



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
ROZHLEDNY HRANIČNÍ VRCH**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Novák

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Tomáš Novák
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Vladimír Fuis, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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 rozhledny Hraniční vrch

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prutové soustavy se běžně používají k modelování chování mostů, jeřábů, stožárů a ostatních technických objektů, které jsou vyrobeny z prutových těles a splňují předpoklady kladené na prutové soustavy. Na Hraničním vrchu u Albrechtic se nachází rozhledna, která bude v rámci bakalářské práce modelována prutovou soustavou a posoudí se z hlediska napjatosti a deformace.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše a získání vstupních údajů o rozhledně na Hraničním vrchu.
2. Úprava topologie rozhledny tak, aby splňovala podmínky kladené na prutovou soustavu.
3. Vytvoření zjednodušeného 3D výpočtového modelu prutové soustavy rozhledny a provedení napjatostně deformační analýzy při různém statické zatěžování.
4. Posouzení změny napjatosti a deformace konstrukce rozhledny při změně míry statické neurčitosti uložení.
5. Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením.

Seznam doporučené literatury:

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

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.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na posouzení napjatostně deformační analýzy prutové soustavy, která vychází z rozhledny Hraniční vrch u Města Albrechtic. Hlavním cílem této práce je vytvoření zjednodušeného 3D výpočtového modelu prutové soustavy a jeho následná analýza při různě staticky neurčitém uložení. První část práce obsahuje úvod do historie rozhleden, teoretický úvod do problematiky prutů, prutových soustav a mezních stavů. Dále následuje analytický výpočet tří stavů, které se liší statickou neurčitostí. V poslední části se nachází ověření vybraného analytického výpočtu numerickým řešením. Dalším cílem je vytvořit práci, která by sloužila jako návod pro budoucí řešitele složitějších 3D prutových soustav.

Klíčová slova

Tah, tlak, prut, mezní stav, prutová konstrukce

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on stress and deformation analysis of strut frame, which is based on lookout tower Hraniční vrch by the city Město Albrechtice. The main goal is to create simplified 3D model and his resulting analysis at various degree of static indeterminateness. The first part contains introduction to history of lookout tower, theoretical introduction to bar, strut frame and limit state, followed by calculation of three various static indeterminate level. In the last part is verification of analytic results by numeric method. Another goal is to create thesis, which will also give a guidance for future solver of more complex 3D strut frame.

Key words

Tension, compresion, bar, limit state, strut frame

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

PROHLÁŠENÍ

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

20. května 2018

Tomáš Novák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Vladimíru Fuisovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Krajčkoví a celé inženýrské kanceláři FEVIA s. r. o. za předané odborné informace.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Teoretický úvod.....	13
1.1 Rozhledny	13
1.1.1 Historie.....	13
1.1.2 Typy rozhleden	14
1.2 Rozhledna Hraniční vrch u Města Albrechtic	15
1.2.1 Původní konstrukce.....	16
1.2.2 Nové konstrukce	16
1.3 Teorie prutových soustav	18
1.3.1 Předpoklady prutových soustav	18
1.3.2 Statická určitost.....	18
1.3.3 Metody řešení prutových soustav	19
1.4 Teorie prutu	20
1.4.1 Prutové předpoklady	20
1.4.2 Výsledné vnitřní účinky.....	21
1.5 Prostý tah, tlak.....	22
1.6 Castiglianova věta	24
1.7 Mezní stavy	25
1.7.1 MS pružnosti.....	26
1.7.2 MS vzpěrné stability	26
1.8 Zatížení od klimatických jevů.....	29
2 Analytický výpočet.....	31
2.1 Model prutové soustavy	31
2.2 Zatěžující prvky	35
2.2.1 Vlastní tíha konstrukce	35
2.2.2 Tíha střech.....	36
2.2.3 Tíha schodiště	37
2.2.4 Zatížení od větru	37
2.3 Sestavení rovnic rovnováhy	39
2.4 Zátěžný stav 1	42
2.4.1 Statický rozbor.....	42
2.4.2 Sestavení deformačních podmínek	44
2.4.3 Vyhodnocení mezního stavu pružnosti.....	47
2.4.4 Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability	48

2.4.5	Deformace vybraného místa prutové soustavy	50
2.4.6	Zhodnocení	51
2.5	Zátěžný stav 2	52
2.5.1	Statický rozbor	52
2.5.2	Sestavení deformačních podmínek.....	52
2.5.3	Vyhodnocení mezního stavu pružnosti	56
2.5.4	Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability.....	56
2.5.5	Deformace vybraného místa prutové soustavy	58
2.5.6	Zhodnocení	58
2.6	Zátěžný stav 3	59
2.6.1	Statický rozbor	60
2.6.2	Sestavení deformačních podmínek.....	61
2.6.3	Vyhodnocení mezního stavu pružnosti	64
2.6.4	Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability.....	65
2.6.5	Deformace vybraného místa prutové soustavy	66
2.6.6	Zhodnocení	67
3	Numerický výpočet	69
3.1	Metoda konečných prvků	69
3.2	Algoritmus MKP	69
3.3	Aplikace MKP na prutovou soustavu	69
3.4	Verifikace	73
3.5	Zvýšení úrovně numerického modelu	76
3.6	Kontrola předepnutí táhel	76
3.7	Výpočet konstrukce rozhledny Hraniční vrch v programu ANSYS	78
3.7.1	Porovnání výpočtového modelu se skutečnou konstrukcí při Z3	79
	ZÁVĚR.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	85
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88
	SEZNAM TABULEK.....	90
	SEZNAM PŘÍLOH.....	91

ÚVOD

Rozhlednu Hraniční vrch jsem se poprvé spatřil na jaře v roce 2017. Ihned mě zaujala svojí atypickou konstrukcí a neobvyklým statickým uložením. Vzhledem k tomu, že jsem byl čerstvým absolventem předmětu Statika a Pevnost Pružnost I, rozhodl jsem se na své získané dovednosti navázat zpracováním bakalářské práce. Jelikož jsem se dlouhou dobu rozmýšlel mezi studiem na fakultě strojní nebo stavební, poskytla mi tato práce určitý kompromis mezi oběma odvětvími. Mým hlavním záměrem bylo zjistit, která místa rozhledny můžeme považovat za kritická a jak se rozloží napětí v konstrukci po předepnutí táhel.

Hlavním cílem této bakalářské práce je napjatostně deformační analýza prutové soustavy, která vychází z rozhledny Hraniční vrch u Města Albrechtic. Při zpracování se bude postupovat následujícími kroky:

- Rešerše a získání vstupních údajů o rozhledně na Hraničním vrchu.
- Úprava topologie rozhledny tak, aby splňovala podmínky kladené na prutovou soustavu.
- Vytvoření zjednodušeného 3D výpočtového modelu prutové soustavy rozhledny, který odpovídá skutečné konstrukci a zároveň nepřesahuje svou složitostí míru bakalářské práce.
- Analýza zatěžujících prvků a vymezení zátěžných stavů.
- Posouzení změny napjatosti a deformace konstrukce rozhledny při změně míry statické neurčitosti uložení analytickým řešením v softwaru Maple.
- Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením v prostředí ANSYS Workbench.
- Porovnání navrhnutého uložení s úplným vetj
- Vytvoření geometrie, která odpovídá skutečné konstrukci, a hledání společných vlastností obou modelů.

Za vedlejší cíl je možné považovat vytvoření návodu na verifikaci analytického řešení numerickým výpočtem v prostředí Workbench. Pro samotné zpracování bude nutné vzájemně propojit poznatky z předmětů Statika, Pružnost a pevnost I, MKP a Matematika.

1 Teoretický úvod

1.1 Rozhledny

Za rozhlednu můžeme považovat stavbu, která byla vytvořena lidskou rukou a lidem také slouží. [1] Jejím hlavním účelem je poskytnout návštěvníkovi nezakrytý rozhled do krajiny. V naší zemi můžeme nalézt spoustu míst, které bychom díky jejich umístění a výhledům z nich mohli považovat za rozhledny. Každá taková stavba by však měla splňovat alespoň následující kritéria:

- Byla postavena lidmi
- Jejím hlavním účelem je rozhled do krajiny
- Je vyvýšena nad okolní terén
- Je přístupná široké veřejnosti
- V turistických časopisech a mapách je považována za vyhlídkové místo

1.1.1 Historie

V této části práce si uvedeme období a společenské situace, které nejvíce ovlivnily výstavbu vyhlídkových věží na našem území. [1]

Za předchůdce dnešních rozhleden můžeme považovat věže na středověkých panstvích, jejichž hlavním účelem však nebylo umožnit návštěvníkům pouze rozhled do krajiny. Tyto pozorovací věže sloužily především k obranným nebo signalizačním účelům. Jako příklad bychom mohli uvést věž Vartovku u slovenského města Krupiny, která byla postavena roku 1564 a o čtyři století později přeměněna na rozhlednu.

První větší rozmach ve výstavbě těchto turistických atrakcí nastal počátkem 19. století v období romantismu. Bohatí aristokraté si mohli dovolit na svých panstvích vybudovat první rozhledny. Jako nejznámější rozhlednu tohoto období bychom uvedli Minaret z roku 1802, který se nachází v Lednicko-Valtickém areálu.

V následujících letech 19. století se o výstavbu rozhleden nejvíce zapříčinily dvě události. První z nich byla snaha na území rakousko-uherské monarchie vytvořit stabilní katastr. Pro majitele panství z toho vyplynula povinnost vycházet vstříc geodetům a postavit jim zaměřovací body. Každý zúčastněný to pojal po svém a vznikaly jak dřevěné konstrukce, tak i velkorysejší kamenné stavby. Druhou významnou událostí byl rozmach lázeňských měst. Ta chtěla svým návštěvníkům poskytnout maximální zážitek z pobytu, a proto budovala odpočinkové stezky zakončené například právě rozhlednou. Podobný přístup měla v té době města jako Mariánské Lázně, Františkovy Lázně, Jeseník nebo Karlovy Vary, které počátkem 1. světové války obklopovalo hned 6 rozhleden.

O největší nárůst se v druhé polovině 19. století postaraly tehdejší turistické spolky. Ty považovaly vyhlídkové body za dobrý cíl při budování turistických stezek. Každé nové otevření byla velká sláva, na které se scházeli lidé z širokého okolí. Většina takto postavených staveb byla dřevěné konstrukce, a proto se dodnes mnohé z nich nedochovaly. Za zmínku stojí rozhledna Babí lom u Brna, která byla přestavěna v polovině 20. století. S rostoucím vlivem spolků však rostly také jejich možnosti. Počátkem 20. století se objevovaly první architektonické návrhy zděných vyhlídkových věží. Jako příklad můžeme uvést rozhlednu Dianu u Karlových Varů.

Za dob první republiky se tato tradice dokázala zachovat, avšak změnil se charakter budovaných staveb. Jedním z preferovaných požadavků bylo, aby nově vzniklá stavba sloužila více účelům, a tak se rozhledny stávaly čím dál častěji součástí turistických chat.

Doba úpadku započala s příchodem světové hospodářské krize v roce 1929. Mnohé projekty se z důvodu nedostatku financí zrušily nebo jejich stavba byla přesunuta na neurčito. Nejhorší období však nastalo během okupace nacistickým Německem od roku 1939 a následovně v průběhu vlády komunistického režimu. Nejenže nevznikaly objekty nové, ale dokonce jsme přestali pečovat i o ty staré a postupně docházelo k jejich degradaci. S rozšířením užívání televizních přijímačů se mnohé z nich staly nosiči antén nebo se přeměnily na vojenské objekty. Během druhé poloviny 20. století se postavily pouze 4 nové rozhledny, jednou z nich byl výše zmiňovaný Babí lom.

Znovuoživení této tradice nastalo až po roce 1989. Změna režimu dala novou tvář naší společnosti a tím i okolí ve kterém žijeme. Obce se stávají správci těchto objektů a ty na oplátku přivádějí turistický ruch na venkov. Charakter staveb se z důvodu úspory nákladů zachovává jako víceúčelový, a tak obce sdílejí náklady s telekomunikačními firmami.

1.1.2 Typy rozhleden

Různá finanční situace zadavatelů staveb umožnila vznik odlišných přístupů při budování rozhleden. [1] Uvedeme si nečastější rozdělení z hlediska použitého materiálu a výhody s ním spojené.

1.1.2.1 Dřevo

Dřevo, nejlevnější a nejdostupnější materiál, bylo použito převážně v počátcích rozvoje. Většina takto postavených rozhleden postrádala vnější opláštění, aby lépe odolávaly vnějším vlivům. Takto postavené objekty nedosahovaly dlouhé životnosti, a proto se většina z nich do dnešní doby nedochovala nebo byla přestavěna. Nejvyšší dřevěná rozhledna měřila 30 metrů, jmenovala se Andrlův chlum a byla zbudována v roce 1905.

1.1.2.2 Ocel

Ocelové rozhledny se svou konstrukcí velmi podobají těm dřevěným. Ocel jako materiál zvyšuje pevnost rozhledny a daleko lépe odolává vnějším vlivům. V dnešní době se jedná o nejčastější konstrukční materiál a specializované firmy jsou schopny dodat vyhlídkovou věž takzvaně „na klíč“. Velmi často pak tyto objekty slouží jak telekomunikačním účelům, tak i k potěšení turistů. Ocelová konstrukce je také i rozhledna Hraniční Vrch, jež je předmětem této bakalářské práce.

1.1.2.3 Zděné stavby

Zděné stavby mají nepopíratelnou výhodu v tom, že dokážou odolávat nepříznivému počasí na vrcholcích hor desítky až stovky let. Poskytují návštěvníkům relativně pohodlné místo k odpočinku a bezpečný výhled do okolí. Náklady na takové stavby

ovšem daleko převyšují náklady na ty dřevěné nebo ocelové. Jedna z mála možností, jak je snížit bylo využívat nabízející se materiál v okolí stavby. Dnes můžeme narazit na objekty, kde převažuje žula, pískovec nebo například čedič. V okolí větších obcí a měst pak najdeme nejčastěji stavby cihlové.

1.1.2.4 Beton

Beton je konstrukční materiál, který posunul hranice realizovatelnosti projektů v mnoha odvětvích. V oblasti výstavby rozhleden se beton používal spíše výjimečně a to tam, kde se jednalo skutečně o výškové stavby. Z části betonovou a z části ocelovou konstrukcí je například vysílač Praděd v Jeseníkách.

1.2 Rozhledna Hraniční vrch u Města Albrechtic

Rozhledna se nachází na česko-polských hranicích nedaleko Města Albrechtic. Leží v nadmořské výšce 536 m n. m. a dosahuje vlastní výšky 25 m. [2] Byla otevřena v roce 2011, jejím zřizovatelem je Město Albrechtice. Byla spolufinancována jako projekt „Slezsko bez hranic – rozhledny a vyhlídková místa“ z Operačního programu přeshraniční spolupráce České a Polské republiky. Svým návštěvníkům rozhledna nabízí za příznivých klimatických podmínek pohled na celý Osoblažský výběžek nebo na nejvyšší moravskou horu Praděd. Rozhledna zaujme v první řadě svou atypickou konstrukcí skládající se ze dvou telekomunikačních věží přemostěných lávkou. Původní telekomunikační věže byly postaveny již v roce 1980 a město je získalo v roce 2006 za symbolickou cenu 1190 Kč.



Obr. 1 Původní telekomunikační věže [2]



Obr. 2 Nově postavená rozhledna Hraniční vrch [2]

1.2.1 Původní konstrukce

Telekomunikační věže vystupují do celkové výšky 24,5 metrů. Jejich osová vzdálenost je 19,9 metrů a vzájemně jsou pootočený o 9 stupňů. [3] Větší věž A má půdorysné rozměry $3,2 \times 3,2$ metrů a menší B je rozměrů $2,26 \times 2,26$ metrů. Konstrukce je složena z typizovaných částí a všechny nosné prvky se skládají z trubek různých průřezů. Svislé nárožníky z průřezů $Tr\ 168 \times 8$, příčníky $Tr\ 89 \times 6$ a diagonály $Tr\ 108 \times 6$. Při rekonstrukci rozhledny bylo nutné eliminovat zásahy do původních konstrukcí. Největším problémem se ukázalo praskání trubek ve spojích, což bylo zapříčiněnou usazenou vodou, která vlivem nízké teploty zamrzala a způsobovala namáhání. Ve spojích proto musely být vytvořeny odvodňovací kanálky.

1.2.2 Nové konstrukce

Při návrhu rozhledny byly použity běžné válcované profily jako IPE, HEA, HEB, U, UPE, T. [3] Všechny části jsou povrchově upraveny pozinkováním ponorem. Lávka spojuje obě věže a zároveň rozšiřuje vyhlídkovou plochu celé rozhledny. Její délka je 17 metrů a šířka 1,4 metrů. Na krajní příčníky plošin věží je ukotvená dolními pásy. Celá lávka je pokryta slzičkovým plechem tloušťky 4 mm. Nad oběma plošinami se nachází střechy jehlanového průřezu. Sloupy věží jsou vetknuty do plošin. Střechy je pokrývají OSB desky tloušťky 22 mm a titan zinkovaný plech tloušťky 1 mm. Plošina na věži A má stejné půdorysné rozměry jako samotná věž, plošina na věži B přesahuje rozměry věže a stojí částečně na konzolách. Do plošin se kotví zábradlí ze sloupků kruhových průřezů, madlo z trubek a výplň mezi sloupy tvoří svařované rámy z ploché oceli. Schodiště je

ukotveno na věži A a čtyřikrát se kolem ní obtočí. Celkový počet schodů je 132, jsou tvořeny podesty s nosnými pásky 40×3 mm.

Při statickém výpočtu, na kterém se podílela brněnská projekční kancelář FEVIA s. r. o. společně s Link projekt s. r. o. a Graflunds s. r. o, byl zjištěn nevyhovující stav konstrukce jak z hlediska statického, tak i dynamického. Při dynamickém výpočtu konstrukce nevyhovovala účinkům vandalismu, kdyby už malá skupinka lidí mohla rozhlednu kriticky rozkmitat. Řešením tohoto problému se stalo ukotvení věží do čtyřech táhel Macalloy 460 dimenze M30, které byly předepnuty na předepsané síly. Tento postup se stal jedinou možností, jak rozhlednu zachovat v původní velikosti a zároveň ji postavit tak, aby vyhovovala normám a byla bezpečná. Napínání táhel bylo realizované v 7 krocích odpovídajících zpracovanému technologickému postupu. Samotné předpětí bylo naměřeno frekvenční metodou.

Abychom mohli úlohu analyticky řešit, je nutné z reálného objektu vytvořit výpočtový model. V bakalářské práci převedeme skutečnou rozhlednu na model prutové soustavy.

1.3 Teorie prutových soustav

1.3.1 Předpoklady prutových soustav

Prutová soustava je vymezena následujícími předpoklady. [4]

1. „Vazby mezi tělesy jsou u prostorových úloh sférické kinematické dvojice a u rovinných úloh rotační kinematické dvojice, v obou případech typu NNTN“.
2. „Jednotlivá tělesa jsou buď pruty nebo styčnicková tělesa. Prutem ze statického hlediska rozumíme modelové těleso, které je jednoznačně určeno střednicí γ , která je spojnice těžišť příčných průřezů. V prutových soustavách se omezíme na pruty se střednicí přímou“.
3. „Styčnickové těleso spojuje dva a více prutů, přičemž středy sférických kinematických dvojic u prostorových úloh a středy rotačních kinematických dvojic u rovinných úloh splývají. Tento společný bod nazveme styčnickem“.
4. „Okolí prutové soustavy působí silami pouze na styčnicková tělesa“.
5. „Uložení k základnímu tělesu je realizováno stykem ve styčnicku. U rovinných soustav rotační nebo obecnou kinematickou dvojicí a u prostorových soustav sférickou nebo obecnou kinematickou dvojicí.“
6. „Každý prut prutové soustavy je vázán prostřednictvím styčnickových těles minimálně ke dvěma jiným prutům tak, že pruty jsou nepohyblivé. Soustava prutů vytváří nepohyblivé prutové těleso.“

1.3.2 Statická určitost

U prutových soustav rozlišujeme vnější, vnitřní a celkovou statickou určitost [4]

1.3.2.1 Vnější statická určitost

„Vztahuje se k určení vnějších neznámých stykových sil uvolněného prutového tělesa z použitelných podmínek statické rovnováhy. Nutnou podmínkou vnější statické určitosti můžeme vyjádřit vztahem“. [4]

$$v = \mu A \quad (1)$$

kde v je počet použitelných statických podmínek rovnováhy

μA je počet neznámých parametrů vnějších stykových sil

Při výpočtu statické určitosti mohou nastat 3 případy:

$$v = \mu A \quad (2)$$

Soustava je staticky určitá, tzn. počet rovnic odpovídá počtu neznámých parametrů.

$$v > \mu A \quad (3)$$

Soustava má s minimálně jeden stupeň volnosti.

$$v < \mu A \quad (4)$$

Soustava je staticky neurčitá, tzn. v soustavě je více neznámých parametrů než použitelných rovnic. Je potřeba předepsat deformační podmínku.

1.3.2.2 Vnitřní statická určitost

„Vztahuje se k určení sil v prutech“ [4]

$$p = 3k - 6 - \text{pro prostorovou prutovou soustavu} \quad (5)$$

$$p = 2k - 3 - \text{pro rovinnou prutovou soustavu} \quad (6)$$

Stupeň vnitřní statické neurčitosti u prostorové, respektive rovinné úlohy určíme jako

$$s = p - (3k - 6) - \text{pro prostorovou prutovou soustavu} \quad (7)$$

$$s = p - (2k - 3) - \text{pro rovinnou prutovou soustavu}$$

kde p je počet prutů, k je počet styčníků

Při výpočtu statické určitosti mohou nastat 3 případy:

$$s = 0 \quad (8)$$

Soustava je vnitřně staticky určitá, tzn. počet rovnic odpovídá počtu neznámých parametrů.

$$s < 0 \quad (9)$$

Soustava je vnitřně pohyblivá.

$$s > 0 \quad (10)$$

Soustava je vnitřně neurčitá, tzn. je potřeba předepsat deformační podmínku.

1.3.2.3 Celková statická určitost:

„Vztahuje se k určení všech neznámých nezávislých parametrů prutové soustavy z použitelných podmínek statické rovnováhy.“ [4]

$$3k = p + \mu A - \text{pro prostorovou prutovou soustavu} \quad (11)$$

$$2k = p + \mu A - \text{pro rovinou prutovou soustavu} \quad (12)$$

1.3.3 Metody řešení prutových soustav

1.3.3.1 Obecná styčnicková metoda

Při této metodě se uvolňují všechny styčnické podmínky a sestavuje se soustava lineárních algebraických rovnic, kterou je možné psát v maticovém tvaru. [4]

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (13)$$

Obecnou styčnickovou metodou řešíme také analytický výpočet naší prutové soustavy, a to za pomoci matematického softwaru Maple.

1.3.3.2 Postupná styčnicková metoda

Při této metodě se styčníky uvolňují postupně. [4] Jejich pořadí pak ale není libovolné, ale je dáno podmínkou, že na uvolněný styčník působí kromě úplně určených silových prvků neúplně určené silové prvky pouze se 3 neznámými parametry u prostorové, resp. se 2 neznámými parametry u rovinné prutové soustavy. Postupná styčnicková metoda je nevhodná pro složitější soustavy, proto jí v naší práci nevyužijeme.

