síla $DP7$ a obě síly pak byly doplněny do vektoru zatěžujících sil G.



Obrázek 43: Doplněný prut DP7

Doplněnému prutu byl přiřazen profil TR 60/3, který mají i ostatní diagonály ve spodní části stožáru.

Síla $DP7$ byla v Maplu dopočítána jako

$$DP7 = -10718.5 \text{ N} \qquad (39)$$

a síla $F3y$ jako

$$F3Y = -1\,43488{,}5 \text{ N} \qquad (40)$$

3.12.1. Zhodnocení varianty V

Doplnění prutu DP7 opravdu pomohlo k odlehčení v prvním nárožníku a maximální velikost napětí se snížila o 6,4 % z -77,8 MPa na -72,8 MPa. Bezpečnost konstrukce se zvýšila z 3,02 na 3,23. Srovnání variant pak ukazuje tabulka 15.

	Varianta IV	**Varianta V**
Napětí v N1	-77,8 MPa	-72,8 MPa
Napětí v N2	-71,5 MPa	-71,5 MPa
Napětí v N3	69.7 MPa	71.1 MPa
Maximální velikost deformace	109.1 mm	109.0 mm
Celková bezpečnost	3,02	3,23
Prut s nejnižší bezpečností	N1	N1

Tabulka 15: Srovnání variant IV a V

Protože síla DP7 není součástí matice A, bylo ještě potřeba dopočítat napětí v doplněném prutu jako

$$\sigma_{DP7} = \frac{DP7}{psD} \tag{41}$$

kde psD je obsah průřezu doplněného prutu DP7. Tedy

$$\sigma_{DP7} = \frac{-10718{,}5}{0{,}0010} = -1{,}1\ MPa \tag{42}$$

4. Numerické řešení

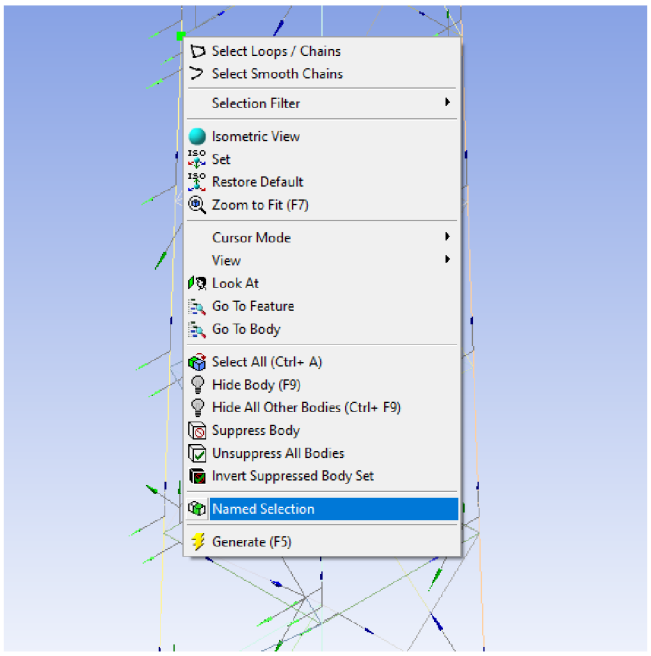
Numerické řešení bylo provedeno v programu ANSYS Workbench, který dovoluje řešení prutových soustav pomocí prvku *Link*.

Model používaný v numerickém řešení je pak totožný s modelem používaným při analytickém řešení. Rozmístění prutů i jejich rozměry jsou tedy stejné.

4.1. Postup řešení soustavy v programu ANSYS Workbench

Z nabízených nástrojů programu Workbench byla zvolena analýza Static Structural a v modulu *Engineering Data* byly zadány správné hodnoty materiálových konstant.

V modulu *Geometry* byl vytvořen model soustavy a příčné průřezy používaných prutů v záložce *Concept – Cross Section*. Každý styčník soustavy byl označen pomocí *Named Selection*. To později umožnilo odkazovat na něj v modulu *Model*. Pruty byly nakonec přiřazeny k sobě pomocí příkazu *Form New Part*.