1.4 Teorie prutu

„Prut je v Pružnosti a pevnosti teoretickým modelem reálného tělesa z hlediska napjatosti a deformace a je modelem nejjednoduššího typu.“ [5]

1.4.1 Prutové předpoklady

1. Geometrické předpoklady [5]

- *„Prut je určen střednicí γ a v každém jejím bodě příčným průřezem ψ , který obsahuje všechny body normálové roviny. Průsečík γ a ψ se nazývá těžiště příčného průřezu, značíme T .“*
- *„Střednice γ je spojitá a hladká křivka konečné délky.“*
- *„Příčný průřez je spojitá jedno nebo vícenásobně souvislá oblast ohraničená obrysem a charakterizována charakteristikami příčného průřezu.“*
- *„Délka střednice je řádově stejně velká jako největší rozměr příčného průřezu.“*

2. Předpoklady vazbové a deformační [5]

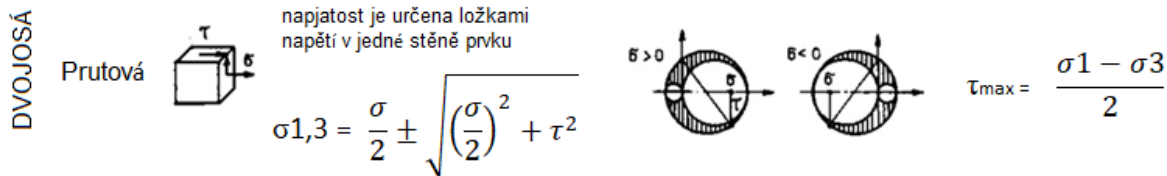
- *„Vazby omezují jen posuvy a úhly natočení střednice.“*
- *„Zatížení je soustředěno na střednici, tj. silovým působením na prut jsou osamělé a liniové síly a silové dvojice s působištem na střednici.“*

3. Předpoklady deformační [5]

- *„Střednice prutu zůstává v procesu deformace spojitá a hladká“*
- *„Příčné průřezy zůstávají v průběhu deformace zase příčnými průřezy, tj. zachovávají si rovinnost a kolmost k deformovaní střednici.“*

4. Předpoklady napjatostní [5]

- *„Napjatost prutu je určena normálovým a smykovým napětím v příčném průřezu.“*

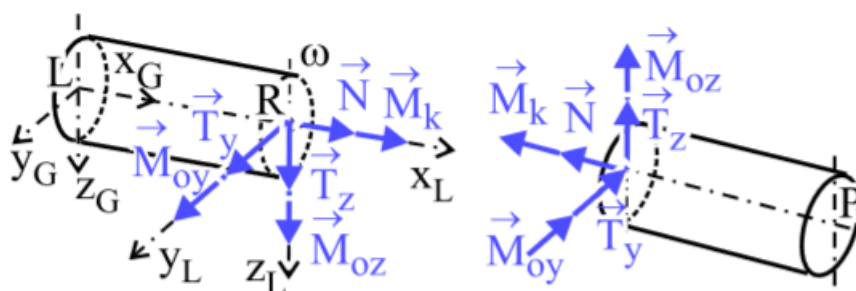


Obr.3 Prutová napjatost (obr. upraven) [5]

1.4.2 Výsledné vnitřní účinky

„Výsledné vnitřní účinky jsou složky silové (F_v) a momentové výslednice (M_v) vnitřních sil v těžišti příčného průřezu, které spolu se soustavou vnějších silových účinků tvoří rovnovážnou silovou soustavu působící na prvek prutu.“ [6]

N	Normálová síla	Namáhání tahem, tlakem
T_y, T_z	Posouvající síla	Namáhání smykem
M_k	Kroutící moment	Namáhání krutem
M_{oy}, M_{oz}	Ohybový moment	Namáhání ohybem



Obr. 4 Příklady uvolnění VVÚ [6]

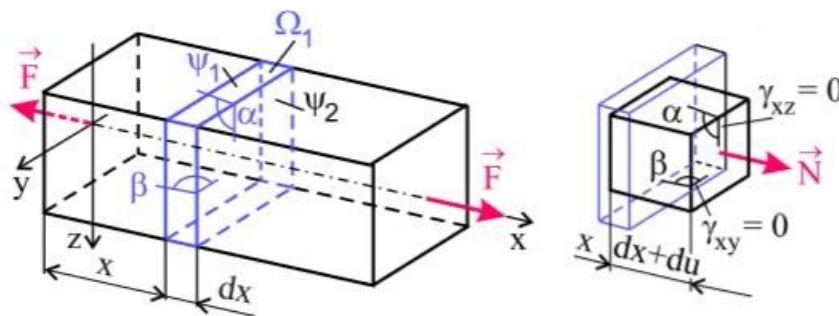
U rovinných úloh mají VVÚ 4 neznámé parametry N, T, M_k, M_o . V případě prutové soustavy se jedná o jednoduché namáhání s jednou nenulovou složkou VVÚ, a to normálovou silou N . Tah ($N > 0$), Tlak ($N < 0$).

1.5 Prostý tah, tlak

„Prostý tah a tlak je označení pro zatěžování přímého prizmatického prutu, jestliže na dané rozlišovací úrovni“ [5]

- „Jsou splněny prutové předpoklady.“
- „Příčné průřezy se oddalují (přibližují) a následně deformují.“
- „Jedinou nenulovou složkou $VV\dot{U}$ je normálová síla.“
- „Pro řešení statické rovnováhy se prvek prutu uvolňuje ve výchozím nedoformovaném stavu.“

Při zatěžování prostým tahem (tlakem) se vzdálenosti dx dvou příčných průřezů ψ_1, ψ_2 oddalují (přibližují) o deformační posuv du , který je totožný v každém bodě příčného průřezu. Právé úhly α, β se nemění.



Obr. 5 Deformace elementárního prvku prostým tahem [6]

Takové zatížení můžeme pospat následujícími deformačními charakteristikami:

Délkové přetvoření v podélném směru jsou konstantní v celém příčném průřezu.

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (14)$$

Přetvoření v příčných směrech jsou také nenulová s opačným znaménkem než ϵ_x

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\mu * \epsilon_x \quad (15)$$

Úhlová přetvoření jsou vždy nulová.

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xz} = 0 \quad (16)$$

V takovémto prutu pak vzniká trojosý stav deformace.

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (17)$$

Rozložení napětí po příčném průřezu Hookovského materiálu se řídí lineární závislostí.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (18)$$

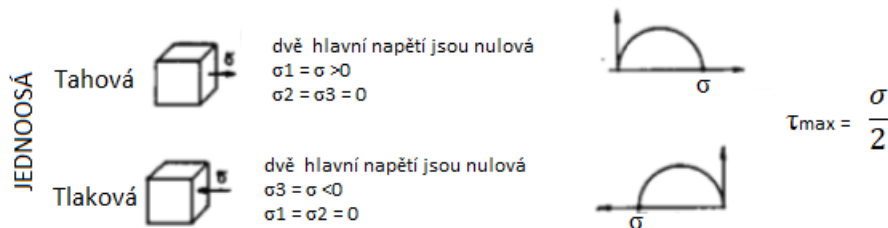
Smyková napětí jsou vždy nulová

$$\tau = \frac{E}{2 * (1 + \mu)} * \gamma = G * \gamma = 0 \quad (19)$$

V takovémto prutu pak vzniká jednoosý stav napjatosti.

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Napjatost v bodě tělesa je u prostého tahu a tlaku určena pouze jedním normálovým napětím.



Obr. 6 Jednoosá napjatost tahová a tlaková na Elementární krychli a v Mohrově rovině (obr. upraven) [5]

Vztah pro napětí v závislosti na geometrických charakteristikách (příčný průřez ψ a jediná nenulová složka VVÚ N) je za použití podmínek statické ekvivalence odvozen jako:

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (21)$$

Vztah pro energii napjatosti, která se akumuluje v objemu, se určí z věty o vratné přeměně deformační práce dA vnější silové soustavy za pružnou energii napjatosti dW .

$$dA = dW \quad (22)$$

Pokud na elementární prvek působí vnitřní elementární síla dF , kterou můžeme vyjádřit jako σdS . Prvek se deformuje na délce dx o posuv du a vykonána elementární práce odpovídá vztahu:

$$dA = \frac{1}{2} dF du = \frac{1}{2} \sigma dS du \quad (23)$$

Za použití vztahů $du = \varepsilon * dx$, $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$, $dA = dW$ dostaneme vztah pro energii napjatosti

$$dW = \frac{\sigma^2}{2 * E} dS dx \quad (24)$$

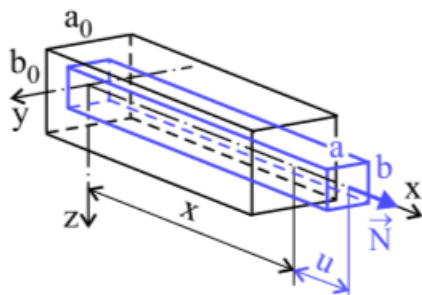
U prostého tahu a tlaku platí $\sigma = \frac{N}{S}$.

$$dW = \frac{N^2}{2 * E * S} dx \quad (25)$$

$$W = \int_0^x dW = \frac{1}{2} \int_0^x \frac{N^2}{E * S} dx \quad (26)$$

Pro určení vztahu pro posuv u vycházíme ze vztahů $du = \varepsilon_x * dx$, $\varepsilon_x = \frac{\sigma}{E}$, $\sigma = \frac{N}{S}$, dostaneme vztah

$$u(x) = \int_0^x \frac{N}{E * S} dx \quad (27)$$



Obr. 7 Deformace kostky tahem [6]

1.6 Castiglianova věta

Castiglianova věta je energetická metoda, která umožňuje řešení posuvů a staticky neurčitě uložených soustav.

„Působí-li osamělé síly na lineárně pružnou soustavu, jejíž deformace jsou malé, pak posuv působíště libovolné síly po její nositelce je roven parciální derivaci celkové energie napjatosti podle této síly. Výrazy síla a posuv mohou být nahrazeny výrazy silová dvojice a natočení.“ [7]

Posuv u působíště síly F po její nositelce je dán parciální derivací celkové energie napjatosti tělesa podle této síly.

$$u = \frac{\partial W}{\partial F} \quad (28)$$

Úhel natočení φ v místě působení silové dvojice M v rovině jejího působení je dán parciální derivací celkové energie napjatosti tělesa podle této silové dvojice.

$$\varphi = \frac{\partial W}{\partial M} \quad (29)$$

1.7 Mezní stavy

Každá vyrobená součást prochází po dobu svojí funkce určitými stavy. [5]

- Nezatížený stav: Stav, kdy $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, v Haigově diagramu se nacházíme v počátku souřadného systému
- Výchozí stav: V bodech tělesa je napjatost, která je způsobena výrobním nebo montážním procesem.
- Provozní stav: Zatížený stav při běžném provozu součásti.
- Mezní stav

Pod tímto názvem si představme selhání součásti z důvodu selhání materiálu. Je dosaženo mezní stavové veličiny a nastává porucha. Mezní stavy (dále jen MS) rozdělujeme na tři hlavní podoblasti.

MS související s deformací

- MS deformační stability
- MS pružnosti

MS související s porušením soudržnosti

- MS lomu
- MS stability trhlin

MS související s poškozením povrchů

- Kontaktní únava
- Abrazivní opotřebení
- Adhezní opotřebení

Při výpočtech naší prutové soustavy bude prováděna kontrola vůči MS pružnosti, tzn. budeme porovnávat napětí v prutech s mezí kluzu R_e . U tlakově namáhaných prutů bude také provedena kontrola vůči MS vzpěrné stability.

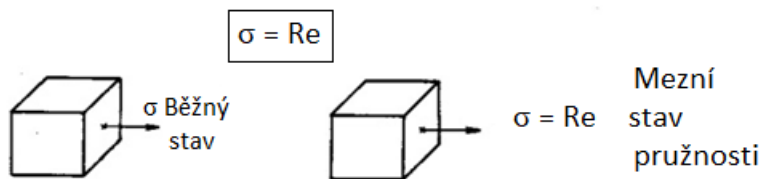
1.7.1 MS pružnosti

MS pružnosti (dále jen MSP) nastane, pokud je hodnota maximálního napětí větší než materiálová charakteristika - výpočtová mez kluzu Re . [5] Po překročení meze kluzu se součást začíná plasticky deformovat. V našem výpočtu budeme předpokládat napětí několikanásobně nižší, než je Re .

$\sigma < Re$ - materiál je ve stavu pružném

$\sigma = Re$ - v materiálu byl dosažen MSP

$\sigma > Re$ - materiál je ve stavu pružně plastickém



Obr. 8 Podmínka MSP (obr. upraven) [5]

Plochou plasticity je v Haigově prostoru válcová plocha, jejíž povrchové přímky jsou rovnoběžné s osou $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Materiálová charakteristika Re se získá na základě výsledků materiálové zkoušky tahem, jejímž výsledkem je tahový diagram. Pro zhodnocení MSP byl zaveden koeficient bezpečnosti k_k , který se získá jako podíl meze kluzu a maximálního napětí na součásti.

$$k_k = \frac{Re}{\sigma_{max}} \quad (30)$$

Jelikož se chceme vyvarovat vzniku plastických deformací v materiálu, je nutné při návrhu a dimenzování součásti volit součinitel $k_k > 1$. Jakých hodnot by měl ve skutečnosti nabývat záleží na funkci dané součásti.

1.7.2 MS vzpěrné stability

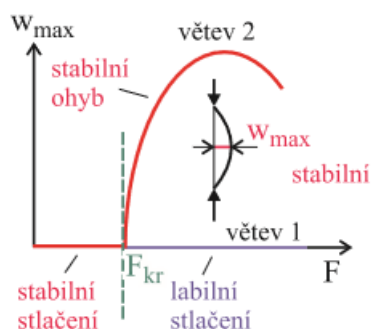
MS vzpěrné stability (dále jen MSVS) se týká součástí, které jsou namáhané tlakem. [5] Při takovém zatížení je podstatné stlačování střednice a nepodstatný její průhyb. Avšak s rostoucím zatížením se stává podstatný průhyb namísto stlačování střednice. Mezní hodnota je kritická síla Fv .

„Mezní stav vzpěrné stability je takový stav součásti, ve kterém se mění charakter podstatné deformace.“ [5]

$F < Fv$ - stlačování prutu

$F = Fv$ - nastává bod bifurkace (rozdvojení rovnováhy) a mění se charakter deformace

$F > Fv$ - ohýbání prutu

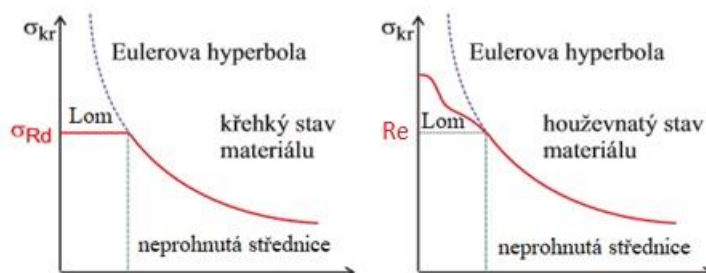


Obr.9 Závislost tlakové síly na průhybu prutu [6]

Nyní si uvedeme odchylky prutu, které mají vliv na deformaci. Řešení diferenciální rovnice průhybu se v těchto případech provádí numericky. [5]

- Vliv anizotropie – například modulu pružnosti E
- Vliv zakřivení střednice a působení síly mimo těžiště – V tomto případě neexistuje bod bifurkace a prut je od počátku namáhán tlakem a ohybem.
- Vliv proměnnosti průřezů a modulu pružnosti E – Bod rozdělení existuje, ale kritická síla je funkcí závislosti $E * J = f(x)$
- Vliv proměnnosti normální síly N – Je-li prut zatížen více osamělými silami nebo liovým zatížením. Bod rozdělení rovnováhy existuje a kritická síla F_v je závislá na rozložení vnějších sil.
- Vliv šroubovitosti prutu

Závislost tlakového napětí σ_v a štíhlosti prutu je vyjádřena hyperbolou (Eulerova hyperbola).



Obr.10 Závislost tlakového napětí na štíhlosti prutu pro křehký a tvárný materiál [6]

Zde je uveden postup vyšetření MSVS na reálné součásti. Nejprve se zavede štíhlost prutu λ , kde

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{J}} = \frac{l}{i} \quad (31)$$

$$\lambda_k = \alpha * \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} \quad (32)$$

Poté se porovná kritická a vypočtená štíhlost. Mohou nastat dva případy:

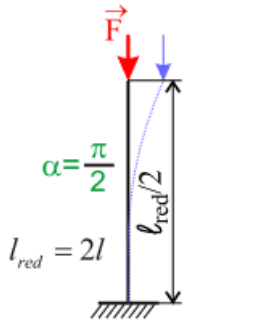
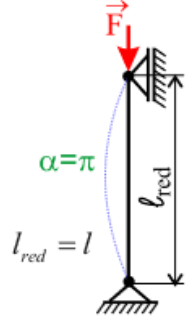
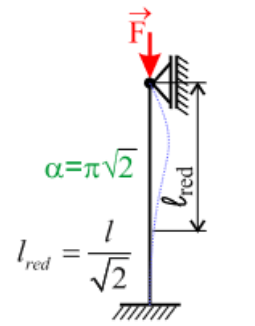
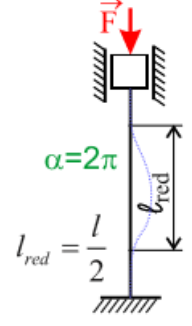
$\lambda > \lambda_k$ MS vzpěrné stability nastane dříve než MS pružnosti

$\lambda < \lambda_k$ MS pružnosti nastane dříve a úlohu je třeba řešit jako pružně plastickou

Při výpočtu MSVS porovnáváme sílu v prutu s kritickou silou vzpěru, kde:

$$F_v = \frac{\alpha^2 * E * J}{l^2} \quad (33)$$

Značný vliv na velikost výsledné síly má také uložení prutu ve vazbách. Tento vliv zahrnuje součinitel α , který je možné získat numerickým řešením charakteristické rovnice. Pro nejčastější případy uložení je součinitel α uveden v tab. 1.

Vetknutí		Rotační + podpora	
$\alpha = \frac{\pi}{2}$	$l_{red} = 2l$	$\alpha = \pi$	$l_{red} = l$
Vetknutí + podpora		Vetknutí + posuvná	
$\alpha = \sqrt{2} * \pi$	$l_{red} = \frac{l}{\sqrt{2}}$	$\alpha = 2 * \pi$	$l_{red} = \frac{l}{2}$

Tab. 1 Součinitel α pro různé uložení ve vazbách [6]

Bezpečnost vzhledem k MSVS se poté určí jako podíl kritické síly vzpěru s tlakovou silou v prutu:

$$k_v = \frac{F_v}{F} \quad (34)$$

1.8 Zatížení od klimatických jevů

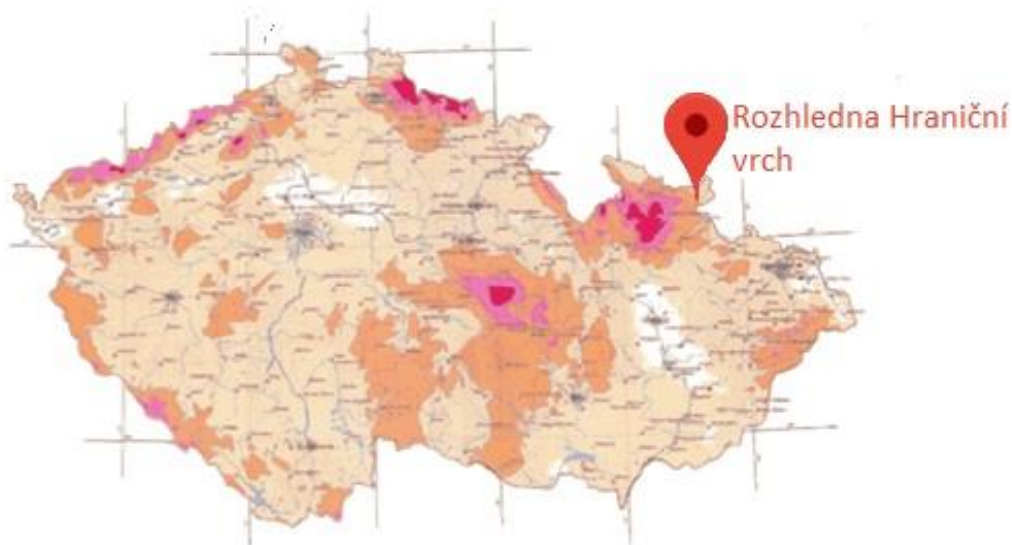
Každá rozhledna je kvůli své vyvýšené poloze namáhána nárazy větru. Takovýmto typem zatížení se zabývá norma ČSN EN 1991-1-4. V této kapitole bude naznačen postup výpočtu namáhání příhradové konstrukce od tlaku větru. [8]

- Určení větrné oblasti a výchozí základní rychlosti větru

Mapa větrných oblastí na území ČR

Oblast	I	II	III	IV	V
Výchozí základní rychlost větru $v_{b,0}$ [m/s]	22,5	25	27,5	30	36

Vypracoval Český hydrometeorologický ústav
v roce 2006



Obr.11 Mapa větrných oblastí na území ČR [8]

- **Základní rychlost větru**

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} \quad (35)$$

kde c_{dir} je součinitel směru větru, c_{season} součinitel ročního období

- **Základní tlak větru**

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 \quad (36)$$

kde ρ je hustota vzduchu

- **Střední rychlost větru**

$$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b \quad (37)$$

kde $c_r(z)$ součinitel drsnosti terénu, $c_0(z)$ součinitel ortografie, který vyjadřuje vliv horopisu.

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ kde } z > z_{min} \quad (38)$$

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (39)$$

kde z_0 je parametr drsnosti terénu, z_{min} minimální výška, k_r součinitel terénu

Kategorie terénu	z_0	z_{min}
0 – mořské a přímořské oblasti	0,003	1
I – Jezera nebo vodorovná plochá krajina bez překážek	0,01	1
II – Krajina s nízkou vegetací, budovami nebo překážkami	0,05	2
III – Oblast pravidelně pokryta vegetací, budovami nebo překážkami	0,3	5
IV – Alespoň 15 % povrchu je pokryto budovami, průměrná výška přesahuje 15 m	1	10

Tab. 2 kategorie terénu [8]

- **Charakteristický maximální dynamický tlak**

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2 \quad (40)$$

kde $I_v(z)$ je intenzita turbulence

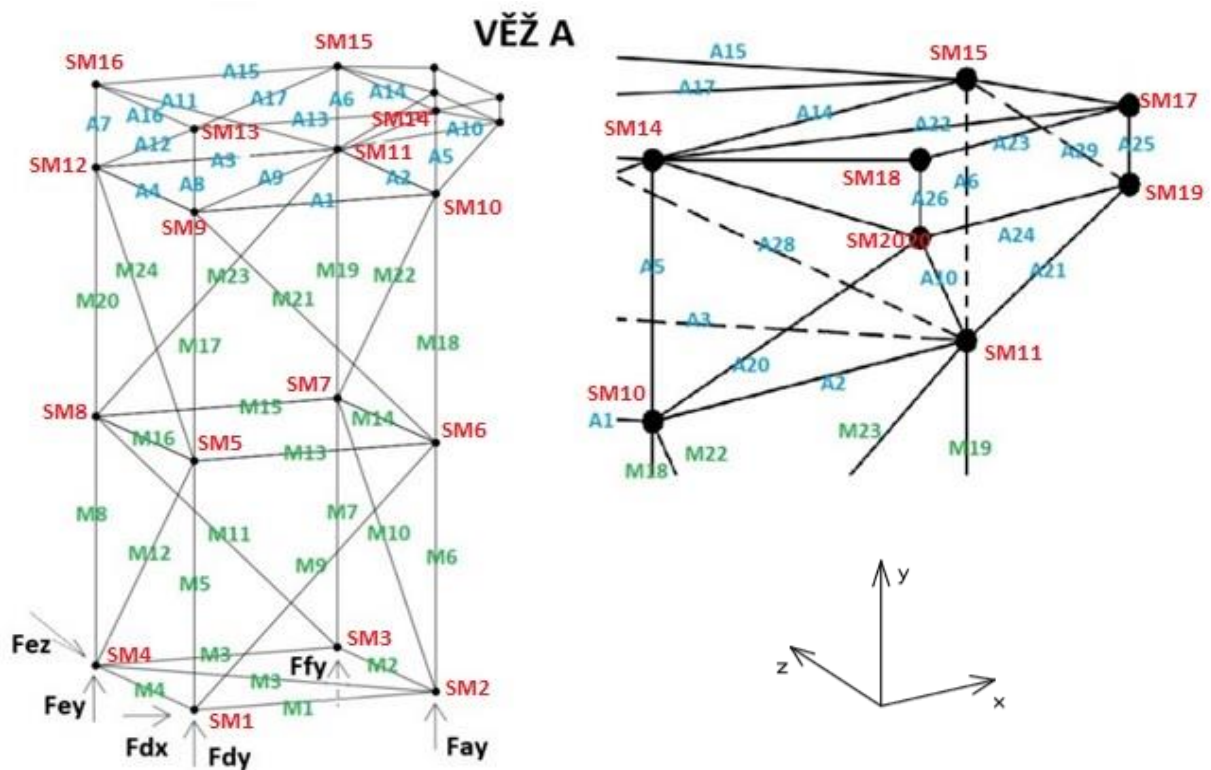
$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (41)$$

kde k_1 je součinitel turbulence

2 Analytický výpočet

2.1 Model prutové soustavy

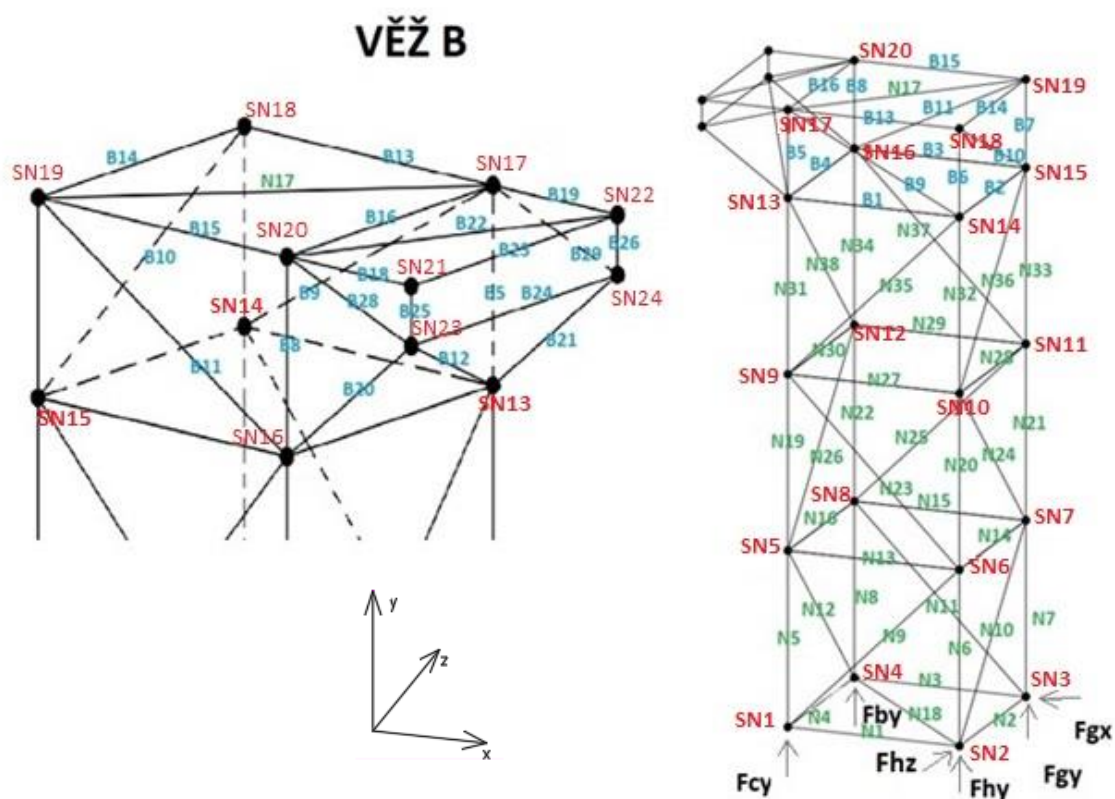
Aby bylo možné rozhlednu analyticky řešit, je potřeba z ní udělat odpovídající výpočtový model. Hlavním rozdílem je skutečnost, že model nebude uvažován jako rámová konstrukce. Takové řešení by bylo analyticky velmi náročné a bude zpracováno pouze numericky. V modelu jsou pruty spojeny do sférických vazeb, které zamezují 3 posuvům. Prutová soustava vytvořená z celé rozhledny by obsahovala více jak 300 prutů. V takovémto případě by pravděpodobnost chyby při psaní rovnic a deformačních podmínek byla vysoká a nemuselo by se podařit takový výpočet adekvátně numericky verifikovat. Proto jsme se rozhodli model upravit odebráním opakujících se částí rozhledny. Skutečná konstrukce telekomunikačních věží se totiž skládá ze 4 opakujících se typizovaných segmentů. Samotný model byl rozdělen na 5 částí, které bylo možné řešit samostatně. Každá z nich dostala vlastní indexy pro číslování prutů. Délky a příčné průřezy jednotlivých prutů jsou v tab. 7.



Obr. 12 Model prutové soustavy věže A

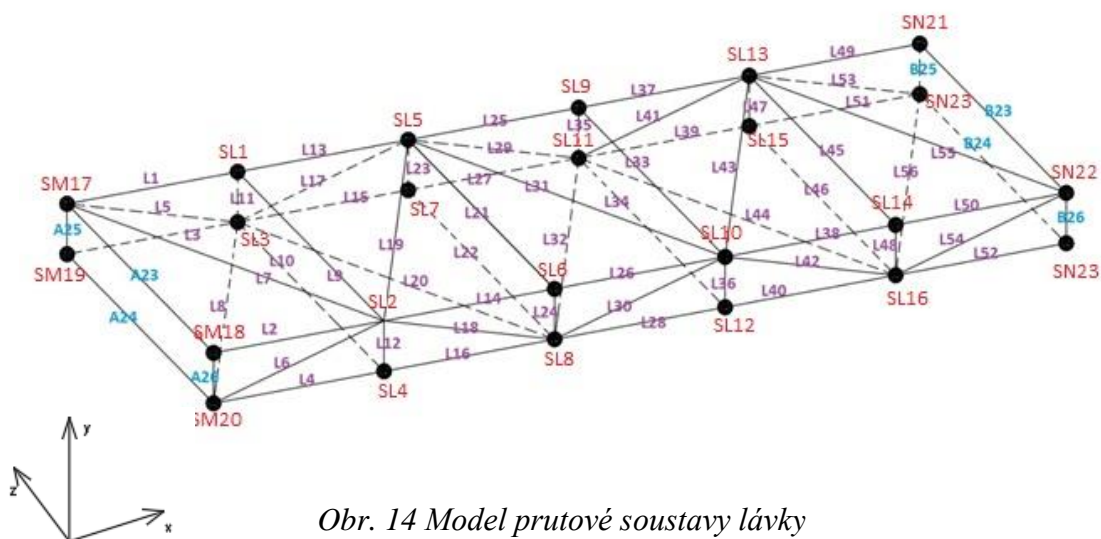
Věž A v našem modelu obsahuje 20 styčnicků a 53 prutů. První dvě nadzemní sekce jsou totožné o půdorysných rozměrech $3,2 \times 3,2$ metrů (pruty M1-M24). Jejich výška jsou 3 metry. Vrchní část tvořící plošinu, která je stejných půdorysných rozměrů jako hlavní sekce, se liší ve výšce, která je 0,8 metrů (prut A1-A16). Na plošinu navazuje tzv. klín, jehož hlavní funkce je spojení věže s plošinou (pruty A18 – A29). Platforma pro uložení lávky je na skutečné rozhledně realizována pomocí podélníků HEA 220, ke kterým je zespoda přišroubovaný příčník HEB 200. V našem modelu jsme z této skutečnosti vycházeli a přidáné pruty klínu v příčném i podélném směru jsou navrženy tak, aby

průřezově odpovídaly skutečným profilům. Při volbě vazeb bylo hlavním cílem zamezit pohyb ve směru největšího zatížení. Proto najdeme v každém spodním styčnicku podpory ve směru y . Navíc jsme zamezili posuv také ve směru x i z .



Obr. 13 model prutové soustavy věže B

Věž B obsahuje 24 styčníků a 65 prutů. Skládá se ze třech typizovaných částí o půdorysných rozměrech $2,26 \times 2,26$ metrů a výšky každé z částí 2 metry (pruty N1-N38). Vrchní část tvořící plošinu je rovněž stejných půdorysných rozměrů jako hlavní sekce a výšky 0,8 metrů (pruty B1-B16). Na plošinu navazuje klín, jehož hlavním účelem je spojení věže s lávkou (pruty B18-B29). Jeho rozměry byly navrženy ze skutečných profilů použitých na rozhledně. Vazby jsou opět voleny ve směru maximálního zatížení. Navíc byl také zamezen posuv ve směru x i z .




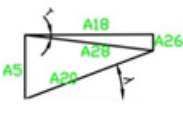

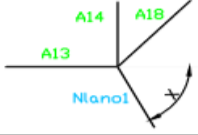




Obr. 14 Model prutové soustavy lávky

Největší odlišnost naší modelové soustavy od reálného objektu najdeme v látce. Zatímco na skutečné rozhledně je látka tvořena 2D rámem, v našem modelu ji bylo třeba vymodelovat tak, aby odpovídala předpokladům 3D prutové soustavy. Naše modelová látka je dlouhá 7,75 metrů, široká 2,26 metrů a vysoká 0,2 metrů. Podélníky, příčníky i diagonály jsou navrženy tak, aby průřezově odpovídaly skutečným profilům použitých na rozhledně. V případě podélníků jsme vycházeli z profilů HEA 160, příčníku IPE 140 a diagonál L 70 × 6.

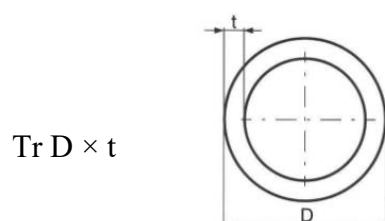
Při analytickém výpočtu bylo třeba všechny pruty promítnout do 3 hlavních os kartézského souřadnicového systému. K tomu bylo třeba z geometrie soustavy vyjádřit potřebné úhly. Pro lepší představu jsme všechny úhly společně s příslušnými pruty uvedli v tab. 3

Úhel	Styčník	Pruty		Hodnota	Odkaz
α	SN1, SN2, SN6 ...	(N9, N1) (N10, N2) (N23, N13) ...		41,5°	Obr.13
β	SN14, SN15, SN16	(B1, B9) (B2, B10) (B11, B3)		19,5°	Obr.13
γ	SN20, SN22 ...	(B22, B16) (B23, L55) ...		34,4°	Obr.13
δ	SN13, SN16	B21 B20		21,2°	Obr.13
φ	SN17, SN20	(B19, B29) (B18, B28)		7,4°	Obr.13
ϵ	SN13	B12		12,4°	Obr.13

ϕ	SM1, SM5, SM7	(M9, M1) (M24, M16) (M22, M14) ...		43,2°	Obr. 11
θ	SM9, SM12, SM11	(A1, A9) (A4, A12) (A3, A11)		14°	Obr. 11
η	SM14	(A22, A14)		29,6°	Obr. 11
ζ	SM14, SM15	(A19, A14) (A18, A14)		73,1°	Obr. 11
t	SM14, SM15	(A18, A28) (A19, A29)		7°	Obr. 11
λ	SM10, SM11	A20 A21		20,3°	Obr. 11
ν	SM11	A10		10,8°	Obr. 11
χ	SM14	A13		54,6°	Obr. 25
Ω	SN17	B13		59,6°	Obr. 25
Ψ	SN17, SN20, SM14, SM15	B13, B15, A13, A15		55,8°	Obr. 25

Tab. 3 Úhly vyskytující se na konstrukci

Všechny profily na modelu jsou z bezešvých ocelových trubek dle ČSN 42 5715.01. Trubky jsou označeny podle vnějšího průměru a tloušťky stěny. Při volbě příčných průřezů se vycházelo ze skutečných profilů použitých na rozhledně. Například příčník, který tvoří platformu pro uložení lávky, je z profilů HEB 200 o celkové ploše průřezu 7810 mm². V modelu byl tento příčník nahrazen dvěma pruty (A23, A24; B23, B24), mezi které se plocha průřezu rozpočítala a z katalogu firmy Feron a byl nalezen nejvhodnější profil trubky. Přehled všech profilů modelu shrnuje tab. 4



Označení	Rozměry	Plocha [mm ²]	Osový kvadratický moment [mm ⁴]	Prut
S1	Tr 168 × 8	4021	12900133.4	M5, A6, N7, B8 ...
S2	Tr 89 × 6,3	1636	1407440.3	M1, N2, A3, B4, ...
S3	Tr 108 × 8	2512	3161698.8	M9, B10, A11, M25 ...
S4	Tr 140 × 5	2119	4837561.8	A18, A20, B28, B29 ...
S5	Tr 114 × 12,5	3983	5210811.2	B23, B24, A23, A24 ...
S6	Tr 57 × 5	816	278635.7	L7, B22, B12, A10, ...
S7	Tr 108 × 6	1921	2509064.3	L1, L2, L13, L14, ...
S8	Tr 89 × 5	1318	1167894.9	L11, A25, B26 ...
S10	Macalloy 460 M30	707		Nlano1, Nlano2 ...

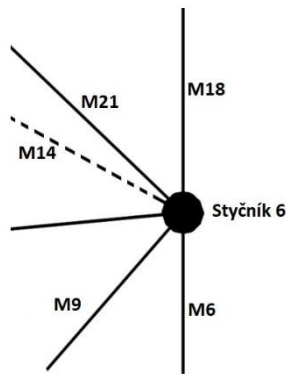
Tab. 4 Přehled profilů použitých na modelu

2.2 Zatěžující prvky

Analytický výpočet se bude provádět pro tři zátěžné stavy, které se od sebou liší mírou statické neurčitosti. Ta je způsobena přidáním obecné kinematické dvojice Fhz mezi stavy Z1 a Z2 a následně předepnutím konstrukce táhly Macalloy mezi stavy Z2 a Z3. Takové předepnutí v analytice předepíšeme pomocí deformační podmínky lan, která vyrobíme o vůli δ kratší. Všechna přidaná silová zatížení jsou popsána v kapitolách 2.2.1 až 2.2.4.

2.2.1 Vlastní tíha konstrukce

Jelikož je nutné splnit prutové předpoklady, musíme veškerá zatížení přenést do styčnicku. Ke každému styčnicku proto bude přiřazena jedna tíhová síla. Vypočítá se jako polovina tíhy každého prutu, který je do styčnicku navázán. Jako příklad je uveden výpočet pro styčnick 6 věže A. Všechny další výpočty jsou v příloze 1.



Obr. 15 Tíha na styčník SM6

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$\rho = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$a = 3 \text{ m}$$

$$b = 3,2 \text{ m}$$

$$c = 4,39 \text{ m}$$

$$S1 = 4021 \text{ mm}^2$$

$$S2 = 1312 \text{ mm}^2$$

$$S3 = 2012 \text{ mm}^2$$

$$mM1 = S1 * 10^{-6} * \rho = 31,56 \frac{kg}{m}$$

$$mM2 = S2 * 10^{-6} * \rho = 10,3 \frac{kg}{m}$$

$$mM3 = S3 * 10^{-6} * \rho = 15,8 \frac{kg}{m}$$

$$FgSM6 = (mM1 * a + mM2 * b + mM3 * c) * g = 1933 \text{ N} \quad (42)$$

2.2.2 Tíha střech

Střechy v modelu zahrnuty nejsou. Ve výpočtech se jejich vliv promítne jako tíhové síly působící na horní styčníky obou věží. Sloupy jsou z profilů HEB 140, spojeny jsou rámovými příčlemi HEA 140. Tvar jehlanu tvoří vaznice IPE 200 u střechy A a IPE 180 u střechy B. Krajiní vaznice jsou z profilů U160 a vnitřní U140. [3] Střechy jsou pokryty OSB deskami tloušťky 22 mm a titan zinkovaným plechem tloušťky 1 mm. V katalogu firmy FERONA byly nalezeny hmotnosti 1 m daných profilů a následně dopočítána celková hmotnost střech. U věže A 3780 kg a věže B 2930 kg.



Obr.16 Střecha věže A [2]

2.2.3 Tíha schodiště

Schodiště je ukotveno na věži A, Hlavní nosné profily jsou UPE 220, jednotlivé stupně jsou tvořeny rošty s nosným páskem 40×3 mm. Zábradlí je totožné jako na lávce a plošinách. Celková hmotnost byla odhadnuta na 2154 kg. Tíhová síla byla rozložena na všech 16 styčniců věže A. [3]



Obr. 15 Schodiště na věži A [2]

2.2.4 Zatížení od větru

Posledním zatěžujícím prvkem je dynamický tlak větru. Dle mapy Českého hydrometeorologického ústavu na obr. 11 spadá rozhledna do oblasti III. Výchozí základní rychlost větru v této oblasti odpovídá hodnotě 27,5 m/s.

Základní rychlost větru je určena rovnicí

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} = 1 * 1 * 27,5 = 27,5 \frac{m}{s} \quad (43)$$

kde $c_{dir} = 1$, $c_{season} = 1$

Základní tlak větru podle rovnice

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 = \frac{1}{2} * 1,25 * 27,5^2 = 472,66 \frac{N}{m^2} \quad (44)$$

kde $\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$

Střední rychlost větru a s ní spojené součinitelé drsnosti terénu a ortografie jsou závislé na výškové hladině. Výpočet byl proveden podle rovnic (37, 38, 40, 41). Výsledky jsou shrnuty v tab. 5.

Hladina	[m]	$c_r(z)$	$v_m(z)$	$I_v(z)$	q_p
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2	0,39	10,73	0,52	333,57
3	3	0,48	13,20	0,43	436,69
4	4	0,54	14,85	0,39	514,09
5	6	0,63	17,33	0,33	620,95
6	6,6	0,65	17,88	0,32	647,02
7	6,8	0,66	18,15	0,32	667,08

Tab. 5 Hodnoty maximálního dynamického tlaku vzduchu v závislosti na výšce nad povrchem

Síly, které odpovídají dynamickému tlaku, jsou vypočítány z rovnice

$$F_{v\acute{it}r} = q_p * S \quad (45)$$

Kde S je plocha prutu, na který působí vítr a je vypočítaná analogicky jako u tíhového zatížení, tzn. ke každému styčníku je přiřazena polovina plochy všech prutů, které jsou do něj navázány. Významnou roli zde bude hrát i plocha schodiště, zábradlí a střeš na obou věžích. V tab. 6 je možné si všimnout, že ke styčnickům věže A je přiřazena větší plocha než na věži B. To je způsobeno právě zahrnutím plochy schodiště.

Vypočtené síly působící na návětrnou stranu prutové konstrukce vlivem působícího větru jsou shrnuty v tab. 6.

Styčník	Plocha [m ²]	Fvítř [N]	Styčník	Plocha [m ²]	Fvítř [N]	Styčník	Plocha [m ²]	Fvítř [N]
SM5	1,41	615	SL4	0,32	207	SN17	2,53	1687
SM6	1,88	820	SL6	0,32	213	SN18	2,32	1547
SM9	1,64	1018	SL8	0,30	194	SN13	0,45	280
SM10	1,34	832	SL10	0,30	200	SN14	0,58	358
SM13	3,12	2081	SL12	0,32	207	SN9	0,71	362
SM14	3,35	2234	SL14	0,32	213	SN10	0,44	224
SM18	1,11	740	SL16	0,30	194	SN5	0,44	145
SM20	1,26	815	SN22	0,39	260	SN6	0,71	235
SL2	0,41	273	SN24	0,46	297			

Tab. 6 Hodnoty sil od dynamického tlaku větru

2.3 Sestavení rovnic rovnováhy

V případě prutových soustav se jedná o centrální silovou soustavu. Pro každý styč-
ník je tak nutné předepsat 3 silové rovnice pro směry x, y, z . Nejprve je potřeba promít-
nout složky diagonálních prutů do směru souřadnicových os. Příslušné úhly jsou v tab. 2.
Jako příklad uvedeme rovnice zátěžného stavu 1 pro věž A. Zbylé rovnice jsou v příloze
1.

Styčník SM1

$$\begin{aligned} r1 &:= M1 + M9 \cdot \cos\varphi + Fdx = 0 \\ r2 &:= M5 + M9 \cdot \sin\varphi - FgM1 - FgSCH + Fdy = 0 \\ r3 &:= M4 = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

Styčník SM2

$$\begin{aligned} r4 &:= -M1 - M25 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \\ r5 &:= M6 + M10 \cdot \sin\varphi + Fay - FgM2 - FgSCH = 0 \\ r6 &:= M25 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + M2 + M10 \cdot \cos\varphi = 0 \end{aligned} \quad (47)$$

Styčník SM3

$$\begin{aligned} r7 &:= -M3 - M11 \cdot \cos\varphi = 0 \\ r8 &:= M7 + M11 \cdot \sin\varphi - FgM3 - FgSCH + Ffy = 0 \\ r9 &:= -M2 = 0 \end{aligned} \quad (48)$$

Styčník SM4

$$\begin{aligned} r10 &:= M3 + M25 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0 \\ r11 &:= M8 + M12 \cdot \sin\varphi - FgM4 - FgSCH + Fey = 0 \\ r12 &:= -M4 - M12 \cdot \cos\varphi - M25 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - Fez = 0 \end{aligned} \quad (49)$$

Styčník SM5

$$\begin{aligned} r13 &:= M13 = 0 \\ r14 &:= -M5 - M12 \cdot \sin\varphi + M17 + M24 \cdot \sin\varphi - FgM5 - FgSCH = 0 \\ r15 &:= M16 + M12 \cdot \cos\varphi + M24 \cdot \cos\varphi = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Styčník SM6

$$\begin{aligned} r16 &:= -M13 - M9 \cdot \cos\varphi - M21 \cdot \cos\varphi = 0 \\ r17 &:= -M6 - M9 \cdot \sin\varphi + M18 + M21 \cdot \sin\varphi - FgM6 - FgSCH = 0 \\ r18 &:= M14 = 0 \end{aligned} \quad (51)$$

Styčník SM7

$$\begin{aligned} r19 &:= -M15 = 0 \\ r20 &:= -M7 - M10 \cdot \sin\varphi + M19 + M22 \cdot \sin\varphi - FgM7 - FgSCH = 0 \end{aligned} \quad (52)$$

$$r21 := -M14 - M10 \cdot \cos\varphi - M22 \cdot \cos\varphi = 0$$

Styčnick SM8

$$\begin{aligned} r22 &:= M15 + M11 \cdot \cos\varphi + M23 \cdot \cos\varphi = 0 \\ r23 &:= -M8 - M11 \cdot \sin\varphi + M20 + M23 \cdot \sin\varphi - FgM8 - FgSCH = 0 \\ r24 &:= -M16 = 0 \end{aligned} \quad (53)$$

Styčnick SM9

$$\begin{aligned} ra1 &:= M21 \cdot \cos\varphi + A1 + A9 \cdot \cos\theta = 0 \\ ra2 &:= -M17 - M21 \cdot \sin\varphi + A8 + A9 \cdot \sin\theta - FgM9 - FgSCH = 0 \\ ra3 &:= A4 = 0 \end{aligned} \quad (54)$$

Styčnick SM10

$$\begin{aligned} ra4 &:= -A1 + A20 \cdot \cos\lambda \cdot \sin\zeta = 0 \\ ra5 &:= -M18 - M22 \cdot \sin\varphi + A5 + A20 \cdot \sin\lambda - FgM10 - FgSCH = 0 \\ ra6 &:= A2 + A20 \cdot \cos\lambda \cdot \cos\zeta + M22 \cdot \cos\varphi = 0 \end{aligned} \quad (55)$$

Styčnick SM11

$$\begin{aligned} ra7 &:= -M23 \cdot \cos\varphi - A3 - A11 \cdot \cos\theta + A21 \cdot \cos\lambda \cdot \sin\zeta + A10 \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\eta = 0 \\ ra8 &:= -M19 - M23 \cdot \sin\varphi + A6 + A11 \cdot \sin\theta + A21 \cdot \sin\lambda + A10 \cdot \sin\vartheta - FgM11 - FgSCH = 0 \\ ra9 &:= -A2 - A21 \cdot \cos\lambda \cdot \cos\zeta - A10 \cdot \cos\vartheta \cdot \cos\eta = 0 \end{aligned} \quad (56)$$

Styčnick SM12

$$\begin{aligned} ra10 &:= A3 = 0 \\ ra11 &:= -M20 - M24 \cdot \sin\varphi + A7 + A12 \cdot \sin\theta - FgM12 - FgSCH = 0 \\ ra12 &:= -M24 \cdot \cos\varphi - A4 - A12 \cdot \cos\theta = 0 \end{aligned} \quad (57)$$

Styčnick SM13

$$\begin{aligned} ra19 &:= A13 + \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} = 0 \\ ra20 &:= -A8 - A12 \cdot \sin\theta - FgSA - FgM13 - FgSCH = 0 \\ ra21 &:= -A16 - \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} - A12 \cdot \cos\theta = 0 \end{aligned} \quad (58)$$

Styčnick SM14

$$\begin{aligned} ra22 &:= -A13 - A9 \cdot \cos\theta + A18 \cdot \sin\zeta + A22 \cdot \sin\eta + A28 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta = 0 \\ ra23 &:= -A5 - A9 \cdot \sin\theta - A28 \cdot \sin\tau - FgSA - FgM14 - FgSCH = 0 \\ ra24 &:= A14 + A18 \cdot \cos\zeta + A22 \cdot \cos\eta + A28 \cdot \cos\zeta \cdot \cos\tau = 0 \end{aligned} \quad (59)$$

Styčník SM15

$$\begin{aligned}ra13 &:= -A15 - \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} + A19 \cdot \sin\zeta + A29 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta = 0 \\ra14 &:= -A6 - A29 \cdot \sin\tau - FgSA - FgM15 - FgSCH = 0 \\ra15 &:= -A14 - \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} - A19 \cdot \cos\zeta - A29 \cdot \cos\tau \cdot \cos\zeta = 0\end{aligned}\tag{60}$$

Styčník SM16

$$\begin{aligned}ra16 &:= A15 + A11 \cdot \cos\theta = 0 \\ra17 &:= -A7 - A11 \cdot \sin\theta - FgSA - FgM16 - FgSCH = 0 \\ra18 &:= -A16 = 0\end{aligned}\tag{61}$$

Styčník SM17

$$\begin{aligned}ra25 &:= -A19 \cdot \sin\zeta - A22 \cdot \sin\eta + L1 + L5 \cdot \cos\phi + L7 \cdot \cos\sigma = 0 \\ra26 &:= -A25 - L5 \cdot \sin\phi - FgM17 = 0 \\ra27 &:= -A23 + A19 \cdot \cos\zeta - A22 \cdot \cos\eta - L7 \cdot \sin\sigma = 0\end{aligned}\tag{62}$$

Styčník SM18

$$\begin{aligned}ra28 &:= -A18 \cdot \sin\zeta + L2 = 0 \\ra29 &:= -A26 - FgM18 = 0 \\ra30 &:= A23 - A18 \cdot \cos\zeta = 0\end{aligned}\tag{63}$$

Styčník SM19

$$\begin{aligned}ra31 &:= -A21 \cdot \cos\lambda \cdot \sin\zeta - A29 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta + L3 = 0 \\ra32 &:= A25 + A29 \cdot \sin\tau - A21 \cdot \sin\lambda - FgM19 = 0 \\ra33 &:= -A24 + A29 \cdot \cos\tau \cdot \cos\zeta + A21 \cdot \cos\lambda \cdot \cos\zeta = 0\end{aligned}\tag{64}$$

Styčník SM20

$$\begin{aligned}ra34 &:= -A10 \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\eta - A28 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta - A20 \cdot \cos\lambda \cdot \sin\zeta + L8 \\&\quad \cdot \cos\sigma + L6 \cdot \cos\phi + L4 = 0 \\ra35 &:= A26 + A28 \cdot \sin\tau - A10 \cdot \sin\vartheta - A20 \cdot \sin\lambda + L6 \cdot \sin\phi \\&\quad - FgM20 = 0 \\ra36 &:= A24 + A10 \cdot \cos\vartheta \cdot \cos\eta - A28 \cdot \cos\tau \cdot \cos\zeta - A20 \cdot \cos\lambda \cdot \cos\zeta \\&\quad + L8 \cdot \sin\sigma = 0\end{aligned}\tag{65}$$

Rovnice pro stav 3 se liší pouze ve styčnicích SM14, SM15, SN17, SN20, do kterých jsou navázána táhla.