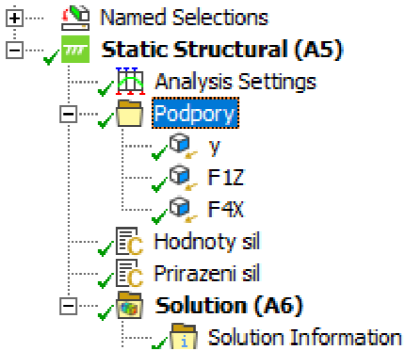


Obrázek 44: Vložení Named Selection

V modulu *Model* byl nejprve v záložce *Geometry* každému prutu přiřazen správný materiál a příčný průřez. U všech prutů byl také změněn *Model Type* z výchozího *Beam* na prvek *Link/Truss*.

V záložce *Mesh* byly nastaveny požadované vlastnosti sítě. Aby numerické řešení odpovídalo analytickému, je třeba, aby každý prut tvořil samostatný prvek sítě.

V záložce *Static Structural* bylo příslušným styčníkům přidáno zamezení pohybu *Displacement* (viz Obrázek 45). Tady byly také přidány síly vnějšího zatížení.



Obrázek 45:Přidání zatěžujících sil příkazy Commands

Zatěžující síly lze přiřadit každému styčníku ručně. Protože by ale bylo potřeba přidávat každému z 96 styčníků složky zatěžujících sil ve třech směrech, byl by tento proces velmi zdlouhavý. Navíc by bylo téměř nemožné najít v takovémto systému případné chyby.

Síly tak byly do numerického řešení ANSYSu importovány přímo z Matlabu a správným styčníkům přiřazeny pomocí příkazů *Commands*.

Zatěžující síla se v objektu *Commands* přidá zadáním příkazu *F*, který má následující strukturu:

F, Node, Lab, VALUE

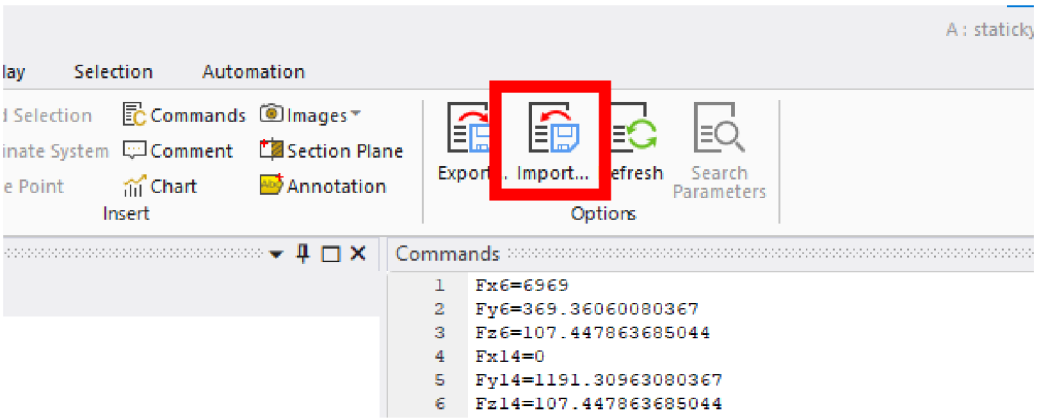
kde *Node* je označení styčníku, kam má být síla přidána (*ID* nebo *Named selection*), *Lab* udává směr síly (FX, FY nebo FZ) a *VALUE* je velikost síly v jednotkách nastavených v systému Workbench.

V našem modelu byly využity dva objekty *Commands*. V prvním se nastavila hodnota všech zatěžujících sil jako neznámé veličiny. Ve druhém byly každému styčníku přidány tři zatěžující síly ve směru os souřadnicové soustavy (viz obrázek 46).

```
8
9   Fx6=0
10  Fy6=369.36060080367
11  Fz6=107.447863685044
12  Fx14=0
13  Fy14=1191.30963080367
14  Fz14=107.447863685044
15  Fx22=0
16  Fy22=1191.30963080367
17  Fz22=107.447863685044
18  Fx30=0
19  Fy30=1187.34400484708
```

Obrázek 46: Hodnoty zatěžujících sil

První objekt *Commands* je společný všem modelům a je tedy nutné měnit pouze konkrétní hodnoty sil ve druhém bloku. Ty se naštěstí dají do ANSYSu jednoduše importovat jako dokument ve formátu *txt*.



Obrázek 47: Import sil do programu Ansys

Do analytického řešení v Matlabu byla proto přidána funkce *toANSYS.m*, která sloupcový vektor úplně zadaných sil G převede do formátu, který dokáže ANSYS zpracovat (viz obrázek 48).

```
%% Export zatizeni pro Ansys

    T=readtable('sily.csv');

    hodnotysil={};

    T=table2array(T);

    for i=1:288
        hodnotysil{i,1}=[T{i,1} '=' num2str(G(i),14)];
    end

    writecell(hodnotysil);
```

Obrázek 48: Export sil do programu Ansys

Funkce vezme názvy sil ze souboru *sily.csv* a spojí je s odpovídajícím řádkem vektoru G. Výsledek pak uloží do souboru *hodnotysil.txt*, který je možné přímo importovat do programu Workbench.

Tento postup umožnil sledovat jakékoliv změny v analytickém řešení rovnou také v programu Workbench, což hlavně v počátečních fázích práce velmi ulehčilo ověřování správnosti analytického modelu.

V záložce *Solution* pak bylo změněno nastavení výsledků na *Beam Selection Result*, což umožní sledovat napětí pro soustavu prvků *Link*, a byla přidána požadovaná řešení, tedy: *Equivalent Stress*, směrové deformace *Directional Deformation* pro směry os x,y a z, celková deformace *Total Deformation* a velikosti stykových sil.

Numerické řešení soustavy bylo provedeno pro všech pět variant, pro které bylo prováděno řešení analytické. Protože výsledky vycházely u obou metod velmi podobně, byly zpracovány výsledky pro variantu V. V další kapitole je pro ni uvedeno srovnání numerického a analytického řešení. Data programu Workbench pro všech pět výpočtových variant tvoří přílohu 4.

4.2. Porovnání numerického a analytického řešení

Pro verifikaci numerickým řešením byla zvolena varianta V. jakožto nejkomplexnější. Numerické a analytické řešení bylo porovnáváno z hlediska normálového napětí v jednotlivých prutech. Byla vypočítána absolutní odchylka mezi numerickým a analytickým řešením a u prutů, kde velikost normálového napětí přesáhla 15 MPa, byla vypočítána i odchylka relativní.

	Prut	Napětí - Analyticky [MPa]	Napětí - Numericky [MPa]	Odchylka [MPa]	Odchylka [%]
94	**D2**	-20.42	-20.46	-0.04	-0.19%
97	**D5**	-16.55	-16.55	0.00	0.00%
99	**D7**	16.55	16.55	0.00	0.00%
102	**D10**	-16.01	-16.01	0.00	0.00%
104	**D12**	16.01	16.01	0.00	0.00%
105	**D13**	-15.46	-15.46	0.00	0.00%
107	**D15**	15.46	15.46	0.00	0.01%
150	**D58**	-19.88	-19.88	0.00	0.00%
152	**D60**	19.88	19.88	0.00	0.00%
153	**D61**	-17.81	-17.81	0.00	0.00%
155	**D63**	17.81	17.81	0.00	0.00%
158	**D66**	-15.61	-15.61	0.00	0.00%
160	**D68**	15.61	15.61	0.00	0.00%
185	**N1**	-72.81	-72.75	0.06	0.08%
186	**N2**	-71.53	-71.52	0.01	0.01%
187	**N3**	71.08	71.08	0.00	0.00%
188	**N4**	62.99	62.96	-0.02	-0.04%
189	**N5**	-65.49	-65.48	0.01	0.02%
190	**N6**	-71.34	-71.33	0.01	0.01%
191	**N7**	58.40	58.39	-0.01	-0.02%
192	**N8**	64.29	64.28	-0.01	-0.02%
193	**N9**	-65.26	-65.25	0.01	0.02%
194	**N10**	-59.75	-59.74	0.01	0.02%
195	**N11**	58.60	58.59	-0.01	-0.02%
196	**N12**	53.14	53.13	-0.01	-0.02%
197	**N13**	-54.07	-54.06	0.01	0.02%
198	**N14**	-59.53	-59.52	0.01	0.02%
199	**N15**	47.83	47.82	-0.01	-0.02%
200	**N16**	53.33	53.32	-0.01	-0.02%
201	**N17**	-53.85	-53.84	0.01	0.02%
202	**N18**	-48.71	-48.70	0.01	0.02%
203	**N19**	48.03	48.02	-0.01	-0.02%
204	**N20**	42.93	42.92	-0.01	-0.03%
205	**N21**	-43.45	-43.44	0.01	0.03%
206	**N22**	-48.48	-48.47	0.01	0.02%
207	**N23**	38.05	38.04	-0.01	-0.03%
208	**N24**	43.13	43.12	-0.01	-0.03%