Styčník SM14 (pro stav Z3)

$$ra22 := -A13 - A9 \cdot \cos\theta + A18 \cdot \sin\zeta + A22 \cdot \sin\eta + A28 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta + Nlano1 \cdot \sin\Psi \cdot \cos X = 0 \quad (66)$$

$$ra23 := -A5 - A9 \cdot \sin\theta - A28 \cdot \sin\tau - FgSA - FgM14 - FgSCH - Nlano1 \cdot \cos\Psi = 0$$

$$ra24 := A14 + A18 \cdot \cos\zeta + A22 \cdot \cos\eta + A28 \cdot \cos\zeta \cdot \cos\tau - Nlano1 \cdot \sin X \cdot \sin\Psi = 0$$

Styčnick SM15 (pro stav Z3)

$$ra14 := -A6 - A29 \cdot \sin\tau - FgSA - FgM15 - FgSCH - Nlano3 \cdot \cos\Psi = 0 \quad (67)$$

$$ra13 := -A15 - \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} + A19 \cdot \sin\zeta + A29 \cdot \cos\tau \cdot \sin\zeta + Nlano3 \cdot \sin\Psi \cdot \cos X = 0$$

$$ra15 := -A14 - \frac{A17 \cdot \sqrt{2}}{2} - A19 \cdot \cos\zeta - A29 \cdot \cos\tau \cdot \cos\zeta + Nlano3 \cdot \sin\Psi \cdot \sin X = 0$$

Výpočet soustavy 174 rovnic je proveden v Maplu příkazem:

$$\begin{aligned} solve &:= ([rovnice], [Neznámé parametry]) \\ solve &:= ([ra1, ra2, ra3 \dots], [M1, M2, M3 \dots]) \end{aligned} \quad (68)$$

2.4 Zátěžný stav 1

Při zátěžném stavu 1 bylo zamezeno posuvům ve směru y ve všech styčnicích. Na věži A jsou přidány rovněž vazby ve směrech x, z . U věže B je umožněn posuv ve směru z . Částečné uvolnění je na obr. 18.

2.4.1 Statický rozbor

Vnější statický rozbor

Počet použitelných statických podmínek pro 3D soustavu je 6. Silové rovnice x, y, z , momentové rovnice M_x, M_y, M_z

$$\nu = 6 \quad (69)$$

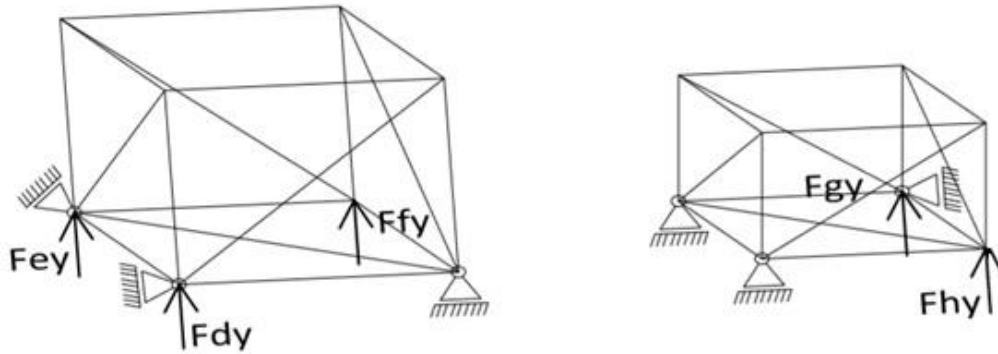
Počet neznámých parametrů vnějších stykových sil při zátěžném stavu 1 je 11. Jsou to vazby $F_{ay}, F_{by}, F_{cy}, F_{dx}, F_{ez}, F_{gx}, F_{dy}, F_{ey}, F_{fy}, F_{gy}, F_{hy}$.

$$\mu_{A1} = 11 \quad (70)$$

Při porovnání počtu použitelných rovnic a neznámých parametrů jasně vyplývá vnější statická neurčitost.

$$\mu_{A1} - \nu = 5 \quad (71)$$

V takovém případě bude nutné provést částečné uvolnění a předepsat 5 deformačních podmínek.



Obr. 18 Částečné uvolnění Z1

$$\frac{\partial W}{\partial Fdy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fey} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Ffy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fhy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fgy} = 0 \quad (72)$$

Vnitřní statický rozbor

Pro prutovou soustavu ve 3D se určí vnitřní statická určitost ze vztahu

$$s = p - (3k - 6) \quad (73)$$

Model obsahuje 174 prutů a 60 styčníků.

$$s = 174 - (3 * 60 - 6) = 0 \quad (74)$$

Soustava je vnitřně staticky určitá. Počet rovnic odpovídá počtu neznámých a není nutné do soustavy přidávat další pruty.

V případě prvního zátěžného stavu Maple vyjádří síly v prutech na neznámých Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy . Pro příklad je uvedena rovnice prutu M1. Zbylé rovnice jsou v příloze 2.

$$M1 = 0,0317 * Fdopl n + 0,0987 * Fdy - 0,260 * Fey - 0,125 * Ffy + 0,0106 * Fgy + 0,0154 * Fhy + 7438,190 \quad (75)$$

V rovnicích vystupuje další neznámá, a to síla $Fdopl n$. Tato síla bude potřeba v další fázi při výpočtu posuvů. Dále je nutné vyjádřit parciální derivace vyjádřených rovnic na silách Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy .

2.4.2 Sestavení deformačních podmínek

$$\begin{aligned}
 DP1 = \frac{\partial W}{\partial Fdy} &= \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fdy} \\
 &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fdy} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{76}$$

$$\begin{aligned}
 DP2 = \frac{\partial W}{\partial Fey} &= \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fey} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fey} \\
 &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fey} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fey} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fey} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{77}$$

$$\begin{aligned}
 DP3 = \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Ffy} &+ \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Ffy} \\
 &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Ffy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Ffy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Ffy} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{78}$$

$$\begin{aligned}
 DP4 = \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fhy} &+ \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fhy} \\
 &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fhy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fhy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fhy} \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{79}$$

$$\begin{aligned}
 DP5 = \frac{\partial W}{\partial Fgy} &= \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fgy} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fgy} \\
 &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fgy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fgy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fgy} = 0
 \end{aligned} \tag{80}$$

Nová soustava 5 rovnic o 5 neznámých parametrech Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy je opět vyřešena v Maplu příkazem:

$$solve = ([DP1, DP2, DP3, DP4, DP5], [Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy])$$

Vyřešené síly $F_{dy}, F_{hy}, F_{gy}, F_{ey}, F_{fy}$ dosadíme do vyjádřených rovnic a dostaneme normálovou sílu v každém prutu. Výsledky jsou shrnuty v tab. 7.

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
A1	-22436,0	1636	3200	-13,7	B5	-17171,1	4021	800	-4,3
A2	6452,4	1636	3200	3,9	B6	-9918,1	4021	800	-2,5
A3	0,0	1636	3200	0,0	B7	-1930,8	4021	800	-0,5
A4	0,0	1636	3200	0,0	B8	-8727,6	4021	800	-2,2
A5	-18733,1	4021	800	-4,7	B9	24461,5	1636	2400	15,0
A6	-12944,7	4021	800	-3,2	B10	95,6	1636	2400	0,1
A7	-8240,4	4021	800	-2,0	B11	-24472,0	1636	2400	-15,0
A8	-14098,2	4021	800	-3,5	B12	111,9	816	2810	0,1
A9	23498,8	2512	3300	9,4	B13	0,0	1636	2260	0,0
A10	475,2	816	3200	0,6	B14	-90,0	1636	2260	-0,1
A11	-22723,5	2512	3300	-9,0	B15	22954,5	1636	2260	14,0
A12	-361,8	2512	3300	-0,1	B16	-90,0	1636	2260	-0,1
A13	-350,8	1636	3200	-0,2	B18	33342,2	2119	1550	15,7
A14	-7138,7	1636	3200	-4,4	B19	33409,8	2119	1550	15,8
A15	22034,9	1636	3200	13,5	B20	-24583,5	2119	1660	-11,6
A16	0,0	1636	3200	0,0	B21	-24831,8	2119	1660	-11,7
A17	496,1	2512	4520	0,2	B22	109,1	816	2740	0,1
A18	31949,8	2119	1620	15,1	B23	0,0	3983	2260	0,0
A19	33036,8	2119	1620	15,6	B24	0,0	3983	2260	0,0
A20	-24896,7	2119	1720	-11,7	B25	-592,7	1318	200	-0,4
A21	-25096,4	2119	1720	-11,8	B26	-6918,0	1318	200	-5,2
A22	466,2	816	3140	0,6	B28	-10516,9	2119	1560	-5,0
A23	9269,4	3983	2260	2,3	B29	-10351,6	2119	1560	-4,9
A24	-9654,5	3983	2260	-2,4	N1	-90,0	1636	2260	-0,1
A25	-6823,4	1318	200	-5,2	N2	0	1636	2260	0,0
A26	-598,4	1318	200	-0,5	N3	-90,0	1636	2260	-0,1
A28	-8795,1	2119	1630	-4,2	N4	0,0	1636	2260	0,0
A29	-9699,6	2119	1630	-4,6	N5	-29435,6	4021	2000	-7,3
B1	-23124,6	1636	2260	-14,1	N6	-5801,8	4021	2000	-1,4
B2	0,0	1636	2260	0,0	N7	-5139,9	4021	2000	-1,3
B3	0,0	1636	2260	0,0	N8	-29944,8	4021	2000	-7,4
B4	0,0	1636	2260	0,0	N9	120,3	1636	3020	0,1

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
N10	-120,3	1636	3020	-0,1	M4	0	1636	3200	0,0
N11	120,3	1636	3020	0,1	M5	-14380	4021	3000	-3,6
N12	-120,3	1636	3020	-0,1	M6	-35131	4021	3000	-8,7
N13	0,0	1636	2260	0,0	M7	-33336	4021	3000	-8,3
N14	0,0	1636	2260	0,0	M8	-16221	4021	3000	-4,0
N15	0,0	1636	2260	0,0	M9	469	2512	4390	0,2
N16	0,0	1636	2260	0,0	M10	-469	2512	4390	-0,2
N17	127,3	1636	3190	0,1	M11	469	2512	4390	0,2
N18	127,3	1636	3190	0,1	M12	-469	2512	4390	-0,2
N19	-28306,7	4021	2000	-7,0	M13	0	1636	3200	0,0
N20	-4354,3	4021	2000	-1,1	M14	0	1636	3200	0,0
N21	-4011,1	4021	2000	-1,0	M15	0	1636	3200	0,0
N22	-28497,4	4021	2000	-7,1	M16	0	1636	3200	0,0
N23	-120,3	1636	3020	-0,1	M17	-11331	4021	3000	-2,8
N24	120,3	1636	3020	0,1	M18	-30799	4021	3000	-7,7
N25	-120,3	1636	3020	-0,1	M19	-30288	4021	3000	-7,5
N26	120,3	1636	3020	0,1	M20	-11889	4021	3000	-3,0
N27	0,0	1636	2260	0,0	M21	-469	2512	4390	-0,2
N28	0,0	1636	2260	0,0	M22	469	2512	4390	0,2
N29	0,0	1636	2260	0,0	M23	-469	2512	4390	-0,2
N30	0,0	1636	2260	0,0	M24	469	2512	4390	0,2
N31	-27177,9	4021	2000	-6,8	M25	483,87	2512	4525	0,2
N32	-2906,9	4021	2000	-0,7	L1	-14562	1921	1550	-7,6
N33	-2882,2	4021	2000	-0,7	L2	30557	1921	1550	15,9
N34	-27049,9	4021	2000	-6,7	L3	-31817	1921	1550	-16,6
N35	120,3	1636	3020	0,1	L4	15546	1921	1550	8,1
N36	-120,3	1636	3020	-0,1	L5	46821	816	1560	57,3
N37	120,3	1636	3020	0,1	L6	-46428	816	1560	-56,8
N38	-120,3	1636	3020	-0,1	L7	-102,11	816	2740	-0,1
M1	-350,8	1636	3200	-0,2	L8	-102,11	816	2740	-0,1
M2	0,0	1636	3200	0,0	L9	0	816	2260	0,0
M3	-350,8	1636	3200	-0,2	L10	0	816	2260	0,0

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
L11	-2430,6	1318	200	-1,8	L34	0,0	816	2260	0,0
L12	312,2	1318	200	0,2	L35	-2430,6	1318	200	-1,8
L13	-14545,0	1921	1550	-7,6	L36	312,2	1318	200	0,2
L14	-38297,3	1921	1550	-19,9	L37	-37286,3	1921	1550	-19,4
L15	37586,9	1921	1550	19,6	L38	-13793,9	1921	1550	-7,2
L16	15535,2	1921	1550	8,1	L39	13643,3	1921	1550	7,1
L17	-23243,4	816	1560	-28,5	L40	37716,8	1921	1550	19,6
L18	22856,1	816	1560	28,0	L41	23742,8	816	1560	29,1
L19	101,8	816	2740	0,1	L42	-24130,1	816	1560	-29,6
L20	101,8	816	2740	0,1	L43	101,8	816	2740	0,1
L21	0,0	816	2260	0,0	L44	101,8	816	2740	0,1
L22	0,0	816	2260	0,0	L45	0,0	816	2260	0,0
L23	312,2	1318	200	0,2	L46	0,0	816	2260	0,0
L24	-2430,6	1318	200	-1,8	L47	312,2	1318	200	0,2
L25	-37286,3	1921	1550	-19,4	L48	-2430,6	1318	200	-1,8
L26	-38297,3	1921	1550	-19,9	L49	33342,2	1921	1550	17,4
L27	37586,9	1921	1550	19,6	L50	-13793,9	1921	1550	-7,2
L28	37716,8	1921	1550	19,6	L51	13643,3	1921	1550	7,1
L29	-249,7	816	1560	-0,3	L52	-33471,5	1921	1550	-17,4
L30	637,0	816	1560	0,8	L53	-47235,9	816	1560	-57,9
L31	-101,8	816	2740	-0,1	L54	47623,1	816	1560	58,4
L32	-101,8	816	2740	-0,1	L55	-101,8	816	2740	-0,1
L33	0,0	816	2260	0,0	L56	-101,8	816	2740	-0,1

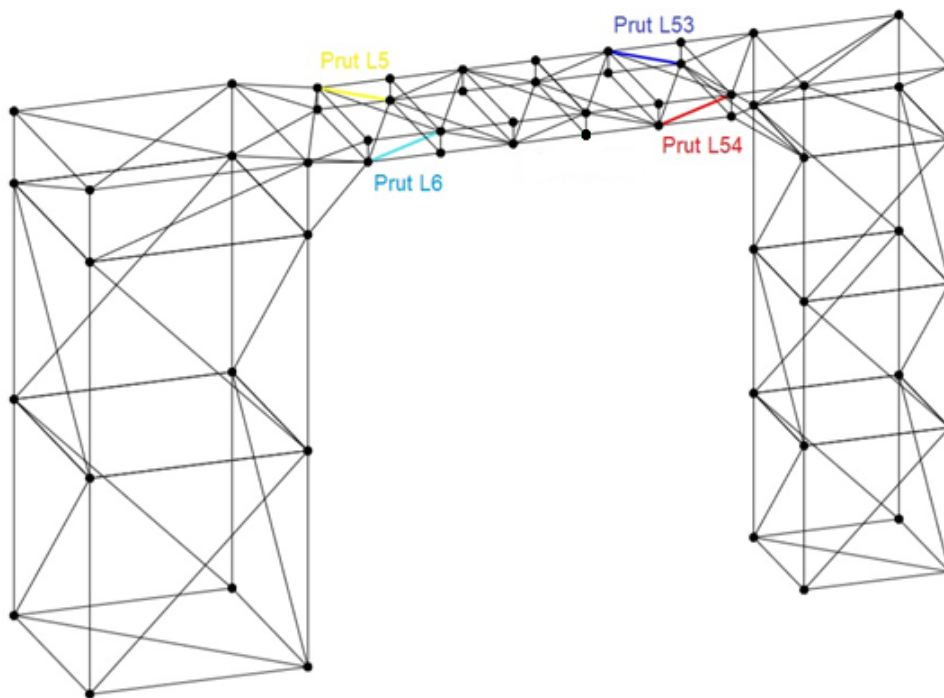
Tab. 7 Výsledky zátěžného stavu I

2.4.3 Vyhodnocení mezního stavu pružnosti

Při výpočtu bezpečnosti k MSP se porovnává největší tahové a tlakové napětí z tab. 7 s materiálovou charakteristikou R_e . Mez kluzu oceli 11 353, ze které se vyrábějí bezešvé ocelové trubky použité na rozhledně, je 230 MPa. Potenciálně nejnebezpečnější pruty jsou v tab. 7 vyznačeny a zobrazeny také na obr. 19.

$$K_k^{TLAK} = \frac{R_e}{|\sigma_{L53}|} = \frac{230}{57,9} = 3,97 \quad (81)$$

$$K_k^{TAH} = \frac{R_e}{\sigma_{L54}} = \frac{230}{58,4} = 3,94 \quad (82)$$



Obr. 19 Nekritičtější místa MSP při Z1

2.4.4 Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability

Během vyhodnocování MSVS se porovnává kritická síla, při které dochází k rozdělení rovnováhy, s normálovou silou v prutu. Nejprve se určí kritická štíhlost λ_k . Za α se dosadí podle tab. 1 hodnota π .

$$\lambda_k = \alpha * \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} = \pi * \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{230}} = 94,9 \quad (83)$$

V dalším kroku se určí štíhlost λ u každého prutu pomocí rovnice (29) Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5.2., pracujeme pouze s pruty, u kterých nastane dříve MSVS než MSP. Tato skutečnost bude ověřena podmínkou $\lambda > \lambda_k$.

V posledním kroku je třeba určit kritickou hodnotu síly F_v ze vztahu (31). Ukázkový výpočet je proveden na prutu A1.

$$F_v = \frac{\pi^2 * E * J}{l^2} = \frac{\pi^2 * 210000 * 1407440,3}{3200^2} = 284582,78 \text{ N} \quad (84)$$

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Osový kvadratický moment	$\lambda_{K=94,9}$	Fv	k_v MSVS
	[N]	[mm ²]	[mm]	[mm ⁴]	λ	[N]	
A1	-22436,0	1636	3200	1407440	109,1	284582,8	12,68
A13	-350,8	1636	3200	1407440	109,1	284582,8	811,224
A14	-7138,7	1636	3200	1407440	109,1	284582,8	39,86
N10	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
N12	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
N23	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
N25	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
N36	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
N38	-120,3	1636	3020	1407440	103,0	319517,5	2656,62
M1	-350,8	1636	3200	1407440	109,1	284582,8	811,14
M3	-350,8	1636	3200	1407440	109,1	284582,8	811,14
M10	-481,3	2513	4390	3161699	123,8	339680,1	705,74
M12	-481,3	2513	4390	3161699	123,8	339680,1	705,74
M21	-481,3	2513	4390	3161699	123,8	339680,1	705,74
M23	-481,3	2513	4390	3161699	123,8	339680,1	705,74
L7	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5
L8	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5
L31	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5
L32	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5
L55	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5
L56	-101,8	814	2740	278636	148,3	76844,8	754,5

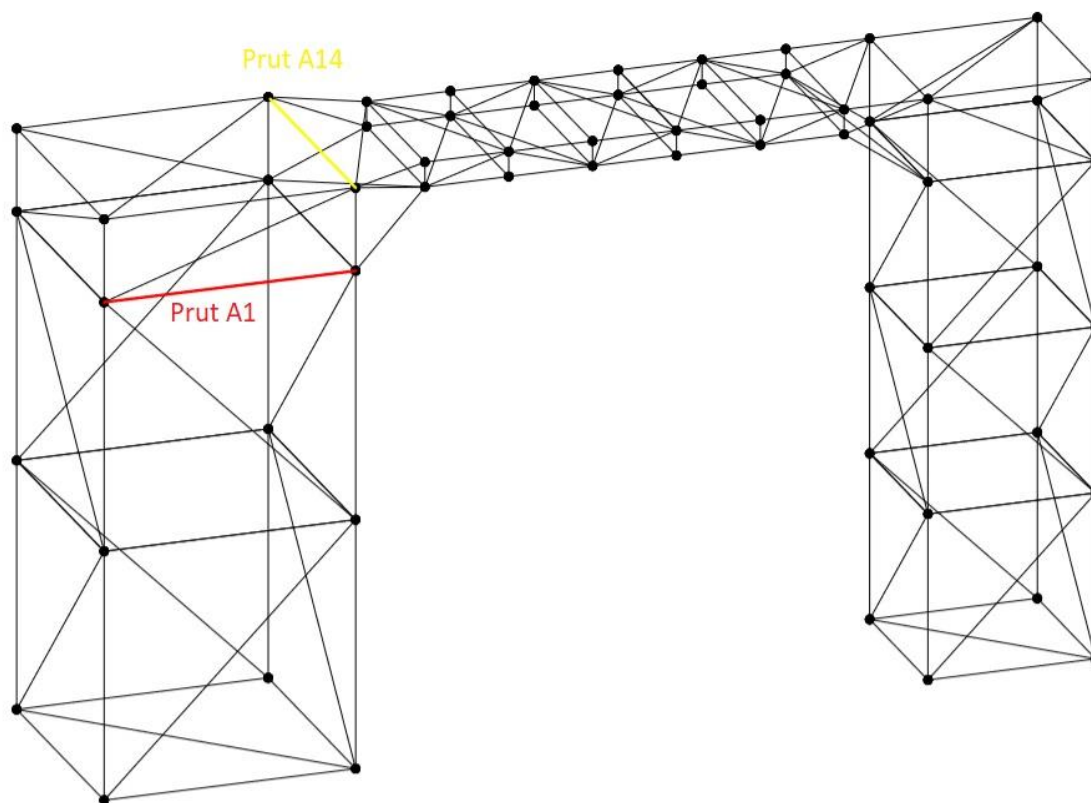
Tab. 8 Výsledky zátěžného stavu I pro MSVS

Při výpočtu bezpečnosti k MSVS se porovná vypočtená hodnota kritické síly Fv s normálovou silou v prutu.

$$K_v = \frac{Fv}{F} = \frac{284582,78}{|-22436,0|} = 12,68 \quad (85)$$

Nejkritičtější místa konstrukce z hlediska vzpěrné stability jsou na obr 20.

Poznámka: Podobný stav nastal i na věži B, ale jelikož jsou zde pruty kratší, jejich štíhlost nepřekročila kritickou, a tudíž se u nich MSVS neřešil. Nejmenší bezpečnost k MSVS vyšla opět u prutů L53 znázorněného na obr. 19. MSP je však pro tento prut nebezpečnější. Všechny výsledky jsou v příloze 5.



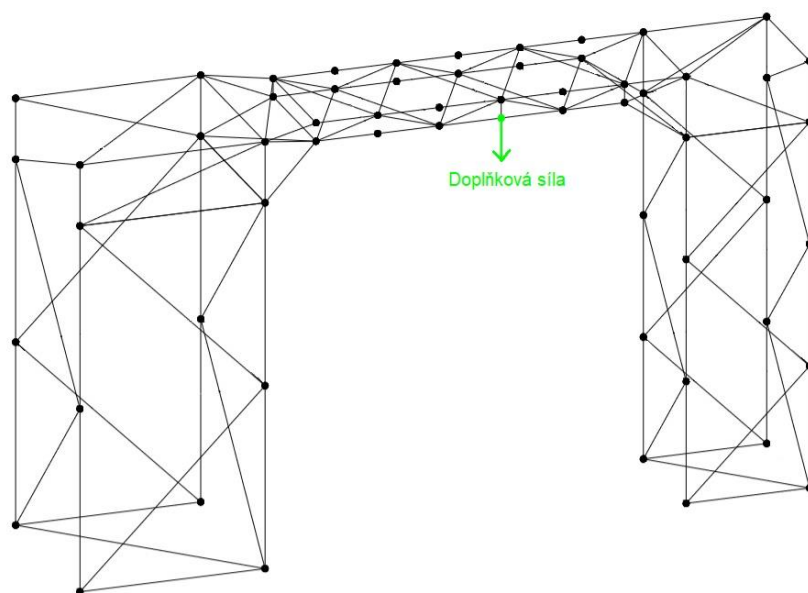
Obr. 20 Nejkritičtější místa MSVS při Z1

2.4.5 Deformace vybraného místa prutové soustavy

Místo největší deformace ve směru y předpokládáme uprostřed lávky. Do styčnicku SL12 se zavede doplňková síla a vyjádří se příslušné parciální derivace. Na obr. 21 jsou znázorněny pruty, u kterých vyšla parciální derivace podle doplňkové síly nenulová, a tudíž se podílejí na deformaci. Z numerického řešení bylo zjištěno, že největší průhyb lávky nastane ve styčnicku SL6. Hodnoty se lišily pouze v setinách mm.

K výpočtu posuvů se sestaví deformační rovnici.

$$\begin{aligned}
 v = & \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial F_{dopl}} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial F_{dopl}} & (86) \\
 & + \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial F_{dopl}} \\
 & + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial F_{dopl}} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial F_{dopl}} = 11,52 \text{ mm}
 \end{aligned}$$



Obr. 21 Pruty podílející se na deformaci styčnicku SL12

2.4.6 Zhodnocení

Při prvním zátěžném stavu, který je $5 \times$ staticky neurčitý, se do výpočtu zahrnula váha od samotné konstrukce, střech, schodiště, zábradlí a pochozího plechu. V tomto případě nenastane žádný z vyšetřovaných mezních stavů. Nejmenší bezpečnost vůči MSP bude u prutu L54, a to 3,94. Z prutů, pro které je kritický MSVS, bude nejmenší zjištěná bezpečnost na A1, a to 12,68. Za místo největší svislé deformace byl odhadnut styčník SL12, ve kterém byla vypočítána hodnota ve směru y 11,52 mm. Verifikace výsledku bude provedena v kapitole 3.4. Nyní bude přidána vazba ve směru z do věže B a vyhodnocen zátěžný stav 2.

2.5 Zátěžný stav 2

Oproti zátěžnému stavu 1 byla přidána obecná kinematická dvojice Fhz na věž B. Tímto se zamezilo deformaci modelu ve všech směrech. Částečné uvolnění je na obr. 22. Zatížení zůstává totožné jako při Z1.

2.5.1 Statický rozbor

Vnější statický rozbor

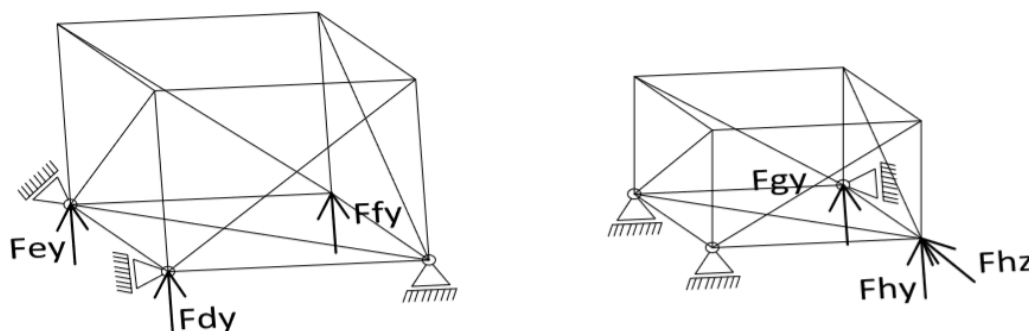
Počet neznámých parametrů vnějších stykových sil při zátěžném stavu 1 je 12. Jsou to vazby $Fay, Fby, Fcy, Fdx, Fez, Fhz, Fgx, Fdy, Fey, Ffy, Fgy, Fhy$.

$$\mu_{A1} = 12 \quad (87)$$

Při porovnání počtu použitelných rovnic a neznámých parametrů jasně vyplývá vnější statická neurčitost.

$$\mu_{A1} - \nu = 6 \quad (88)$$

V takovém případě bude nutné provést částečné uvolnění a předepsat 6 deformačních podmínek.



Obr. 22 Částečné uvolnění Z2

$$\frac{\partial W}{\partial Fdy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fey} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Ffy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fhy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fgy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fhz} = 0 \quad (89)$$

2.5.2 Sestavení deformačních podmínek

$$\begin{aligned} DP1 = \frac{\partial W}{\partial Fdy} &= \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fdy} \\ &+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fdy} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (90)$$

Analogicky jako v kapitole 2.5.2 DP2, DP3, DP4, DP5

$$\begin{aligned}
 DP6 = \frac{\partial W}{\partial Fhz} = & \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fhz} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fhz} \\
 & + \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fhz} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fhz} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fhz} \\
 = & 0
 \end{aligned}
 \tag{91}$$

Nová soustava 6 rovnic o 6 neznámých parametrech $Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy, Fhz$ je opět vyřešena v Maplu příkazem:

solve
 = ([DP1, DP2, DP3, DP4, DP5, DP6], [Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy, Fhz])

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
A1	-23738,8	1636	3200	-14,5	A23	8164,9	3983	2260	2,0
A2	5331,3	1636	3200	3,3	A24	-10220,9	3983	2260	-2,6
A3	0,0	1636	3200	0,0	A25	-6894,8	1318	200	-5,2
A4	0,0	1636	3200	0,0	A26	-598,4	1318	200	-0,5
A5	-17099,6	4021	800	-4,3	A28	-11409,4	2119	1630	-5,4
A6	-12781,8	4021	800	-3,2	A29	-11027,4	2119	1630	-5,2
A7	-8653,3	4021	800	-2,2	B1	-22417,4	1636	2260	-13,7
A8	-14082,8	4021	800	-3,5	B2	0,0	1636	2260	0,0
A9	18084,1	2512	3300	7,2	B3	0,0	1636	2260	0,0
A10	2004,3	816	3200	2,5	B4	0,0	1636	2260	0,0
A11	-21020,3	2512	3300	-8,4	B5	-16128,7	4021	800	-4,0
A12	-425,2	2512	3300	-0,2	B6	-10071,2	4021	800	-2,5
A13	-412,3	1636	3200	-0,3	B7	-3302,9	4021	800	-0,8
A14	-6718,0	1636	3200	-4,1	B8	-8264,5	4021	800	-2,1
A15	20383,3	1636	3200	12,5	B9	21706,5	1636	2400	13,3
A16	0,0	1636	3200	0,0	B10	554,8	1636	2400	0,3
A17	583,1	2512	4520	0,2	B11	-20355,6	1636	2400	-12,4
A18	28143,0	2119	1620	13,28	B12	2458,2	816	2810	3,0
A19	32694,5	2119	1620	15,43	B13	0,0	1636	2260	0,0
A20	-26342,4	2119	1720	-12,43	B14	-522,4	1636	2260	-0,3
A21	-25767,9	2119	1720	-12,16	B15	18645,7	1636	2260	11,4
A22	2119,7	816	3140	2,6	B16	-522,4	1636	2260	-0,3

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
B18	32325,8	2119	1550	15,26	N29	0,0	1636	2260	0,0
B19	32209,4	2119	1550	15,20	N30	0,0	1636	2260	0,0
B20	-27053,3	2119	1660	-12,77	N31	-24191,8	4021	2000	-6,0
B21	-25460,5	2119	1660	-12,02	N32	-5648,3	4021	2000	-1,4
B22	633,4	816	2740	0,8	N33	-3718,6	4021	2000	-0,9
B23	0,0	3983	2260	0,0	N34	-20636,2	4021	2000	-5,1
B24	0,0	3983	2260	0,0	N35	2641,9	1636	3020	1,6
B25	-592,7	1318	200	-0,4	N36	-698,1	1636	3020	-0,4
B26	-7021,1	1318	200	-5,3	N37	-8141,3	1636	3020	-5,0
B28	-14128,9	2119	1560	-6,7	N38	-2641,9	1636	3020	-1,6
B29	-11319,1	2119	1560	-5,3	M1	-1866,9	1636	3200	-1,1
N1	-1977,1	1636	2260	-1,2	M2	0,0	1636	3200	0,0
N2	0,0	1636	2260	0,0	M3	-1866,9	1636	3200	-1,1
N3	-1977,1	1636	2260	-1,2	M4	0,0	1636	3200	0,0
N4	0,0	1636	2260	0,0	M5	-21675,1	4021	3000	-5,4
N5	-19769,6	4021	2000	-4,9	M6	-23166,3	4021	3000	-5,8
N6	-12648,5	4021	2000	-3,1	M7	-28416,5	4021	3000	-7,1
N7	-16153,4	4021	2000	-4,0	M8	-19577,7	4021	3000	-4,9
N8	-15928,6	4021	2000	-4,0	M9	-8509,2	2512	4390	-3,4
N9	2641,9	1636	3020	1,6	M10	-2561,2	2512	4390	-1,0
N10	-698,1	1636	3020	-0,4	M11	2561,2	2512	4390	1,0
N11	-8141,3	1636	3020	-5,0	M12	-565,6	2512	4390	-0,2
N12	-2641,9	1636	3020	-1,6	M13	0,0	1636	3200	0,0
N13	0,0	1636	2260	0,0	M14	0,0	1636	3200	0,0
N14	0,0	1636	2260	0,0	M15	0,0	1636	3200	0,0
N15	0,0	1636	2260	0,0	M16	0,0	1636	3200	0,0
N16	0,0	1636	2260	0,0	M17	-18757,8	4021	3000	-4,7
N17	738,8	1636	3190	0,5	M18	-31105,9	4021	3000	-7,7
N18	2796,0	1636	3190	1,7	M19	-28226,6	4021	3000	-7,0
N19	-21980,7	4021	2000	-5,5	M20	-12386,9	4021	3000	-3,1
N20	-7861,1	4021	2000	-2,0	M21	8509,2	2512	4390	3,4
N21	-15789,9	4021	2000	-3,9	M22	2561,2	2512	4390	1,0
N22	-25423,6	4021	2000	-6,3	M23	-2561,2	2512	4390	-1,0
N23	-2641,9	1636	3020	-1,6	M24	565,6	2512	4390	0,2
N24	698,1	1636	3020	0,4	M25	2640,2	2512	4525	1,1
N25	8141,3	1636	3020	5,0	L1	-14357,3	1921	1550	-7,5
N26	2641,9	1636	3020	1,6	L2	26927,0	1921	1550	14,0
N27	0,0	1636	2260	0,0	L3	-33707,3	1921	1550	-17,5
N28	0,0	1636	2260	0,0	L4	12787,1	1921	1550	6,7

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[MPa]
L5	47293,0	816	1560	57,96	L31	-591,2	816	2740	-0,7
L6	-45544,3	816	1560	-55,81	L32	-2237,2	816	2740	-2,7
L7	-591,2	816	2740	-0,7	L33	0,0	816	2260	0,0
L8	-2237,2	816	2740	-2,7	L34	0,0	816	2260	0,0
L9	0,0	816	2260	0,0	L35	-2430,6	1318	200	-1,8
L10	0,0	816	2260	0,0	L36	312,2	1318	200	0,2
L11	-2430,6	1318	200	-1,8	L37	-37700,7	1921	1550	-19,6
L12	312,2	1318	200	0,2	L38	-15245,4	1921	1550	-7,9
L13	-14357,3	1921	1550	-7,5	L39	9589,1	1921	1550	5,0
L14	-40844,2	1921	1550	-21,3	L40	35568,5	1921	1550	18,5
L15	34625,9	1921	1550	18,0	L41	23186,2	816	1560	28,41
L16	12787,1	1921	1550	6,7	L42	-24934,9	816	1560	-30,56
L17	-23799,9	816	1560	-29,17	L43	591,2	816	2740	0,7
L18	22051,3	816	1560	27,02	L44	2237,2	816	2740	2,7
L19	591,2	816	2740	0,7	L45	0,0	816	2260	0,0
L20	2237,2	816	2740	2,7	L46	0,0	816	2260	0,0
L21	0,0	816	2260	0,0	L47	312,2	1318	200	0,2
L22	0,0	816	2260	0,0	L48	-2430,6	1318	200	-1,8
L23	312,2	1318	200	0,2	L49	32325,8	1921	1550	16,8
L24	-2430,6	1318	200	-1,8	L50	-15245,4	1921	1550	-7,9
L25	-37700,7	1921	1550	-19,63	L51	9589,1	1921	1550	5,0
L26	-40844,2	1921	1550	-21,26	L52	-35020,0	1921	1550	-18,2
L27	34625,9	1921	1550	18,02	L53	-46679,3	816	1560	-57,21
L28	35568,5	1921	1550	18,52	L54	48428,0	816	1560	59,35
L29	306,9	816	1560	0,4	L55	-591,2	816	2740	-0,7
L30	1441,8	816	1560	1,8	L56	-2237,2	816	2740	-2,7

Tab. 9 Výsledky zátěžného stavu 2

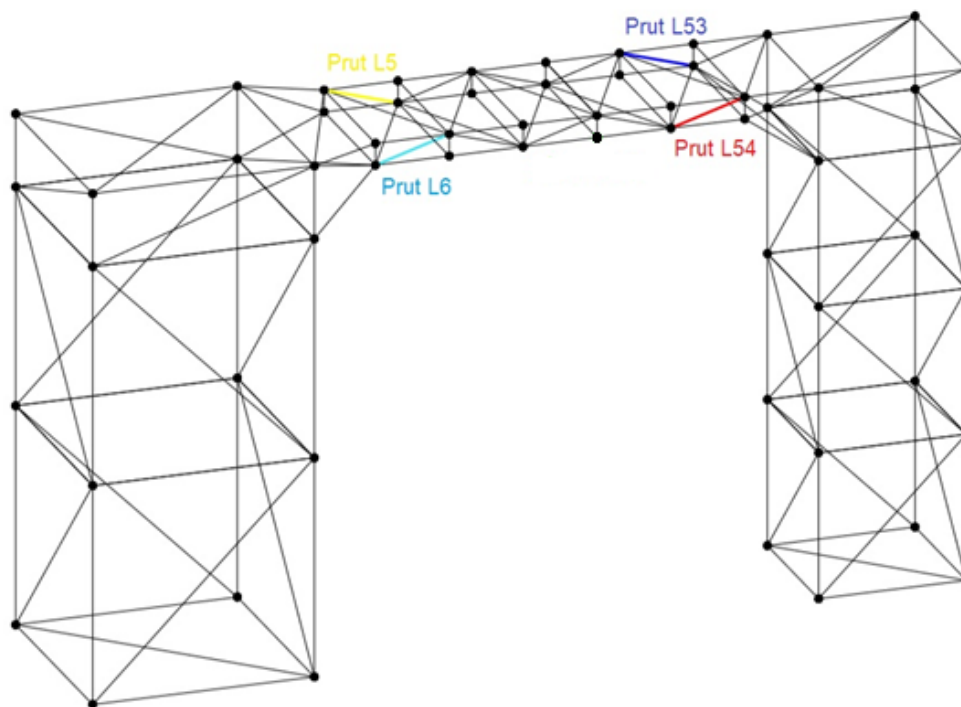
2.5.3 Vyhodnocení mezního stavu pružnosti

Stejně jako v kapitole 2.4.3 porovnáváme největší napětí s mezí kluzu R_e . Nejkritičtější místa jsou totožná jako v případě Z1. Jejich bezpečnost se ale výrazně nezměnila.

$$K_k^{TLAK} = \frac{R_e}{|\sigma_{L53}|} = \frac{230}{57,2} = 4,02 \quad (92)$$

$$K_k^{TAH} = \frac{R_e}{\sigma_{L54}} = \frac{230}{59,4} = 3,87 \quad (93)$$

Pruty vyznačené v tab. 9 jsou zobrazeny na obr. 23



Obr. 23 Nekritičtější místa MSP při Z2

2.5.4 Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability

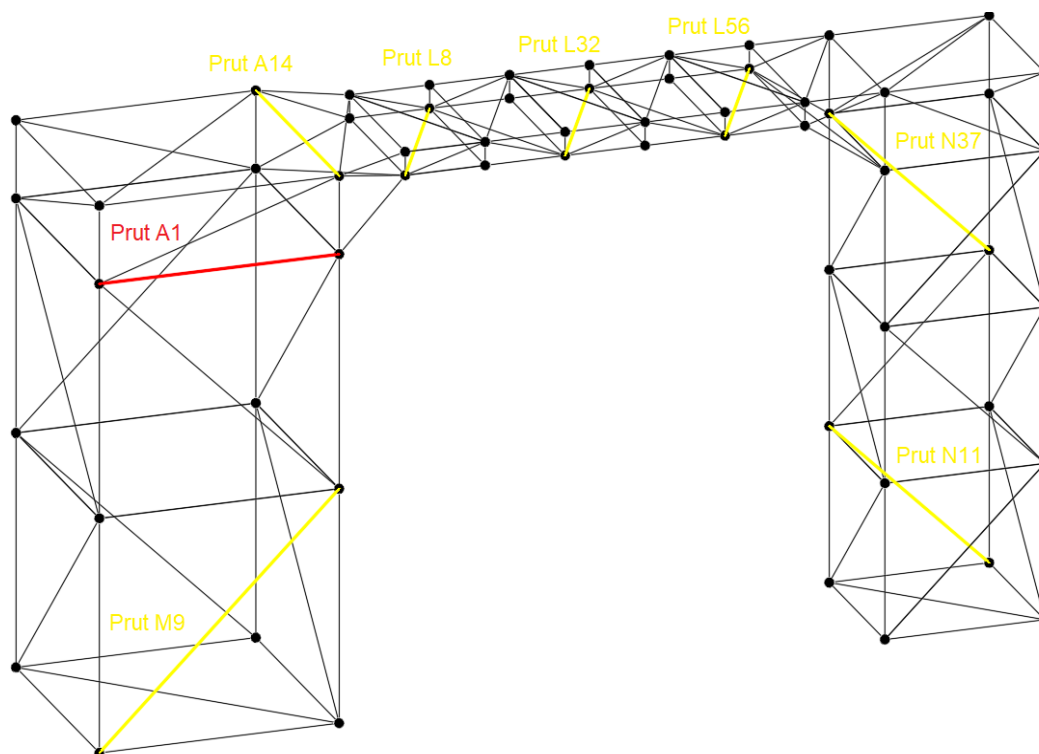
Výpočet proveden analogicky jako v kapitole 2.4.4. Oproti Z1 nám poklesla bezpečnost téměř u všech zkoumaných prutů. Nejvíce ovlivněné byly diagonály na věžích i na lávce.

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Osový kvadratický moment	$\lambda_k=94,9$	Fv	k_v MSVS
	[N]	[mm ²]		[mm ⁴]	λ		
A1	-23738,8	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	12,0
A13	-412,3	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	698,7
A14	-6718,0	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	42,1
N10	-698,1	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	440,9

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Osový kvadratický moment	$\lambda_k=94,9$	Fv	k_v MSVS
	[N]	[mm ²]	[mm]	[mm ⁴]	λ	[N]	
N11	-8141,3	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	39,2
N12	-2641,9	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	127,4
N23	-2641,9	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	127,4
N36	-698,1	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	440,9
N37	-8141,3	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	39,2
N38	-2641,9	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	127,4
M1	-1866,9	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	163,3
M3	-1866,9	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	163,3
M9	-8509,2	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	39,7
M10	-2561,2	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	142,2
M12	-565,6	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	608,4
M23	-2561,2	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	142,2
L7	-591,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	116,8
L8	-2237,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	33,7
L31	-591,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	116,8
L32	-2237,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	33,7
L55	-591,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	116,8
L56	-2237,2	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	33,7

Tab. 10 Výsledky zátěžného stavu 2 pro MSVS

Nejkritičtější místa MSVS při zátěžném stavu 2 jsou na obr. 24



Obr. 24 Nejkritičtější místa MSVS při Z2

2.5.5 Deformace vybraného místa prutové soustavy

Místo pro výpočet svislé deformace byl opět vybrán styčník SL12 zobrazen na obr. 23. Postup je totožný jako v kapitole 2.4.5.