	Prut	Napětí - Analyticky [MPa]	Napětí - Numericky [MPa]	Odchylka [MPa]	Odchylka [%]
209	**N25**	-43.23	-43.24	-0.01	-0.01%
210	**N26**	-39.85	-39.86	-0.02	-0.04%
211	**N27**	38.25	38.25	0.00	0.01%
212	**N28**	34.92	34.93	0.01	0.04%
213	**N29**	-36.21	-36.22	-0.01	-0.02%
214	**N30**	-39.62	-39.64	-0.01	-0.04%
215	**N31**	31.63	31.64	0.01	0.02%
216	**N32**	35.11	35.12	0.01	0.04%
217	**N33**	-35.99	-36.00	-0.01	-0.03%
218	**N34**	-32.64	-32.64	0.00	-0.01%
219	**N35**	31.82	31.83	0.01	0.02%
220	**N36**	28.54	28.54	0.00	0.00%
221	**N37**	-29.10	-29.11	-0.01	-0.03%
222	**N38**	-32.42	-32.42	0.00	-0.01%
223	**N39**	25.33	25.34	0.01	0.02%
224	**N40**	28.73	28.73	0.00	0.00%
225	**N41**	-28.89	-28.90	-0.01	-0.02%
226	**N42**	-25.64	-25.65	-0.01	-0.04%
227	**N43**	25.52	25.53	0.01	0.02%
228	**N44**	22.36	22.37	0.01	0.04%
229	**N45**	-22.31	-22.31	-0.01	-0.04%
230	**N46**	-25.42	-25.43	-0.01	-0.04%
231	**N47**	19.33	19.34	0.01	0.03%
232	**N48**	22.54	22.55	0.01	0.04%
233	**N49**	-22.10	-22.11	-0.01	-0.04%
234	**N50**	-19.05	-19.06	-0.01	-0.04%
235	**N51**	19.51	19.52	0.01	0.03%
236	**N52**	16.57	16.58	0.01	0.04%
237	**N53**	-16.02	-16.03	-0.01	-0.05%
238	**N54**	-18.83	-18.84	-0.01	-0.04%
240	**N56**	16.75	16.76	0.01	0.04%
241	**N57**	-32.47	-32.47	0.00	-0.01%
242	**N58**	-26.24	-26.24	0.00	-0.01%
243	**N59**	28.53	28.53	0.00	0.00%
244	**N60**	22.56	22.56	0.00	0.01%
245	**N61**	-20.71	-20.71	0.00	0.00%
246	**N62**	-26.02	-26.02	0.00	0.00%
247	**N63**	17.14	17.14	0.00	0.01%
248	**N64**	22.71	22.72	0.00	0.01%
249	**N65**	-20.51	-20.51	0.00	0.00%
250	**N66**	-15.56	-15.56	0.00	0.00%
251	**N67**	17.31	17.31	0.00	0.01%
254	**N70**	-15.34	-15.34	0.00	-0.01%
277	**DP1**	20.12	19.99	-0.13	-0.64%
278	**DP2**	-20.62	-20.83	-0.20	-0.99%

Tabulka 16: Srovnání hodnot numerického a analytického řešení

Odchylka byla největší u doplněného prutu DP2, kde normálové napětí počítané numericky mělo o 0,20 MPa menší hodnotu než napětí počítané analyticky. Hodnota vypočítaná programem Workbench se tak lišila o 0,99 %. Druhá největší odchylka pak byla u doplněného prutu DP1, kde se výpočty rozcházely o 0,13 MPa.

Další porovnávané veličiny zobrazuje tabulka 18.

	Analyticky	**Numericky**
Maximální celková deformace	109,0 mm	109,0 mm
Maximální napětí	-72.8 MPa	-72.8 MPa
Styková síla F1y	140 171 N	140 050 N
Styková síla F2y	158 515 N	158 580 N
Styková síla F3y	-143 489 N	- 143 560 N
Styková síla F4y	-125 556 N	- 125 430 N
Styková síla F1x	0 N	0 N
Styková síla F3z	-13753 N	-13 753 N
Styková síla F4z	-13753 N	-13 753 N

Tabulka 17: Vnější stykové síly numerického a analytického řešení

5. Závěr

Hlavní cíle této bakalářské práce byly následující:

- Rešerše a získání vstupních údajů o stožáru v Lelekovicích.
- V případě nutnosti úprava topologie stožáru tak, aby byly splněny předpoklady kladené na prutovou soustavu.
- Vytvoření 3D výpočtového modelu prutové soustavy stožáru a provedení napjatostně deformační analýzy při různém statickém zatěžování.
- Posouzení změny napjatosti a deformace konstrukce stožáru při změně míry statické neurčitosti uložení.
- Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením.

Údaje o stožáru potřebné pro výpočty poskytl Michal Tolkner ze společnosti České radiokomunikace, která stožár vlastní a spravuje. Stožár sloužil jako věž TV převaděče analogové televize od roku 1994 do roku 2010. V současnosti jsou na něm umístěny převážně antény GMS pro převod mobilního signálu.

Stožár byl modelován jako prutová soustava, která se skládá ze 276 prutů a 96 styčníků. Aby byly splněny podmínky vnitřní statické určitosti, bylo do spodní části stožáru přidáno šest prutů.

Rovnice statické rovnováhy byly sestaveny algoritmicky v programu Matlab. Bylo řešeno pět různých variant, které se liší zatížením nebo stupněm statické určitosti. Ve všech bylo vypočítáno napětí v jednotlivých prutech, bezpečnost a deformace všech styčníků ve směrech os x ,y a z. Při zpracování výsledků pak byla dopočítána také celková velikost posunutí každého styčníku.

V první variantě bylo počítáno s vnitřní i vnější statickou určitostí a zatížením pouze vlastní tíhou konstrukce stožáru.

Varianta II se od první liší přidáním jednoho stupně vnější statické neurčitosti. Byla tedy předepsána deformační podmínka pro nulový posuv styčníku 3 ve směru osy y. Protože původně zamýšlený postup řešení přes symbolické rovnice nebylo z kapacitních důvodů v Matlabu možné provést, byla soustava rovnic statické rovnováhy převedena do programu Maple. Tam proběhl výpočet chybějící síly z deformační podmínky. Stejný postup byl pak použit i u ostatních variant výpočtu se statickou neurčitostí.

Ve třetí variantě bylo přidáno také zatížení od antén a kabeláže a ve čtvrté i zatížení větrem. Při výpočtech zatížení od větru bylo vycházeno z normy ČSN EN 1991-1-4.

V poslední uvažované variantě byl mezi styčníky 2 a 5 přidán prut. Tato modifikace dle očekávání vedla k redukci napětí v nejvíce namáhaném prutu N1 a zvýšila celkovou bezpečnost konstrukce.