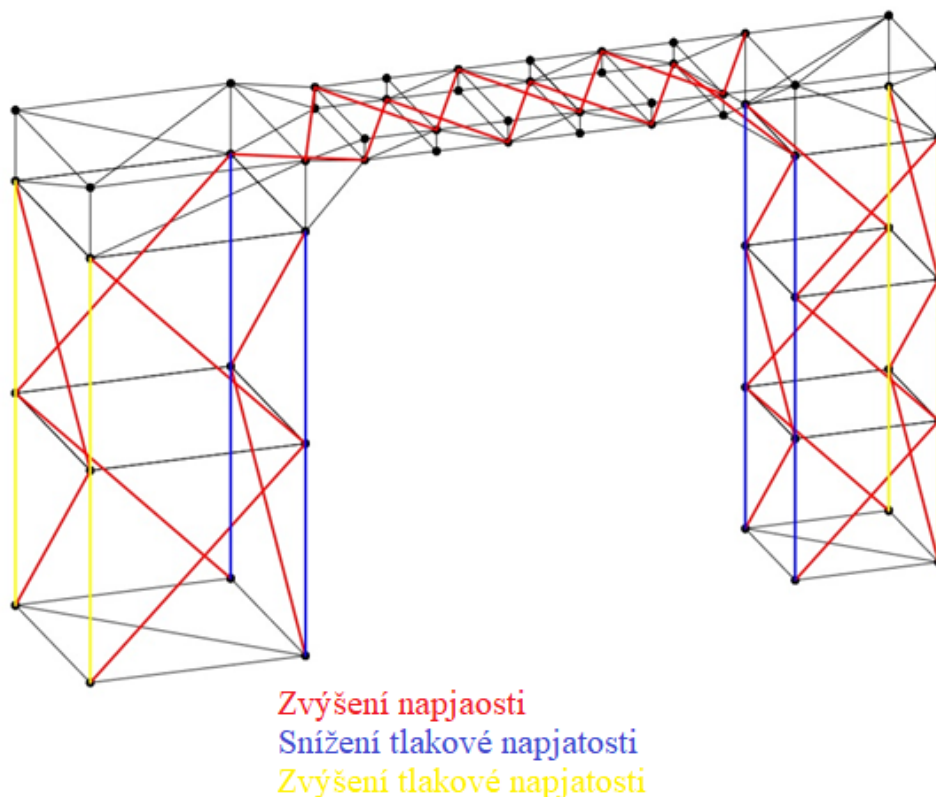
$$v = \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial F_{doplň}} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial F_{doplň}} \quad (94)$$

$$+ \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial F_{doplň}}$$

$$+ \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial F_{doplň}} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial F_{doplň}} = 11,27 \text{ mm}$$

2.5.6 Zhodnocení

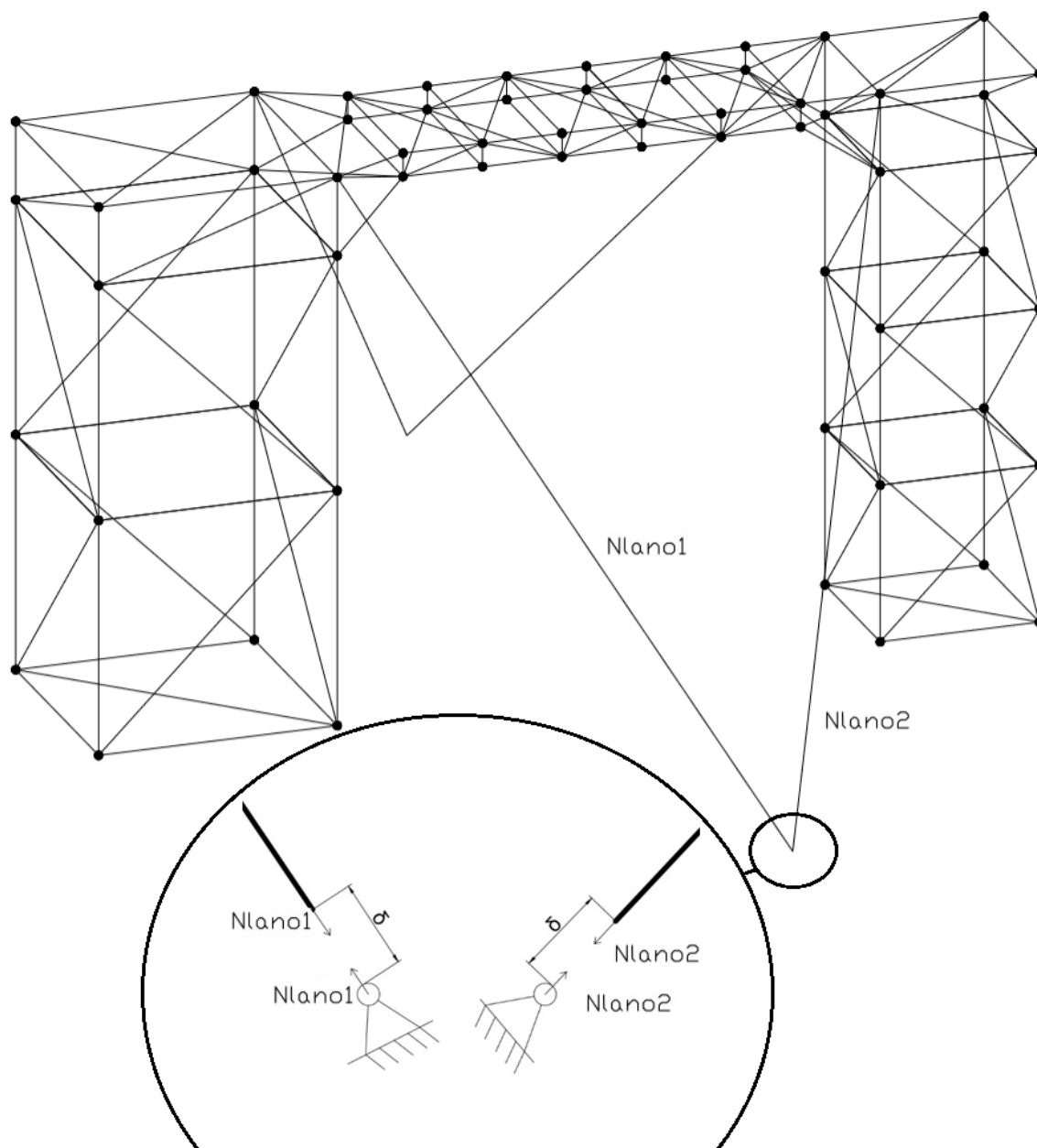
Při druhém zátěžném stavu byl oproti prvnímu navíc zamezen posuv věže B ve směru z. Silové zatížení zůstalo stejné. Ve všech diagonálních prutech (na obr. 25 zobrazeny červeně) se výrazně zvýšila napjatost. Jelikož diagonální pruty patří k těm nejdelším na soustavě, je možné tento efekt pozorovat při výpočtu MSVS v tab. 10, kde nám oproti tab. 8 výrazně poklesla bezpečnost u téměř všech prutů. U vertikálních prutů obou věží bylo dosaženo rovnoměrnějšího rozložení tlakového napětí mezi vnitřními (na obr. 25 modrou barvou) a vnějšími (na obr. 25 žlutou). Konkrétně se u vnitřních prutů tlak zmenšil, u vnějších naopak zvětšil. Přidáním podpory ve směru z nemělo podstatný vliv na svislou deformaci.



Obr. 25 Změna napjatosti mezi stavy Z1 a Z2

2.6 Zátěžný stav 3

Při druhém zátěžném stavu se opět nebude zvyšovat silové zatížení. Budeme vyšetřovat situaci, kdy celá konstrukce je pomocí 4 táhel ukotvena do základního tělesa. Jejich délka je 12 m a na každé straně končí ve stejném místě. Táhla jsou vyrobena z materiálu s mezí kluzu 460 MPa a modulem pružnosti 2,05 GPa. Postupným napínáním dojde k jejich tahovému předpětí. Ve výpočtu bude tato situace simulována předepsáním vůle δ do deformačních podmínek. Takto sestavená podmínka znamená, že táhla byla vyrobena o δ kratší. Předpokládáme zvýšení napjatosti v konstrukci oproti zátěžnému stavu 2.



Obr. 26 Model prutové soustavy při zátěžném stavu 3

Z výkresu technologického postupu napínání táhel projekční kanceláře Fevia bylo zjištěno, že předpětí na skutečné konstrukci se pohybuje v rozmezí 95–113 kN.

Na modelu čtvrtinové výšky je předpětí stanoveno na 25 kN, které odpovídá vůli $\delta = 2 \text{ mm}$. Tento údaj však není ničím podložený, a tak pro kontrolu provedeme výpočet zatížení rozhledny větrem a porovnáme deformace před a po upnutí. Nejprve však vyhodnotíme zátěžný stav 3.

2.6.1 Statický rozbor

Vnější statický rozbor

Při zátěžném stavu 2 je počet neznámých 16.

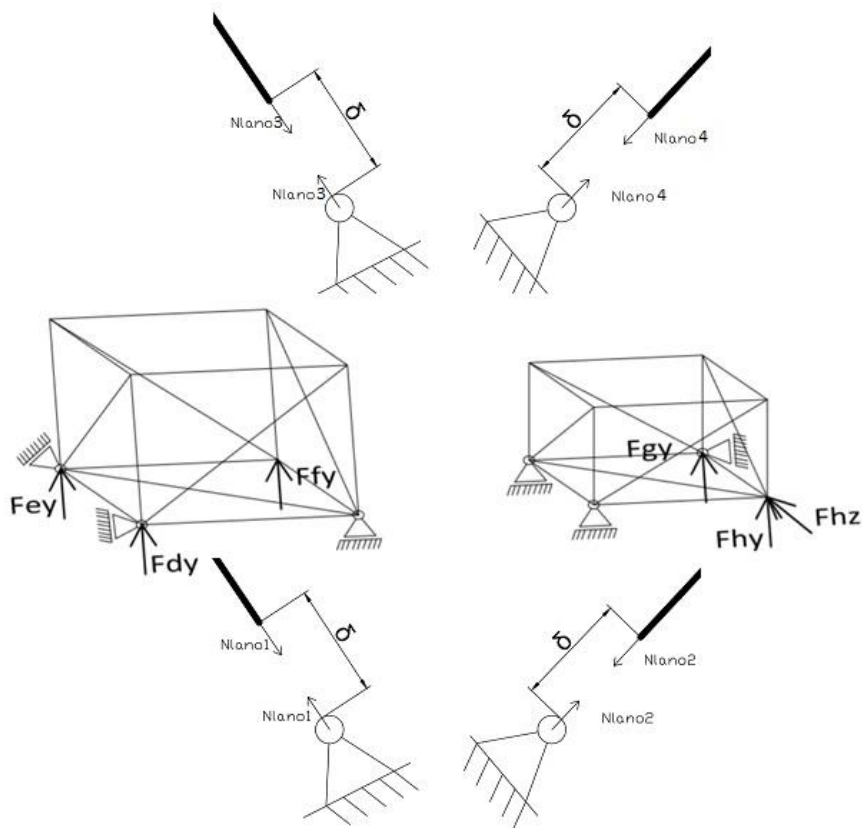
$F_{ay}, F_{by}, F_{cy}, F_{dx}, F_{ez}, F_{hz}, F_{gx}, F_{dy}, F_{ey}, F_{fy}, F_{gy}, F_{hy}, N_{lano1}, N_{lano2}, N_{lano3}, N_{lano4}$

$$\mu_{A2} = 16 \quad (95)$$

Při porovnání počtu použitelných rovnic a neznámých parametrů jasně vyplývá vnější statická neurčitost.

$$\mu_{A2} - \nu = 10 \quad (96)$$

V takovém případě je nutné provést částečné uvolnění a předepsat 10 deformačních podmínek.



Obr. 27 Částečné uvolnění Z3

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial Fdy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fey} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Ffy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fhy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fgy} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial Fhz} = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial Nlano1} = 2; \quad \frac{\partial W}{\partial Nlano2} = 2; \quad \frac{\partial W}{\partial Nlano3} = 2; \quad \frac{\partial W}{\partial Nlano4} = 2; \end{aligned} \quad (97)$$

2.6.2 Sestavení deformačních podmínek

$$\begin{aligned} DP1 = \frac{\partial W}{\partial Fdy} = \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Fdy} \\ + \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Fdy} + \sum_{i=1}^4 \frac{Nlano_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial Nlano_i}{\partial Fdy} \\ = 0 \end{aligned} \quad (98)$$

Analogicky jako v kapitole 2.6.2 pro DP2, DP3, DP4, DP5, DP6

$$\begin{aligned} DP7 = \frac{\partial W}{\partial Nlano1} = \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial Nlano1} \\ + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial Nlano1} + \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial Nlano1} \\ + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial Nlano1} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial Nlano1} + \sum_{i=1}^4 \frac{Nlano_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial Nlano_i}{\partial Nlano1} = 2 \end{aligned} \quad (99)$$

Analogicky jako DP7 pro DP8, DP9, DP10

Soustava 10 rovnic o 10 neznámých parametrech

$Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy, Fhz, Nlano1, Nlano2, Nlano3, Nlano4$ je opět vyřešena v Maplu příkazem

$$solve = ([rovnice], [neznámé parametry]) \quad (100)$$

Vyřešené síly $Fdy, Fhy, Fgy, Fey, Ffy, Fhz, Nlano1, Nlano2, Nlano3, Nlano4$ se dosadí do vyjádřených rovnic a dostaneme normálovou sílu v každém prutu. Výsledky jsou shrnuty v tab. 11.

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[MPa]		[N]	mm ²	mm	[Mpa]
A1	-25208,4	1636	3200	-15,41	A11	-21852,1	2512	3300	-8,7
A2	5465,7	1636	3200	3,3	A12	-867,3	2512	3300	-0,3
A3	0,0	1636	3200	0,0	A13	-841,0	1636	3200	-0,5
A4	0,0	1636	3200	0,0	A14	9877,4	1636	3200	6,0
A5	-28580,1	4021	800	-7,1	A15	21189,9	1636	3200	13,0
A6	-24234,5	4021	800	-6,0	A16	0,0	1636	3200	0,0
A7	-8451,7	4021	800	-2,1	A17	1189,3	2512	4520	0,5
A8	-13975,7	4021	800	-3,5	A18	23437,6	2119	1620	11,06
A9	19860,3	2512	3300	7,9	A19	27303,0	2119	1620	12,88
A10	2294,0	816	3200	2,8	A20	-27973,2	2119	1720	-13,20

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[Mpa]		[N]	mm ²	mm	[Mpa]
A21	-27164,1	2119	1720	-12,82	N5	-30615,7	4021	2000	-7,6
A22	1921,2	816	3140	2,4	N6	-15730,5	4021	2000	-3,9
A23	6799,8	3983	2260	1,7	N7	-16162,9	4021	2000	-4,0
A24	-11745,4	3983	2260	-2,9	N8	-23505,0	4021	2000	-5,8
A25	-6895,4	1318	200	-5,2	N9	3129,4	1636	3020	1,9
A26	-598,4	1318	200	-0,5	N10	-2111,4	1636	3020	-1,3
A28	-15559,0	2119	1630	-7,3	N11	-10542,5	1636	3020	-6,4
A29	-15559,0	2119	1630	-7,3	N12	-3129,4	1636	3020	-1,9
B1	-23157,4	1636	2260	-14,15	N13	0,0	1636	2260	0,0
B2	0,0	1636	2260	0,0	N14	0,0	1636	2260	0,0
B3	0,0	1636	2260	0,0	N15	0,0	1636	2260	0,0
B4	0,0	1636	2260	0,0	N16	0,0	1636	2260	0,0
B5	-28302,5	4021	800	-7,0	N17	2234,6	1636	3190	1,4
B6	-10445,6	4021	800	-2,6	N18	3311,9	1636	3190	2,0
B7	-3314,2	4021	800	-0,8	N19	-33472,4	4021	2000	-8,3
B8	-19294,0	4021	800	-4,8	N20	-10297,4	4021	2000	-2,6
B9	22105,0	1636	2400	13,5	N21	-17671,3	4021	2000	-4,4
B10	1678,0	1636	2400	1,0	N22	-36180,5	4021	2000	-9,0
B11	-20321,8	1636	2400	-12,4	N23	-3129,4	1636	3020	-1,9
B12	2911,8	816	2810	3,6	N24	2111,4	1636	3020	1,3
B13	0,0	1636	2260	0,0	N25	10542,5	1636	3020	6,4
B14	-1580,1	1636	2260	-1,0	N26	3129,4	1636	3020	1,9
B15	17556,3	1636	2260	10,7	N27	0,0	1636	2260	0,0
B16	14184,1	1636	2260	8,7	N28	0,0	1636	2260	0,0
B18	27120,9	2119	1550	12,8	N29	0,0	1636	2260	0,0
B19	27402,1	2119	1550	12,9	N30	0,0	1636	2260	0,0
B20	-28943,8	2119	1660	-13,7	N31	-36329,1	4021	2000	-9,0
B21	-26520,9	2119	1660	-12,5	N32	-6212,6	4021	2000	-1,5
B22	665,5	816	2740	0,8	N33	-2419,5	4021	2000	-0,6
B23	0,0	3983	2260	0,0	N34	-30747,4	4021	2000	-7,6
B24	0,0	3983	2260	0,0	N35	3129,4	1636	3020	1,9
B25	-592,7	1318	200	-0,4	N36	-2111,4	1636	3020	-1,3
B26	-7015,7	1318	200	-5,3	N37	-10542,5	1636	3020	-6,4
B28	-18708,3	2119	1560	-8,8	N38	-3129,4	1636	3020	-1,9
B29	-14351,0	2119	1560	-6,8	M1	-2178,2	1636	3200	-1,3
N1	-2341,9	1636	2260	-1,4	M2	0,0	1636	3200	0,0
N2	0,0	1636	2260	0,0	M3	-2178,2	1636	3200	-1,3
N3	-2341,9	1636	2260	-1,4	M4	0,0	1636	3200	0,0
N4	0,0	1636	2260	0,0	M5	-20096,6	4021	3000	-5,0

Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí	Prut	Síla	Průřezy	Délka	Napětí
	[N]	mm ²	mm	[Mpa]		[N]	mm ²	mm	[Mpa]
M6	-35981,4	4021	3000	-8,9	L19	621,1	816	2740	0,8
M7	-39628,2	4021	3000	-9,9	L20	2650,0	816	2740	3,2
M8	-20468,7	4021	3000	-5,1	L21	0,0	816	2260	0,0
M9	-8162,5	2512	4390	-3,2	L22	0,0	816	2260	0,0
M10	-2988,2	2512	4390	-1,2	L23	312,2	1318	200	0,2
M11	2988,2	2512	4390	1,2	L24	-2430,6	1318	200	-1,8
M12	-1153,7	2512	4390	-0,5	L25	-42926,2	1921	1550	-22,35
M13	0,0	1636	3200	0,0	L26	-45461,1	1921	1550	-23,67
M14	0,0	1636	3200	0,0	L27	29183,3	1921	1550	15,2
M15	0,0	1636	3200	0,0	L28	31056,9	1921	1550	16,2
M16	0,0	1636	3200	0,0	L29	312,0	816	1560	0,4
M17	-17983,1	4021	3000	-4,5	L30	1399,6	816	1560	1,7
M18	-43447,1	4021	3000	-10,81	L31	-621,1	816	2740	-0,8
M19	-40021,9	4021	3000	-9,95	L32	-2650,0	816	2740	-3,2
M20	-12694,3	4021	3000	-3,2	L33	0,0	816	2260	0,0
M21	8162,5	2512	4390	3,2	L34	0,0	816	2260	0,0
M22	2988,2	2512	4390	1,2	L35	-2430,6	1318	200	-1,8
M23	-2988,2	2512	4390	-1,2	L36	312,2	1318	200	0,2
M24	1153,7	2512	4390	0,5	L37	-42926,2	1921	1550	-22,3
M25	3080,4	2512	4525	1,2	L38	-19977,2	1921	1550	-10,4
L1	-19603,5	1921	1550	-10,2	L39	3731,6	1921	1550	1,9
L2	22424,8	1921	1550	11,7	L40	31056,9	1921	1550	16,2
L3	-38734,8	1921	1550	-20,2	L41	23181,1	816	1560	28,41
L4	7766,4	1921	1550	4,0	L42	-24892,6	816	1560	-30,51
L5	47298,1	816	1560	57,96	L43	621,1	816	2740	0,8
L6	-45586,6	816	1560	-55,87	L44	2650,0	816	2740	3,2
L7	-621,1	816	2740	-0,8	L45	0,0	816	2260	0,0
L8	-2650,0	816	2740	-3,2	L46	0,0	816	2260	0,0
L9	0,0	816	2260	0,0	L47	312,2	1318	200	0,2
L10	0,0	816	2260	0,0	L48	-2430,6	1318	200	-1,8
L11	-2430,6	1318	200	-1,8	L49	27120,9	1921	1550	14,1
L12	312,2	1318	200	0,2	L50	-19977,2	1921	1550	-10,4
L13	-19603,5	1921	1550	-10,2	L51	3731,6	1921	1550	1,9
L14	-45461,1	1921	1550	-23,7	L52	-39022,5	1921	1550	-20,3
L15	29183,3	1921	1550	15,2	L53	-46674,2	816	1560	-57,20
L16	7766,4	1921	1550	4,0	L54	48385,7	816	1560	59,30
L17	-23805,1	816	1560	-29,17	L55	-621,1	816	2740	-0,8
L18	22093,5	816	1560	27,08	L56	-2650,0	816	2740	-3,2

Tab. 11 Výsledky zátěžného stavu Z3

2.6.3 Vyhodnocení mezního stavu pružnosti

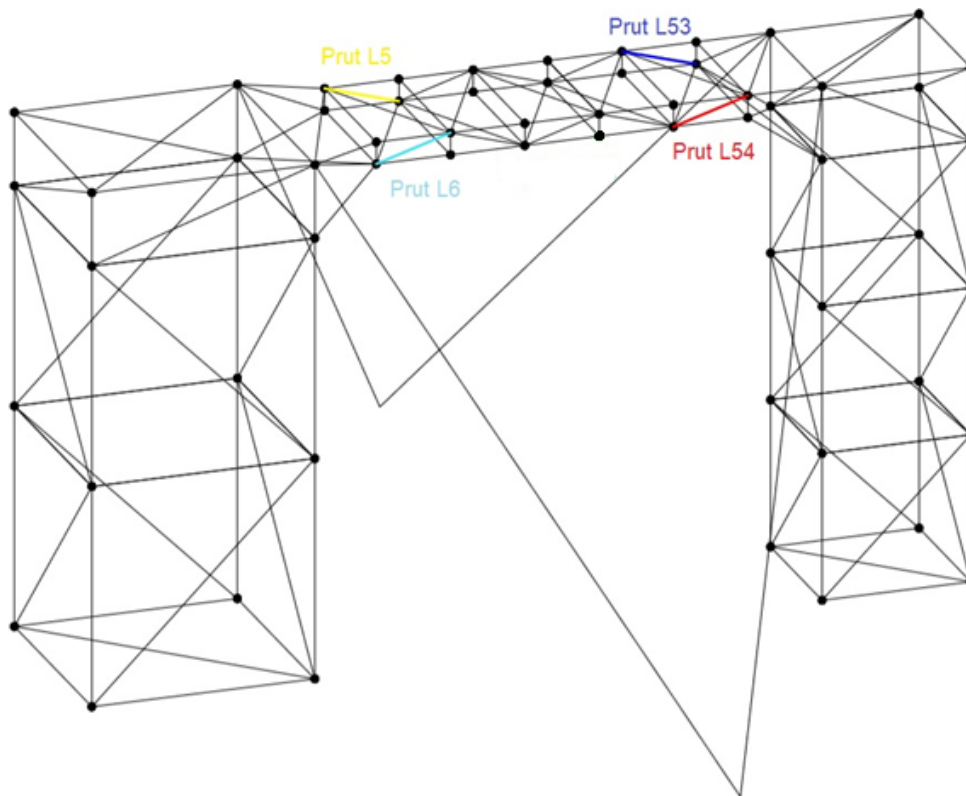
Stejně jako v kapitole 2.5.3 porovnáváme největší napětí s mezí kluzu R_e .

$$K_k^{TLAK} = \frac{R_e}{|\sigma_{L53}|} = \frac{230}{57,2} = 4,02 \quad (101)$$

$$K_k^{TAH} = \frac{R_e}{\sigma_{L54}} = \frac{230}{59,3} = 3,88 \quad (102)$$

Při porovnání výsledku se zátěžným stavem 1, 2 a 3 je možné se všimnout, že bezpečnost vychází téměř totožná.

Nejkritičtější místa MSP jsou znázorněna na obr. 28.



Obr. 28 Nejkritičtější místa MSP při Z3

2.6.4 Vyhodnocení mezního stavu vzpěrné stability

Výpočet proveden analogicky jako v kapitole 2.4.2. Kritická místa zůstala stejná s výjimkou prutu A14, u kterého se změnil charakter napjatosti po předepnutí z tlaku na tah. Bezpečnosti nám oproti stavu Z2 poklesly.