	Maximální napětí	Maximální deformace	Bezpečnost	Síla F3y
Varianta I	18,7 MPa (DP1)	23.5 mm	11,78	-
Varianta II	-3.3 MPa (N4)	0.2 mm	71,99	6 293 N
Varianta III	-4.0 MPa (N2)	0.7 mm	58,45	6 908 N
Varianta IV	-77.8 MPa (N1)	109.1 mm	3,02	-133 812 N
Varianta V	-72.8 MPa (N1)	109.0 mm	3,23	- 143 489 N

Tabulka 18: Srovnání výpočtových variant

Pro verifikaci pomocí numerického řešení byl zvolena nejkomplexnější varianta V. Výpočty pak proběhly v programu ANSYS Workbench, kam byly pomocí příkazů *Commands* importovány zatěžující síly z Matlabu. Odchylky mezi analytickým a numerickým řešením pro napětí u žádného z více zatěžovaných prutů nepřesáhly jedno procento. Výsledky získané analytickým řešením tak lze považovat za verifikované.

Literatura a zdroje

[1] FLORIAN, Z., PŘIKRYL, K.a ONDRÁČEK, E. Mechanika těles - statika. Vyd. 3. Brno: PC-DIR, 1995, ISBN 80-214-0694-1

[2] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. a BURŠA, J. Mechanika těles: Pružnost a pevnost I, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004, ISBN 80-214-2592-x.

[3] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I: Učební texty* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2012 [cit. 2021-05-21].

[4] ČESKÉ RADIOKOMUNIKACE. *Lelekovice: Mapa pokrytí* [online]. In: . [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.cra.cz/cra-telehousing

[5] JANÁSEK, Petr. *Analogový vysílač ČT2 Brno-město a převaděč Lelekovice končí 31. ledna* [online]. In: . Digitalnitelevize.cz, 8. ledna 2010 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.digitalnitelevize.cz/zpravy/obecne/2010-1-8-analogovy-vysilac-ct2-brno-mesto-a-prevadec-lelekovice-konci-31-ledna.html

[6] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Mapa větrných oblastí* [online]. 09.01.2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.dlubal.com/cs/oblasti-zatizeni-snehem-vetrem-a-zemetresenim/vitr-csn-en-1991-1-4.html?#¢er=49.2899723491213,16.582755478582772&zoom=15&marker=49.2892703785713,16.5784339367401

[7] SKŘIVÁNEK, Pavel. *11367 BO Lelekovice, TV převaděč (+TMO,+O2)* [online]. GSMWEB.cz, 2019 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.gsmweb.cz/foto.php?op=oskar&cid=11367&okres=BO

[8] OCELÁŘ.CZ. *MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY: Jmenovité hodnoty meze kluzu fy a meze pevnosti fu konstrukčních ocelí* [online]. Ocelář.cz, 09.01.2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: http://www.steelcalc.com/cs/materchar.aspx

[9] LEGÍŇ, Martin. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-204-3.

[10] GREGORA, Pavel a Vladimír VÍT. *Televizní technika: zařízení pro přenos a vysílání televizního signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-89-9.

[11] DUSPIVA, Zdeněk. Digitalizace jako budoucnost elektronických médií. Praha: Votobia, 2004. ISBN 80-7220-169-7

[12] Toman, Jiří a Ivo PROCHÁZKA. *Technické základy*. Česká televize [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: http://www.ceskatelevize.cz/vse-o-ct/technika/digitalni-vysilani-dvb-obecne/technickezaklady/

[13] BROWN, Pat. Lessons from the RF Analyzer: Dale uses his HP RF analyzer to demonstrate some wireless mic issues that audio people must deal with everyday. [online]. SynAudCon, 2010 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.prosoundtraining.com/2010/03/17/lessons-from-the-rf-analyzer/

[14] NOVÁK, T. *Napjatostně deformační analýza rozhledny Hraniční vrch.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.

[15] WINTER, Josef. *Napjatostně deformační analýza Kozlovské rozhledny.* Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Vladimír Fuis.