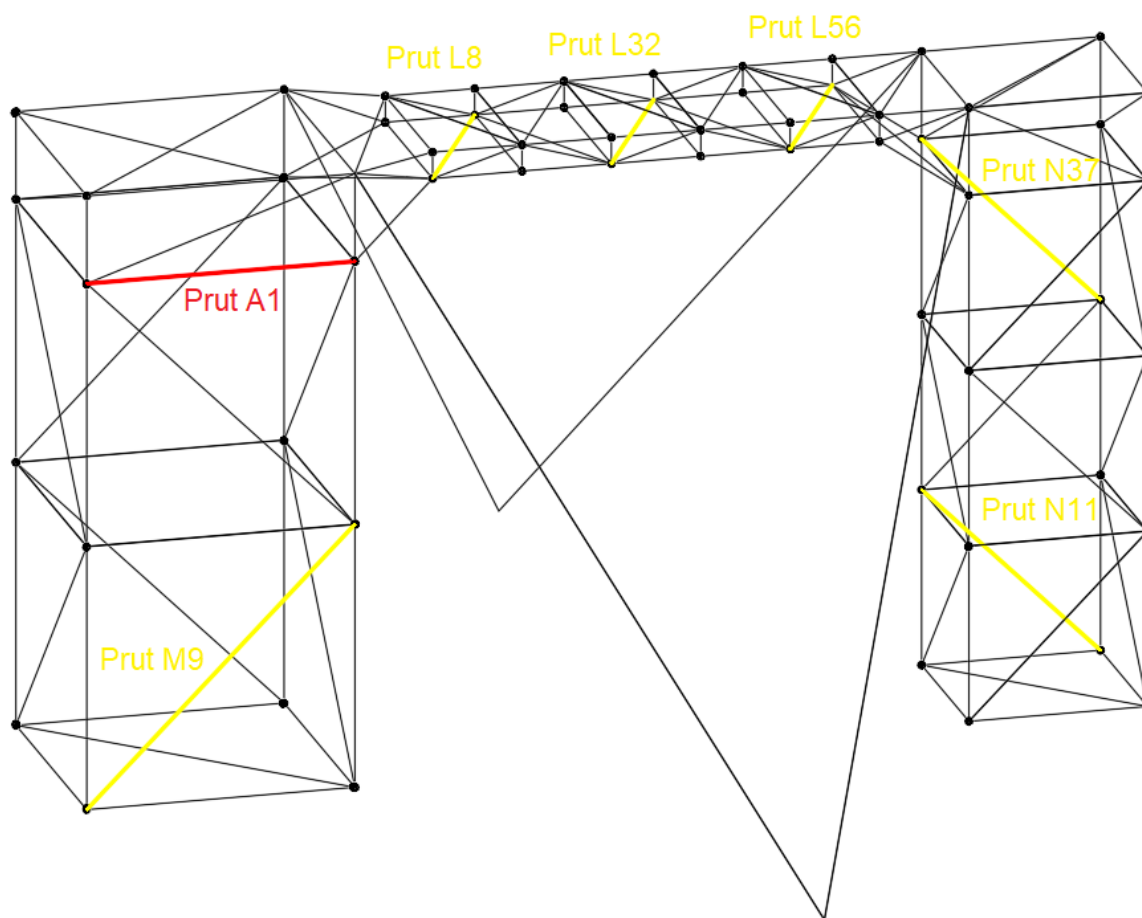
Prut	Síla	Průřezy	Délka	Osový kvadratický moment	$\lambda_k=94,9$	Fv	k_v MSVS
	[N]	[mm ²]	[mm]	[mm ⁴]	λ	[N]	
A1	-25208,4	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	11,3
A13	-841,0	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	338,4
N10	-2111,4	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	151,3
N11	-10542,5	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	30,3
N12	-3129,4	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	102,1
N23	-3129,4	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	102,1
N36	-2111,4	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	151,3
N37	-10542,5	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	30,3
N38	-3129,4	1636	3020	1407440,3	103,0	319517,5	102,1
M1	-2178,2	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	130,7
M3	-2178,2	1636	3200	1407440,3	109,1	284582,8	130,7
M9	-8162,5	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	41,6
M10	-2988,2	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	113,7
M12	-1153,7	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	294,4
M23	-2988,2	2512	4390	3161698,8	123,8	339680,1	113,7
L7	-621,1	816	2740	518135,8	108,6	142896,3	123,7
L8	-2650,0	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	29
L31	-621,1	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	123,7
L32	-2650,0	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	29
L55	-621,1	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	123,7
L56	-2650,0	816	2740	278635,7	148,3	76844,8	29

Tab. 12 Výsledky zátěžného stavu 2 pro MSVS

Bezpečnost se určí stejným způsobem jako v prvním zátěžném stavu. V tomto případě nám poklesla vlivem zvýšené tlakové napjatosti v prutu A1.

$$K_V = \frac{Fv}{F_{A1}} = \frac{284582,78}{|-25208,4|} = 11,3 \quad (103)$$

Výsledky z tab.12 jsou znázorněny na obr. 29



Obr. 29 Nejkritičtější místa MSVS při Z3

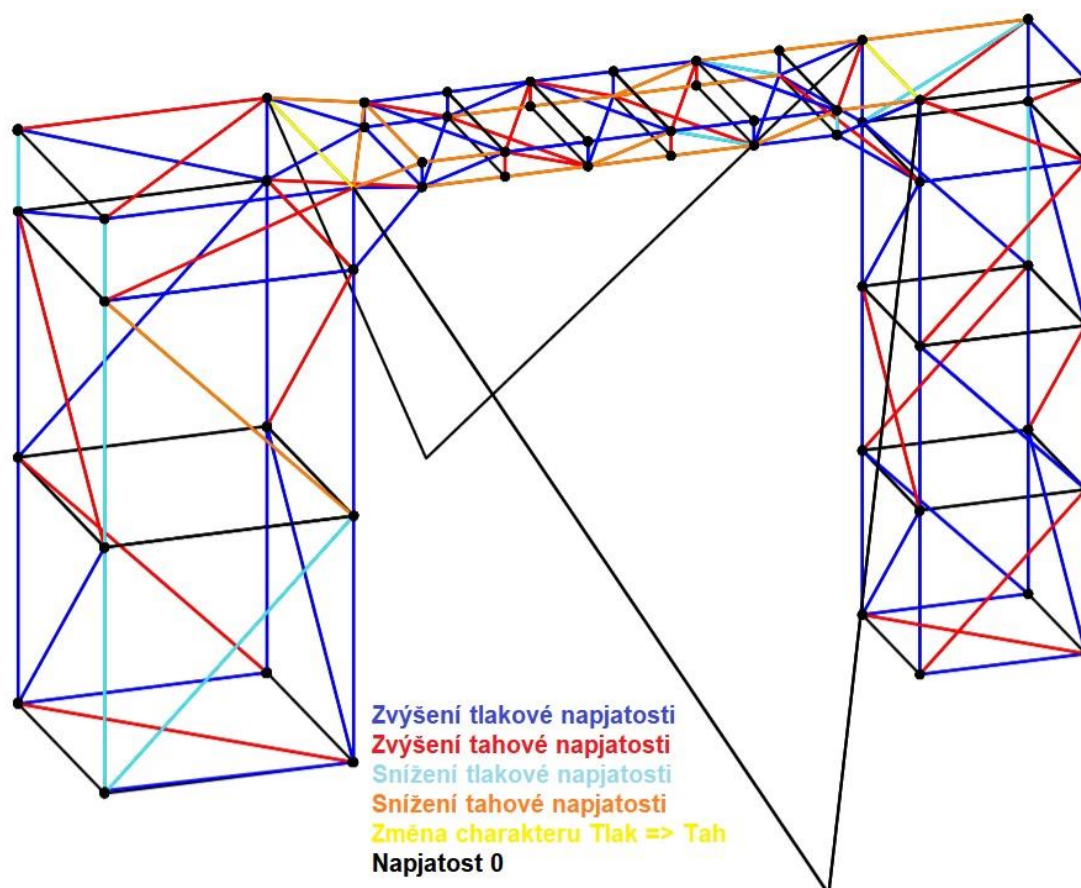
2.6.5 Deformace vybraného místa prutové soustavy

Nakonec se obdobně jako u zátěžného stavu 1 zavede doplňková síla do styčnicku SL12, zjistí se potřebné parciální derivace a sestaví se deformační rovnice pro posuv v ve směru y .

$$\begin{aligned}
 v = & \sum_{i=1}^{29} \frac{A_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial A_i}{\partial F_{dopl}} + \sum_{i=1}^{29} \frac{B_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial B_i}{\partial F_{dopl}} & (104) \\
 & + \sum_{i=1}^{38} \frac{N_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_i}{\partial F_{dopl}} \\
 & + \sum_{i=1}^{25} \frac{M_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial M_i}{\partial F_{dopl}} + \sum_{i=1}^{56} \frac{L_i * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial L_i}{\partial F_{dopl}} \\
 & + \sum_{i=1}^4 \frac{N_{lano_i} * L_i}{E * S_i} * \frac{\partial N_{lano_i}}{\partial F_{dopl}} = \mathbf{11,36 \text{ mm}}
 \end{aligned}$$

2.6.6 Zhodnocení

Výsledky nekritičtějších prutů konstrukce jednoznačně nepotvrdily hypotézu o zvýšení celkové napjatosti po předeptnutí táhel. U 63 % prutů ale skutečně došlo ke zvýšení normálového napětí, u 18 % prutů naopak k jeho snížení a u 19 % zůstala napjatost nezměněná. Jednalo se především o pruty, které jsou nezátížené. Tato úprava však nebyla provedena za účelem zvýšení napjatosti v rozhledně. Hlavním důvodem bylo zvýšení tuhosti konstrukce a zlepšení odolnosti vůči rozkmitání. Podstatný vliv na průhyb uprostřed lávky tato opatření však neměla.



Obr. 30 Změna napjatosti mezi stavy Z2 a Z3

Na obr. 30 je možné vidět žlutou barvou vyznačená kritická místa, u kterých dochází ke změně charakteru napjatosti z tlaku na tah. Je to zapříčiněné předeptnými táhly.

3 Numerický výpočet

3.1 Metoda konečných prvků

Základní prvkem MKP (angl. The Finite Element Method) je, jak již název napovídá, prvek konečných rozměrů. [9] Tato skutečnost je největším rozdílem oproti analytickému výpočtu, kde uvažujeme prvek nekonečně malý. Rozvoj metody započal v 50. letech minulého století. První software pracující na principu MKP vyvinula v 60. letech společnost NASA. V dnešní době máme k dispozici nespočet komerčně nabízených programů. Mezi nejsilnější firmy patří ABAQUS, ANSYS a NASTRAN.

3.2 Algoritmus MKP

Každý výpočet metodou MKP prochází třemi fázemi. První z nich je Preprocessor, kde se připraví CAD model a provede se jeho diskretizace. [9] Diskretizace znamená nahrazení objemu modelu konečným počtem prvků. Znalosti, jaký typ elementu použít, popřípadě jak hustou síť vytvořit, vyžadují značnou část inženýrské praxe. Takto připravený model pokračuje do fáze Solver. Zde probíhá samotný výpočet. Nejčastějším typem neznámých parametrů jsou posuvy uzlových bodů, které se aproximují polynomem určitého stupně, tzv. bázovou funkcí. V dalším kroku je zapotřebí sestavit celkovou matici tuhosti \mathbf{K} a vnějšího zatížení \mathbf{F} . Neznámé parametry u_i přiřadíme do matice \mathbf{U} .

$$\mathbf{K} * \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (105)$$

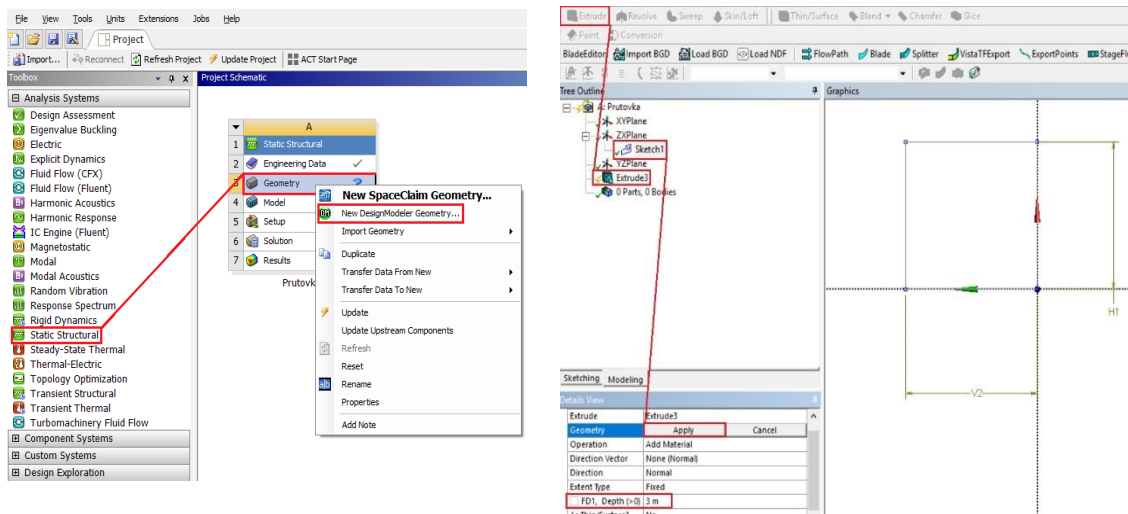
Aby byla soustava řešitelná, musí uživatel zamezit pohybu tělesa jako celku předepsáním vhodných okrajových podmínek.

3.3 Aplikace MKP na prutovou soustavu

Numerické řešení bylo provedeno ve výpočtovém softwaru ANSYS Workbench 19.0. Numerická část všech dohledaných závěrečných prací, které se zabývají napjatostně deformační analýzou prutové soustavy, byla zpracována v prostředí ANSYS MECHANICAL APDL. Z tohoto důvodu uvedeme pro nadcházející řešitele podrobný postup, jak zpracovat tuto část v prostředí ANSYS Workbench.

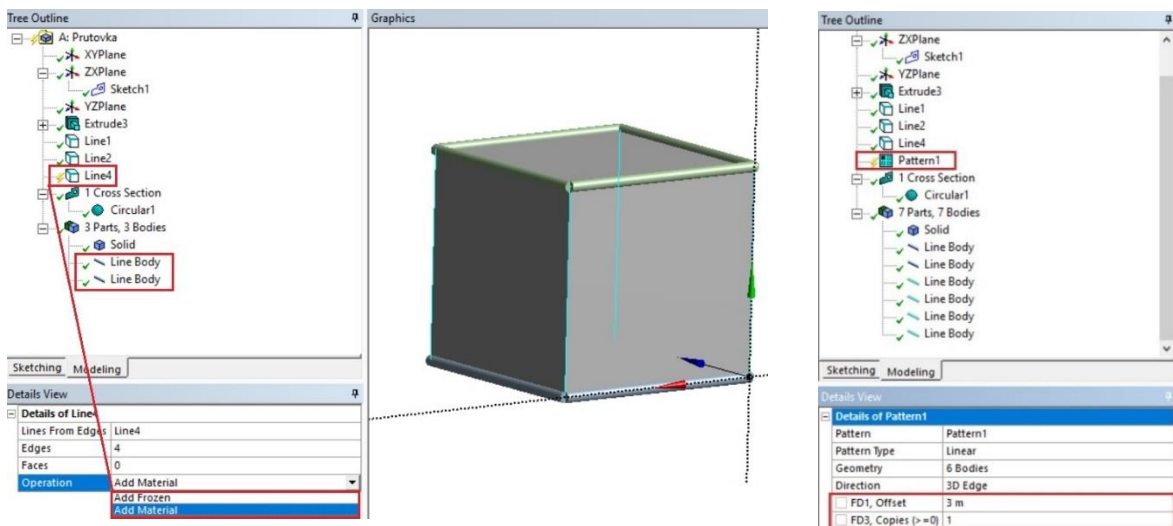
V analytickém výpočtu je uvažováno namáhání prutů pouze prostým tahem a tlakem, které je charakteristické konstantním průběhem osově síly po délce střednice. To nám umožňuje použít každý prut jako jeden prvek, který obsahuje na každém konci dva uzly. V analytickém výpočtu tyto uzly představují styčníky, které zamezují posuvům ve směru x , y , z . Při verifikaci je tedy nutné zvolit takový prvek, jehož deformační parametry jsou 3 neznámé posuvy. Z databáze ANSYSU byl vybrán prvek LINK180. Workbench má primárně nastaveno uvažovat příhradové konstrukce jako rámové, tzv. s pevnými spoji ve styčnicích. Takto primárně nastavený prvek se nazývá BEAM a bude použit později.

Nyní bude naznačeno, jak ve Workbench vytvořit prutovou soustavu, aby bylo možné výsledky porovnat s analytickým výpočtem. Nejprve je zapotřebí vytvořit nový projekt Static Structural. V záložce Engineering data se nastaví materiálové charakteristiky, samotný model se vytvoří v záložce Geometry, konkrétně v modulu New Design-Modeler Geometry.

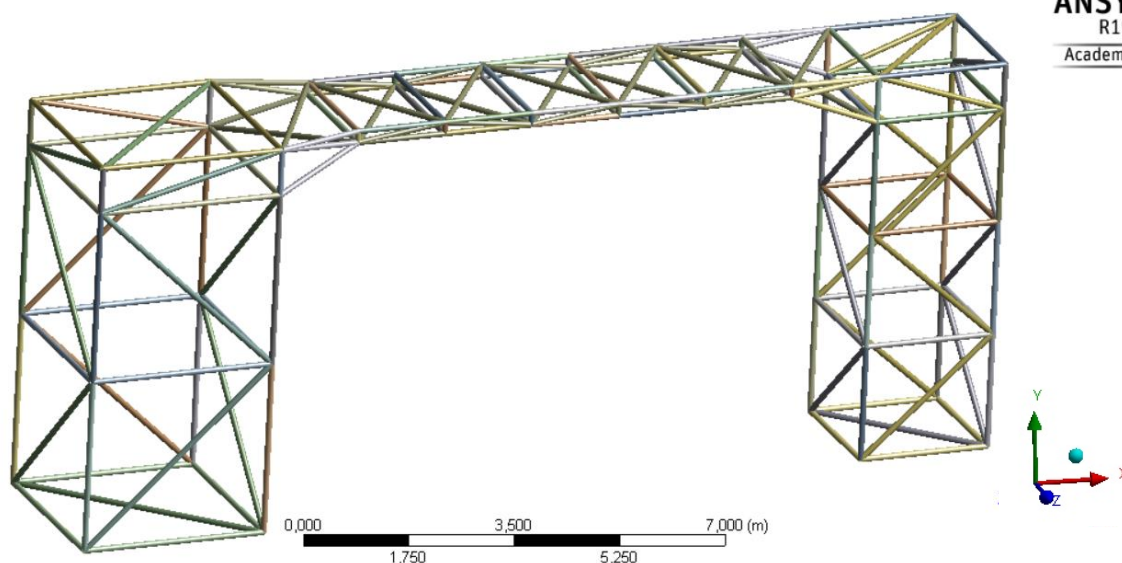


Obr. 31 Tvorba geometrie v Design Modeleru 1

V náčrtu se vytvoří a okójují půdorysné rozměry soustavy. Pomocí příkazu „Extrude“ se vysune půdorys o zvolenou výšku FD1. V dalším kroku se přes „Lines from edges“ vytvoří střednice. Důležité je namodelovat odděleně pruty různých průřezů*. To se provede pomocí změny operace z „Add Material“ na „Add Frozen“. Ve stromě se poté zobrazí více „Line body“. Jelikož se příhradové konstrukce často skládají z opakujících se prvků, je na místě použítá funkce „Pattern“. Ta umožňuje rozkopírovat již vytvořený model.

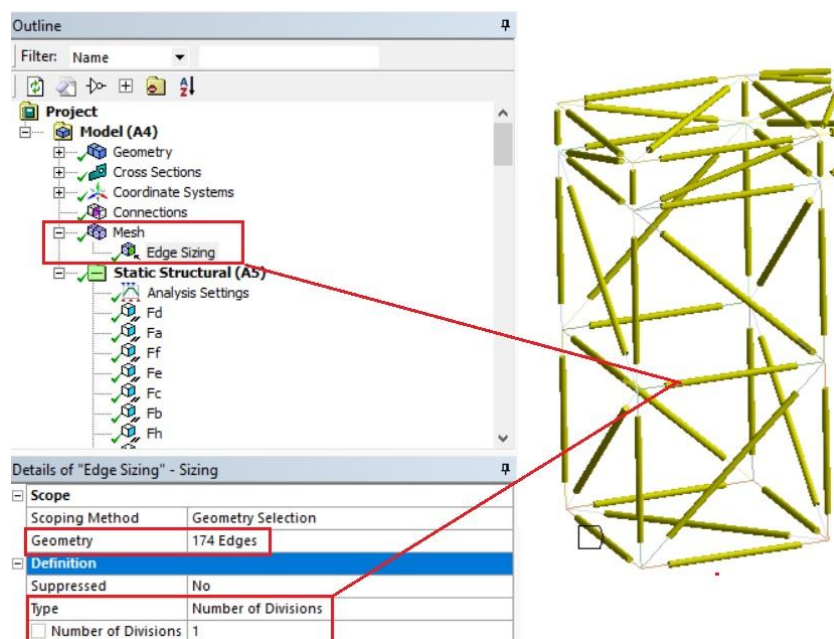


Obr. 32 Tvorba geometrie v Design Modeleru 2



Obr. 33 Tvorba geometrie v Design Modeleru 3

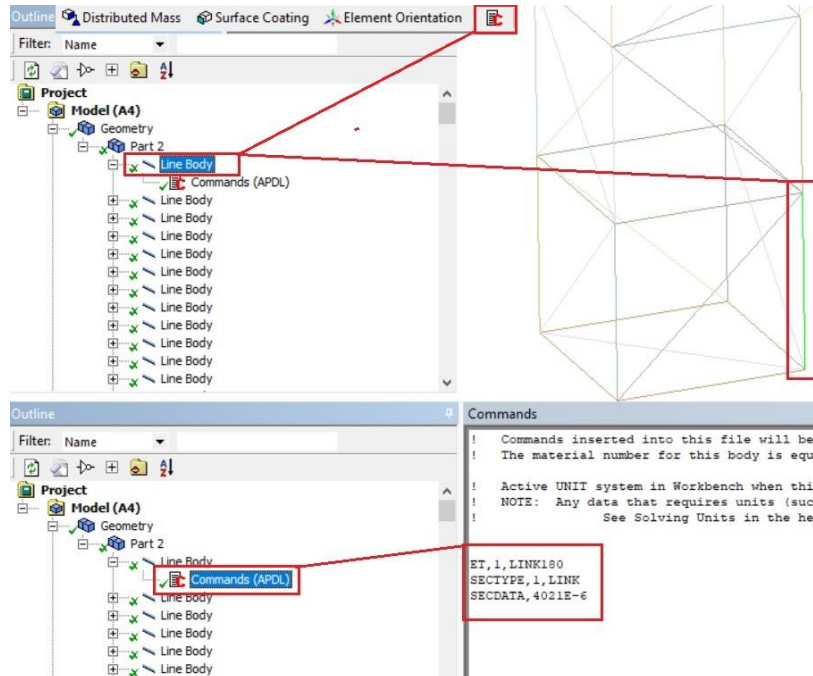
Po vytvoření celé prutové soustavy se výpočet přesune do modulu Mechanical. Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, při verifikaci je nutné nastavit každý prut jako jeden prvek s krajními uzlovými body. Toto nastavení se provede cestou *Mesh > Insert > Sizing*. V okně *Details of „Edge Sizing“* se přiřadí do Geometry všechny pruty naší soustavy a *Type* se nastaví jako *Number of Divisions* s hodnotou 1.



Obr. 34 Nastavení sítě v ANSYS MECHANICAL

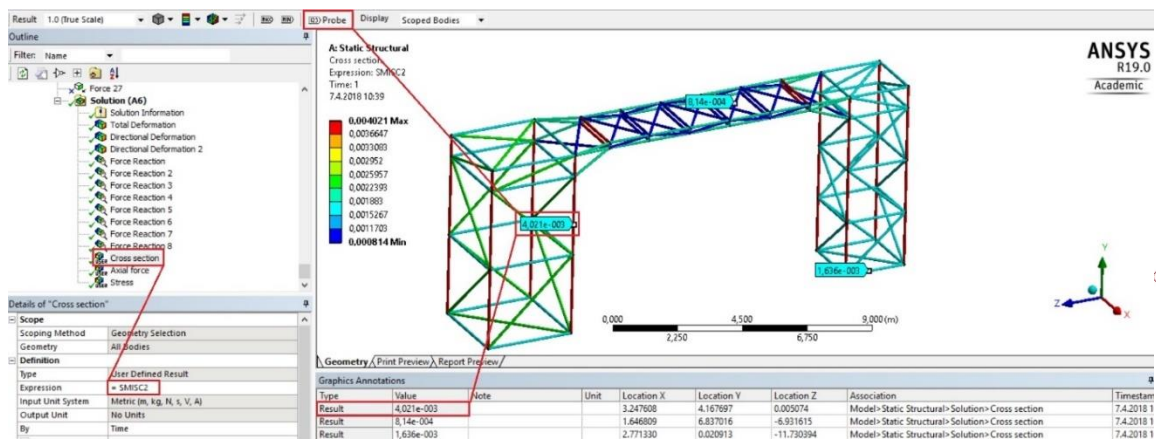
Pro takto připravenou síť je nyní možné změnit výchozí prvek BEAM na LINK180. [10] Ve stromě modelu se rozklikne nabídka *Geometry*, kde se ke každému *Line body* přiřadí odpovídající příkaz.

„ET, 1, LINK180“ ... Příkaz pro změnu prvku, číslo prvku, změněný prvek
 „SECTYPE, 1, LINK“ ... Příkaz definující typ příčného průřezu
 „SECDATA, 4021E-6“ ... Příkaz definující velikost příčného průřezu v mm²



Obr. 35 Změna prvku BEAM na LINK180

Pro správné přiřazení příčného průřezu k danému tělesu je důležité dbát na to, aby každý prvek měl svoje vlastní číslo. Nyní je prutová soustava připravena k řešení. Workbench ale pro prvek LINK nenabízí nic kromě vykreslení deformace. Pro získání hodnot axiálních sil a napětí je třeba nadefinovat nová řešení příkazem „User Defined Results“. K získání axiální síly se vloží do okna „Expression“ příkaz „SMISC1“. Pro kontrolu, zda jsou správně přiřazeny hodnoty průřezů, použijeme příkaz „SMISC2“. Napětí se získá obdobně jako při analytickém řešení, a to podělením síly na plochu „SMISC1/ SMISC2“. Velmi užitečným nástrojem pro získání konkrétních hodnot sil a napětí je „Probe“. [11] [12]



Obr. 36 nastavení výstupu v ANSYS MECHANICAL

3.4 Verifikace

Pro verifikaci byl vybrán zátěžný stav Z1. K porovnání výsledků bude použito normálové napětí. V tab. 13 jsou uvedeny výsledky numerického i analytického řešení na celé prutové soustavě. Hodnoty posuvů ve směru y jsou v tab. 14.