[16] KATHREIN-WERKE KG . 739 685 - Panel Dual Polarization Half-power Beam Width Adjust. Electr. Downtilt: set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit) [online]. In: . Anton-Kathrein-Straße 1 – 3 . P.O. Box 10 04 44 . 83004 Rosenheim . Germany [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://download.datasheets.com/pdfs/2008/09/17/c/manual/kthrn/ds/9362431b.pdf

[17] KATHREIN-WERKE KG . 80010668 - *Panel Dual Polarization Half-power Beam Width Adjust. Electr. Downtilt: set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)* [online]. In: . Anton-Kathrein-Straße 1 – 3 . P.O. Box 10 04 44 . 83004 Rosenheim . Germany, 2008 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://download.datasheets.com/pdfs/2012/10/11/9/20/56/488/kthrn_/manual/80010668.pdf

[18] ČSN EN 1991-1-4. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Duben 2007. © Český normalizační institut.

[19] CELLFLEX. *7/8" CELLFLEX® Low-Loss Foam-Dielectric Coaxial Cable: LCF78-50JA* [online]. In: . 2009 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.avw.com.au/images/RFS/Datasheet_LCF78-50JA.pdf

[20] DRESLER, Radek. RRTV kontra ČTÚ: na čí straně stojí zákon? *RadioTV* [online]. 6. 8. 2004 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.radiotv.cz/p_tv/t_technika/rrtv-kontra-ctu-na-ci-strane-stoji-zakon/

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
γ	Střednice prutu	
ψ	Příčný průřez prutu	
NNTN	Neprostupnost, neproměnnost, tlakovost, neutrálnost	
μ_A	Neznámé parametry	
ν	Použitelné statické podmínky	
s	Stupeň vnitřní statické určitosti	
p	Počet prutů soustavy	
k	Počet styčníků soustavy	
A	Matice soustavy	
x	Vektor neznámých parametrů	
b	Vektor plně zadaných silových prvků	
E	Yangův modul pružnosti	MPa
W	Celková energie napjatosti	
u	Posunutí	m
φ	Natočení	rad
M	Moment ve vyšetřovaném místě	Nm
VVÚ	Výsledné vnitřní účinky	
N	Normálová síla v prutu	N
Ω_0	Uvolněný prvek prutu	
Σ	Napětí	MPa
Re	Mez kluzu	MPa
k_v	Bezpečnost k MSVS	
k_k	Bezpečnost k MSP	
λ	Štíhlost prutu	
λ_k	Kritická štíhlost	
F_v	Kritická síla	N
α	Součinitel uložení	
i_y	Poloměr setrvačnosti průměru	
GSM	Groupe spécial mobile	
CRA	České radiokomunikace	
DVB-T	Digital video broadcasting terrestrial	
TS	Transport stream	
J	Kvadratický moment	m^4
D	Vnější průměr profilu	m
d	Vnitřní průměr profilu	m
F_w	Síla větru působící na nosný prvek	N
A_{ref}	Referenční plocha nosného prvku	m^2
$q_p(z)$	Maximální dynamický tlak v referenční výšce	
$I_v(z)$	součinitel intenzity turbulence v referenční výšce	
v_b	Základní rychlost větru	m/s
q_b	Základní tlak větru	
v_m	Střední rychlost větru	m/s

c_r	Součinitel drsnosti terénu	
c_o	Součinitel ortografie	
k_r	Součinitel terénu	
z_0	Parametr drsnosti terénu	
z_{min}	Minimální výška	m
I_V	Intenzita turbulence	
k_1	Součinitel turbulence	
F_{w22}	Síla od větru působící na styčník	
F_{w22K}	Dodatečná síla od větru od kabeláže na 22	N
$S(i)$	Příčný průřez prutu i	m^2
$l(i)$	Délka prutu i	m
N1 – N92	Nárožníky v modelu stožáru	
D1 – D92	Diagonály v modelu stožáru	
S5 – S96	Svislice v modelu stožáru	
DP1 – D77	Doplněné pruty v modelu stožáru	
dNx	Délka nárožníku x	m
dSx	Délka svislice x	m
dDx	Délka diagonály x	m
F_{g8}	Tíhová síla působící na styčník 8	N
ρ	Hustota oceli	kg/m^3
g	Gravitační zrychlení	m/s
m_k	Měrná hmotnost jednoho kabelu	kg/m

Seznam obrázků

Obrázek 1: Věž převaděče v Lelekovicích [7]
Obrázek 2: Jednoduchá prutová soustava (vlastní zpracování dle [1])
Obrázek 3: Prut zatěžovaný tahem [2]
Obrázek 4: Prut zatěžovaný tahem [2]
Obrázek 5: Elastická a plastická deformace [2]
Obrázek 6: součinitel uložení [3]
Obrázek 7:Vnější a vnitřní průměr trubky
Obrázek 8: Mapa pokrytí signálu převaděče [4]
Obrázek 9: Nová podoba stožáru
Obrázek 10: Podoba signálu analogového vysílání televize [13]
Obrázek 11: Princip televize DVB-T [12]
Obrázek 12: Podoba signálu digitálního vysílání televize [13]
Obrázek 13: Televizní pásma 22-37 BBC před zavedením digitálního vysílání [12]
Obrázek 14: Televizní pásma 22-37 BBC po zavedení digitálního vysílání [12]
Obrázek 15: Schéma fungování digitálního TV převaděče [9]
Obrázek 16: Popis prutů a styčníků v A4
Obrázek 17: Vzdálenost úseků v A3
Obrázek 18: Stykové síly
Obrázek 19: Hledání závislých řádků matice A
Obrázek 20: Rozmístění doplněných prutů
Obrázek 21: Označení prutů a styčníků jednoho úseku věže
Obrázek 22: Algoritmus pro sestavení rovnic rovnováhy vybraných styčníků
Obrázek 23: Algoritmus pro sestavení matice C
Obrázek 24: Síly v prutech styčníku 5
Obrázek 25: Síly v prutech styčníku 6
Obrázek 26: Síly v prutech styčníku 7
Obrázek 27: Síly v prutech styčníku 8
Obrázek 28: Detail styčníku 8
Obrázek 29: Antény na věži převaděče
Obrázek 30: Detail označení kabelů
Obrázek 31: Rozmístění antén a kabeláže
Obrázek 32: Detail styčníku 22 se zatížením větrem
Obrázek 33: Algoritmus výpočtu bezpečnosti v Matlabu
Obrázek 34: Výpočet deformace v Matlabu
Obrázek 35: Deformace spodní část stožáru ve variantě I
Obrázek 36: Stykové síly staticky neurčitého uložení
Obrázek 37: Převod na symbolické rovice
Obrázek 38: Převod do programu Maple
Obrázek 39: Výpočet síly F3Y v programu Maple
Obrázek 40: Přidání tíhy antén
Obrázek 41: Přidání tíhy antén větru
Obrázek 42: Směr větru
Obrázek 43: Doplněný prut DP7
Obrázek 44: Vložení Named Selection
Obrázek 45:Přidání zatěžujících sil příkazy Commands
Obrázek 46: Hodnoty zatěžujících sil

Obrázek 47: Import sil do programu Ansys
Obrázek 48: Export sil do programu Ansys

Seznam tabulek

Tabulka 1: Použité profily na stožáru
Tabulka 2: Délka prutů
Tabulka 3: Profily doplněných prutů
Tabulka 4: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 5
Tabulka 5: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 6
Tabulka 6: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 7
Tabulka 7: Nenulové řádky a sloupce matice A styčníku 8
Tabulka 8:Výsledné síly a napětí varianty I
Tabulka 9: Stykové síly varianty I
Tabulka 10: Srovnání napětí variant I a II
Tabulka 11: Stykové síly varianty I a II
Tabulka 12: Pruty s největším napětím varianty III
Tabulka 13: Vnější stykové síly varianty III
Tabulka 15: Vnější stykové síly varianty IV
Tabulka 15: Srovnání variant IV a V
Tabulka 16: Srovnání hodnot numerického a analytického řešení
Tabulka 17: Vnější stykové síly numerického a analytického řešení
Tabulka 18: Srovnání výpočtových variant

Seznam příloh

Příloha 1. Výsledky
Příloha 2. Kód Matlabu
Příloha 3. Kód Mapelu
Příloha 4. Modely v ANSYSu
Příloha 5. Dokumentace stožáru