Prut	MKP	Analytika	Prut	MKP	Analytika	Prut	MKP	Analytika
	Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]		Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]		Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]
A1	-13,71	-13,71	B5	-4,27	-4,27	N10	-0,07	-0,07
A2	3,95	3,94	B6	-2,47	-2,47	N11	0,07	0,07
A3	0,00	0,00	B7	-0,48	-0,48	N12	-0,07	-0,07
A4	0,00	0,00	B8	-2,17	-2,17	N13	0,00	0,00
A5	-4,66	-4,66	B9	14,94	14,95	N14	0,00	0,00
A6	-3,22	-3,22	B10	0,05	0,06	N15	0,00	0,00
A7	-2,05	-2,05	B11	-14,94	-14,96	N16	0,00	0,00
A8	-3,51	-3,51	B12	0,13	0,14	N17	0,07	0,08
A9	9,34	9,35	B13	0,00	0,00	N18	0,07	0,08
A10	0,57	0,58	B14	-0,05	-0,06	N19	-7,05	-7,04
A11	-9,04	-9,05	B15	14,03	14,03	N20	-1,08	-1,08
A12	-0,14	-0,14	B16	-0,05	-0,06	N21	-1,00	-1,00
A13	-0,21	-0,21	B18	15,74	15,73	N22	-7,08	-7,09
A14	-4,36	-4,36	B19	15,76	15,77	N23	-0,07	-0,07
A15	13,47	13,47	B20	-11,62	-11,60	N24	0,07	0,07
A16	0,00	0,00	B21	-11,73	-11,72	N25	-0,07	-0,07
A17	0,19	0,20	B22	0,13	0,13	N26	0,07	0,07
A18	15,07	15,08	B23	0,00	0,00	N27	0,00	0,00
A19	15,58	15,59	B24	0,00	0,00	N28	0,00	0,00
A20	-11,79	-11,75	B25	-0,45	-0,45	N29	0,00	0,00
A21	-11,89	-11,84	B26	-5,25	-5,25	N30	0,00	0,00
A22	0,56	0,57	B28	-4,97	-4,96	N31	-6,76	-6,76
A23	2,33	2,33	B29	-4,89	-4,89	N32	-0,72	-0,72
A24	-2,42	-2,42	N1	-0,05	-0,06	N33	-0,72	-0,72
A25	-5,18	-5,18	N2	0,00	0,00	N34	-6,72	-6,73
A26	-0,45	-0,45	N3	-0,05	-0,06	N35	0,07	0,07
A28	-4,15	-4,15	N4	0,00	0,00	N36	-0,07	-0,07
A29	-4,57	-4,58	N5	-7,33	-7,32	N37	0,07	0,07
B1	-14,14	-14,13	N6	-1,44	-1,44	N38	-0,07	-0,07
B2	0,00	0,00	N7	-1,29	-1,28	M1	-0,21	-0,21
B3	0,00	0,00	N8	-7,44	-7,45	M2	0,00	0,00
B4	0,00	0,00	N9	0,07	0,07	M3	-0,21	-0,21

Prut	MKP	Analytika	Prut	MKP	Analytika	Prut	MKP	Analytika
	Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]		Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]		Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]
M4	0,00	0,00	L5	57,38	57,28	L31	-0,13	-0,12
M5	-3,58	-3,57	L6	-56,90	-56,80	L32	-0,13	-0,12
M6	-8,74	-8,74	L7	-0,13	-0,12	L33	0,00	0,00
M7	-8,29	-8,28	L8	-0,13	-0,12	L34	0,00	0,00
M8	-4,03	-4,04	L9	0,00	0,00	L35	-1,84	-1,84
M9	0,19	0,19	L10	0,00	0,00	L36	0,24	0,24
M10	-0,19	-0,19	L11	-1,84	-1,84	L37	-19,41	-19,41
M11	0,19	0,19	L12	0,24	0,24	L38	-7,18	-7,18
M12	-0,19	-0,19	L13	-7,58	-7,57	L39	7,10	7,10
M13	0,00	0,00	L14	-19,94	-19,94	L40	19,64	19,63
M14	0,00	0,00	L15	19,57	19,57	L41	29,15	29,10
M15	0,00	0,00	L16	8,09	8,09	L42	-29,63	-29,57
M16	0,00	0,00	L17	-28,54	-28,48	L43	0,13	0,12
M17	-2,82	-2,81	L18	28,05	28,01	L44	0,13	0,12
M18	-7,66	-7,66	L19	0,13	0,12	L45	0,00	0,00
M19	-7,53	-7,53	L20	0,13	0,12	L46	0,00	0,00
M20	-2,96	-2,96	L21	0,00	0,00	L47	0,24	0,24
M21	-0,19	-0,19	L22	0,00	0,00	L48	-1,84	-1,84
M22	0,19	0,19	L23	0,24	0,24	L49	17,36	17,36
M23	-0,19	-0,19	L24	-1,84	-1,84	L50	-7,18	-7,18
M24	0,19	0,19	L25	-19,41	-19,41	L51	7,10	7,10
M25	0,19	0,20	L26	-19,94	-19,94	L52	-17,42	-17,42
L1	-7,58	-7,57	L27	19,57	19,57	L53	-57,99	-57,89
L2	15,91	15,91	L28	19,64	19,63	L54	58,48	58,36
L3	-16,56	-16,57	L29	-0,31	-0,31	L55	-0,13	-0,12
L4	8,09	8,09	L30	0,79	0,78	L56	-0,13	-0,12

Tab. 13 Verifikace zátěžného stavu I

Zátěžný stav 1	MKP	Analytika
Posuv v styčnicku SL12	11,54 mm	11,52 mm

Tab. 14 Srovnání hodnot posuvů Z1

Ve výsledcích jsou patrné mírné rozdíly napjatosti. U prutů, ve kterých napjatost překročila hodnotu 10 MPa, proto spočítáme odchylku metod podle rovnice (106).

$$s = \left| \frac{MKP}{Analytika} - 1 \right| * 100 \quad (106)$$

Prut	MKP	Analytika	odchylka	Prut	MKP	Analytika	odchylka
	Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]	[%]		Napětí [Mpa]	Napětí [MPa]	[%]
A1	-13,71	-13,71	-0,04	L14	-19,94	-19,94	0,03
A15	13,47	13,47	0,03	L15	19,57	19,57	0,03
A18	15,07	15,08	-0,06	L17	-28,54	-28,48	0,18
A19	15,58	15,59	-0,08	L18	28,05	28,01	0,16
A20	-11,79	-11,75	0,38	L25	-19,41	-19,41	0,01
A21	-11,89	-11,84	0,40	L26	-19,94	-19,94	0,03
B1	-14,14	-14,13	0,01	L27	19,57	19,57	0,03
B9	14,94	14,95	-0,07	L28	19,64	19,63	0,02
B11	-14,94	-14,96	-0,14	L37	-19,41	-19,41	0,01
B15	14,03	14,03	-0,01	L40	19,64	19,63	0,02
B18	15,74	15,73	0,03	L41	29,15	29,10	0,19
B19	15,76	15,77	-0,01	L42	-29,63	-29,57	0,21
B20	-11,62	-11,60	0,12	L49	17,36	17,36	0,03
B21	-11,73	-11,72	0,12	L52	-17,42	-17,42	-0,02
L2	15,91	15,91	-0,04	L53	-57,99	-57,89	0,18
L3	-16,56	-16,57	-0,07	L54	58,48	58,36	0,19
L5	57,38	57,28	0,18	<i>v</i>	11,54 mm	11,52 mm	0,17
L6	-56,90	-56,80	0,17				

Tab. 15 Odchylky v napětí zátěžného stavu 1

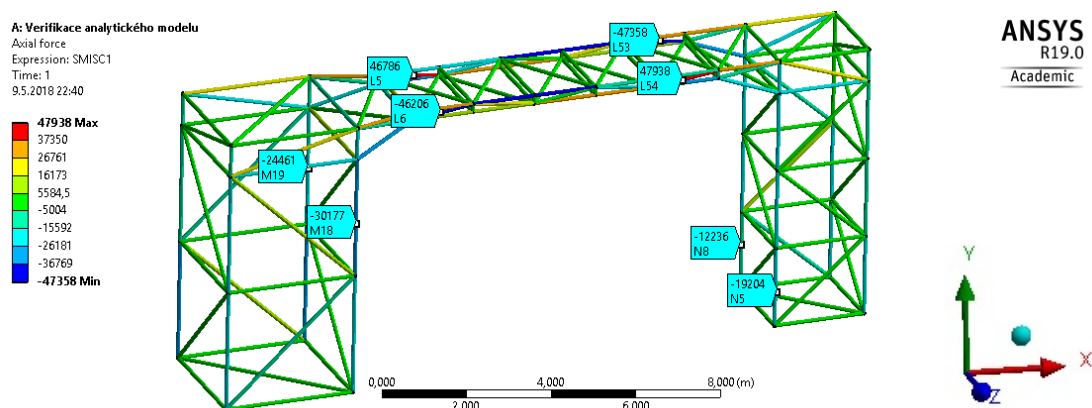
Při zátěžném stavu 1 se nám hodnoty normálového napětí liší v rámci setin MPa. Podle tab. 15 žádná odchylka u vybraných prutů nepřesáhla hodnotu 0,5 %, a proto je možné analytický výsledek považovat za verifikovaný. Metodou MKP byly ověřeny také zátěžné stavy 2 a 3, u kterých odchylka nepřesáhla hodnotu 1 %. Pro kontrolu deformačních podmínek stavu Z3 jsou v tab. 16 uvedeny hodnoty osových sil v táhlech po předepnutí vůle 2 mm

	MKP	Analytika	odchylka
	síla [N]	Síla [N]	[%]
Nlano1	20599	20555	0,22
Nlano2	22077	22102	0,05
Nlano3	21362	21227	0,62
Nlano4	20593	20656	0,23

Tab. 16 Srovnání osových sil v táhlech stavu Z3

3.5 Zvýšení úrovně numerického modelu

V analytickém řešení jsou vazby navrženy ve směru působícího zatížení. V každém spodním styčnicku je zamezena deformace ve směru y , navíc jsou na každé věži zamezeny také deformace ve směru x a z . V této části budou všechny vazby zvýšeny na úroveň vetknutí, která je $48 \times$ staticky neurčitá. Následně se porovnávají výsledky nejvíce zatížených prutů se stavem Z2.



Obr. 37 Normálové síly po vetknutí prutové soustavy

Na obr. 37 si můžeme všimnout, že nejvíce zatížené pruty jsou opět L53 a L54, v tab. 17 jsou znázorněny hodnoty normálových sil vybraných prutů. Z výsledků je možné vyvodit závěr, že vazby na úrovni modelu byly navrženy správně.

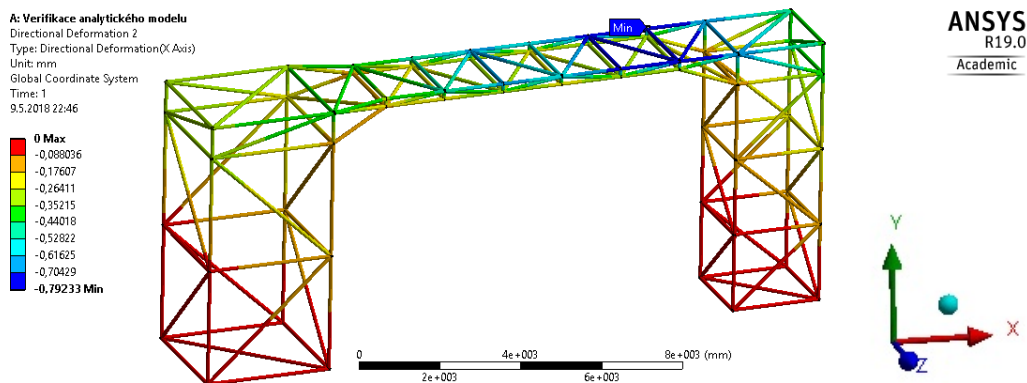
Prut	Vazby stavu Z2	Vetknuté	Prut	Vazby stavu Z2	Vetknuté
L53	-46670	-47358	M18	-30925	-30177
L54	48619	47938	M19	-28423	-24461
L5	47474	46786	N5	-20299	-19204
L6	-45525	-46206	N8	-15675	-12236

Tab. 17 Srovnání vybraných osových sil stavu Z2 a vetknutí

K největší změně osové síly došlo u spodních prutů modelu, které jsou buď přímo navázány na uložení nebo leží v jeho blízkosti.

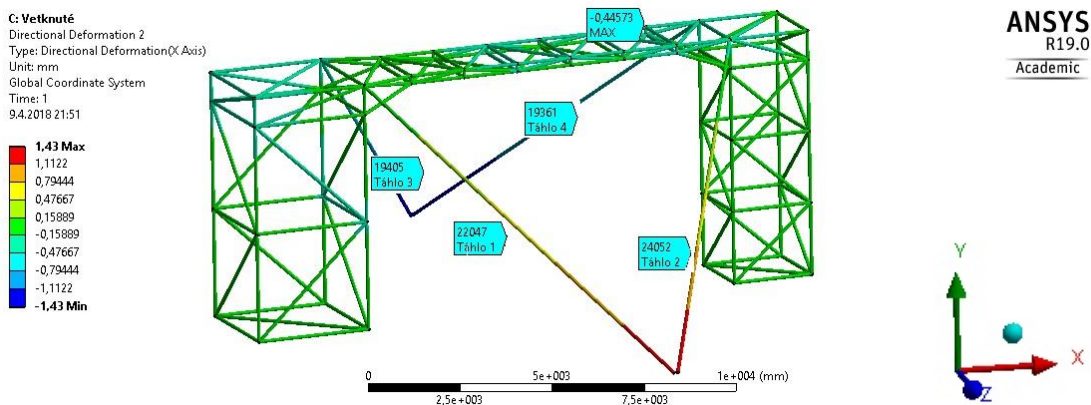
3.6 Kontrola předepnutí táhel

Jak již bylo zmíněno v kapitole (2.8), hodnota vůle $\delta = 2 \text{ mm}$ není ničím podložena. Zde budou porovnány osové síly v táhlech a deformace ve směru působícího větru. Teorie výpočtu takového zatížení byla naznačena v kapitole (1.8) a odpovídající hodnoty dopočítány v kapitole (2.4). Takové porovnání bude provedeno pouze numericky. Aby bylo zamezeno nežádoucím deformacím, bude zvýšena úroveň vnější statické neurčitosti. Všechny vazby jsou nyní uvažovány jako vetknuté. Do styčníků uvedených v tab. 6 byly zavedeny odpovídající síly od působícího větru v záporném směru osy z .



Obr. 38 Maximální posuv ve směru z při zatížení větrem na variantě bez lan

Největší deformace ve směru z byla ve styčnicku SL13. Konstrukce se v tomto místě posune o 0,79 mm. Nyní se provede obdobný výpočet ve variantě s lany. Jelikož byla vlivem vetknutí změněna statická neurčitost soustavy, je nutné nejprve určit síly předpětí v lanech v klidovém stavu. Následně budou do výpočtu zavedeny síly od větru a výsledky budou porovnány. Při takovémto zatížení se očekává zvýšená tahová síla v táhlech 1 a 2, naopak v táhlech 3 a 4 její snížení.



Obr. 39 Maximální posuv ve směru z při zatížení větrem na variantě s lany

V případě s lany byla deformace ve směru z opět ve styčnicku SL13. Její hodnota byla nyní 0,43 mm. Z výsledků tedy vyplývá, že předepnutí výrazně ovlivní deformace ve směru působícího větru. V tomto konkrétní případě se posunutí zmenšilo o 45 %. V tab. 18 je znázorněno, jak se změnil síly v táhlech po zatížení větrem.

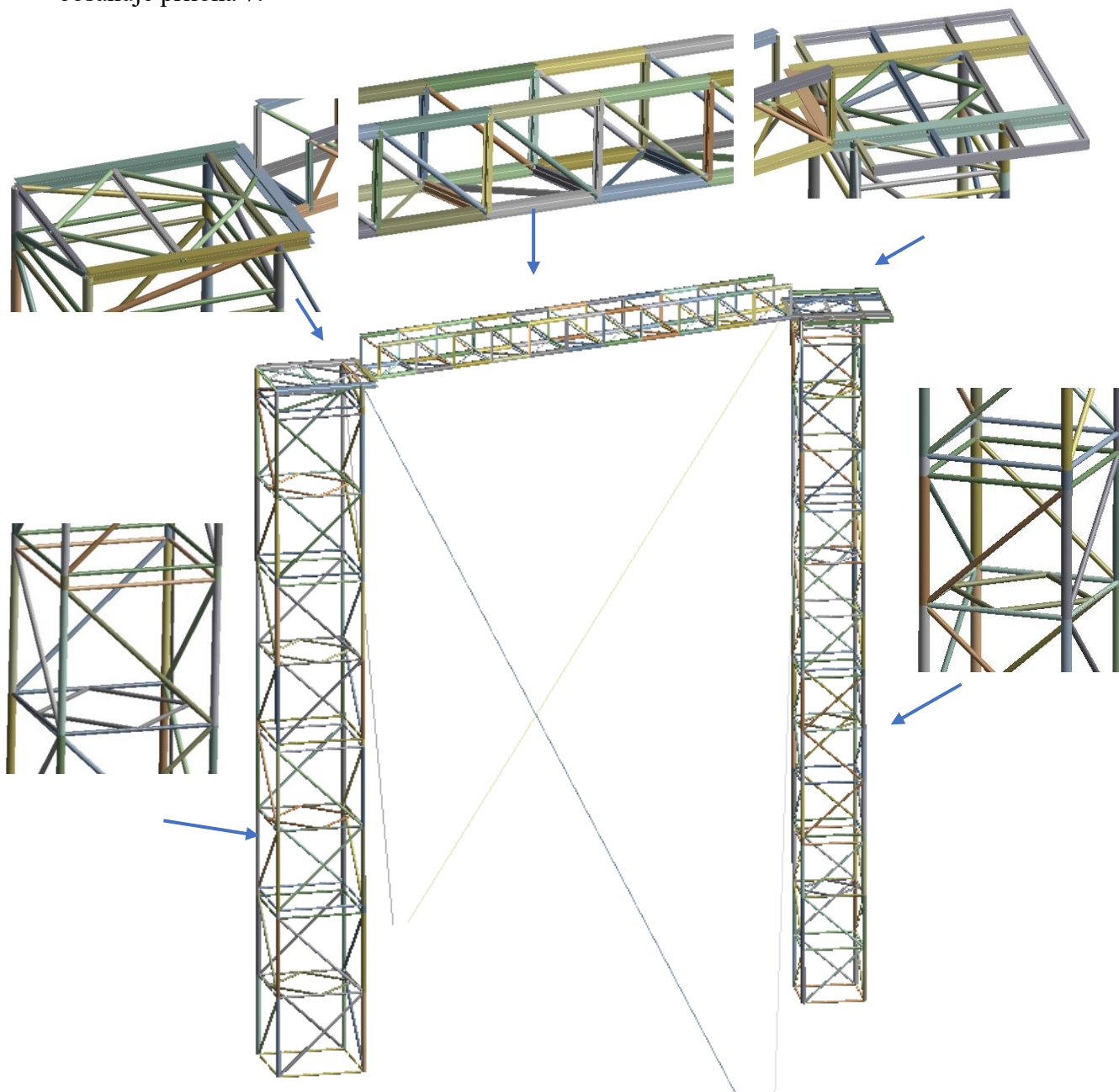
	Zatížení bez větru	Zatížení s větrem
	Síla [N]	Síla [N]
Táhlo 1	20238	22228
Táhlo 2	22231	24093
Táhlo 3	21154	19241
Táhlo 4	21058	19295

Tab. 18 Změna normálových sil v táhlech po zatížení větrem

Výsledky potvrdily předpoklad. Táhla 3 a 4 se neprohnula (nedošlo ke změně zatížení z tahu na tlak), a proto je možné je považovat za správně navrhnuté.

3.7 Výpočet konstrukce rozhledny Hraniční vrch v programu ANSYS

Do této chvíle byly veškeré výpočty provedeny na vytvořeném modelu podle obr. 26. Všechna zjednodušení byla navržena tak, aby bylo možné prutovou soustavu řešit analyticky. Zde je vytvořen model nový, který odpovídá skutečné rozhledně Hraniční vrch. Výpočet je proveden pouze numericky, celá konstrukce je uvažována jako rámová, tzn. s pevnými spoji ve styčnicích. Vazby jsou uvažovány jako vetknuté. Při modelování je použit prvek BEAM 188. Zatížení vlastní tíhou je realizováno pomocí funkce „Standart Earth Gravity“, kterou Workbench nabízí. Dále jsou do styčniců na věži A zavedeny tíhové síly schodiště a na plošiny tíhy střech. Model společně s numerickým výpočtem obsahuje příloha 7.



Obr. 40 Reálný model konstrukce rozhledny Hraniční vrch

3.7.1 Porovnání výpočtového modelu se skutečnou konstrukcí při Z3

Ačkoliv odlišností modelu od skutečné konstrukce je hodně, přesto je možné najít společné vlastnosti obou výpočtů. Nejprve je nutné si připomenout, v čem se modely nejvíce liší.

- Velikost

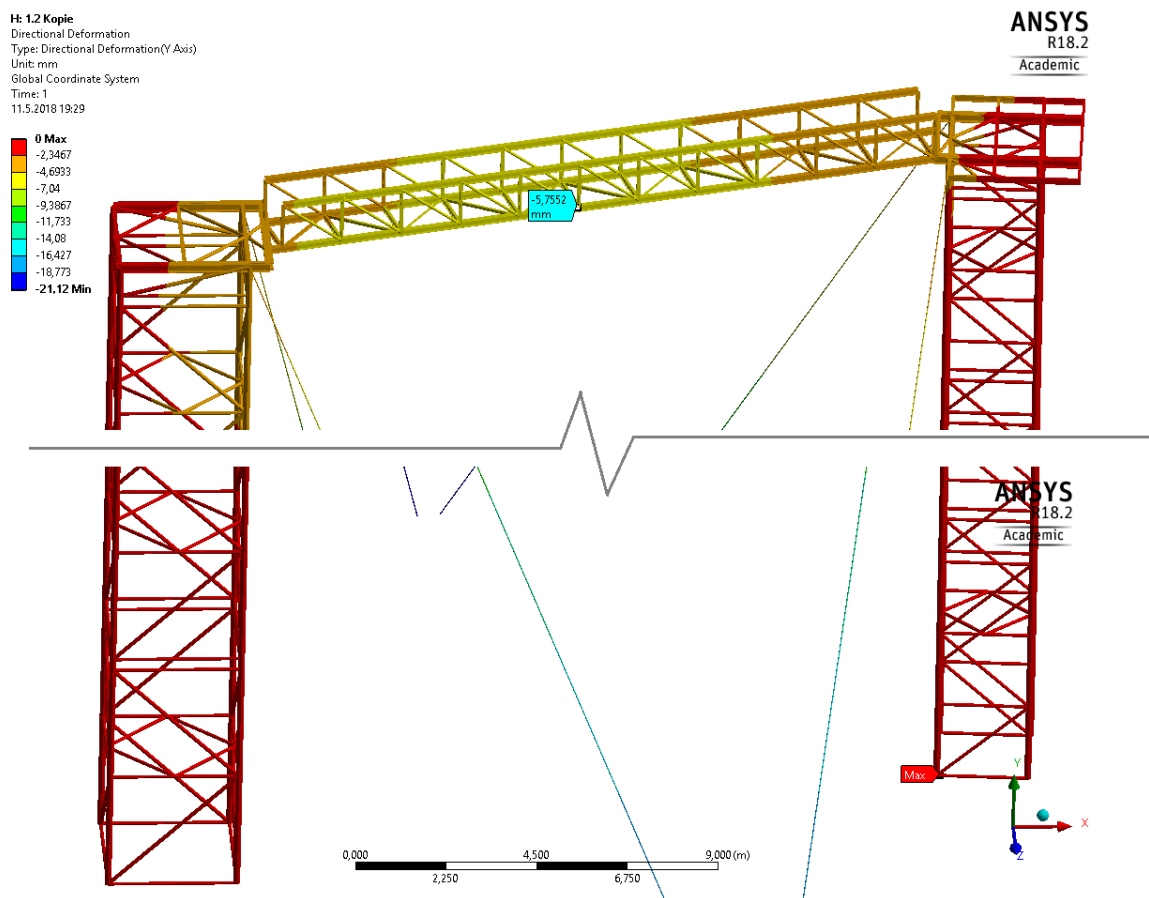
Z obr. 2 je možné si všimnout, že konstrukce věží se skládá ze 4 typizovaných částí. Z důvodu omezených časových možností byl analytický výpočet realizován na zmenšeném modelu. Značný vliv zde bude mít i vyosení obou věží, které jsou ve skutečnosti vzájemně pootočený o 9 °.

- Konstrukce

Při převodu rozhledny na prutovou konstrukci bylo nutné provést patřičná zjednodušení. Hlavním záměrem bylo zanechat prostorový charakter soustavy, která bude vnitřně staticky určitá. Ve výpočtu skutečného modelu je potřeba uvažovat také ohybové napětí, které však předpokládáme řádově nižší než normálové.

Deformace konstrukce

Obdobně jako u analytického modelu byla zjištěná největší deformace uprostřed lávky. Její hodnota je v tomto případě 5,75 mm. Na věžích postupně klesá až do hodnoty 0 v místě vetknutí.



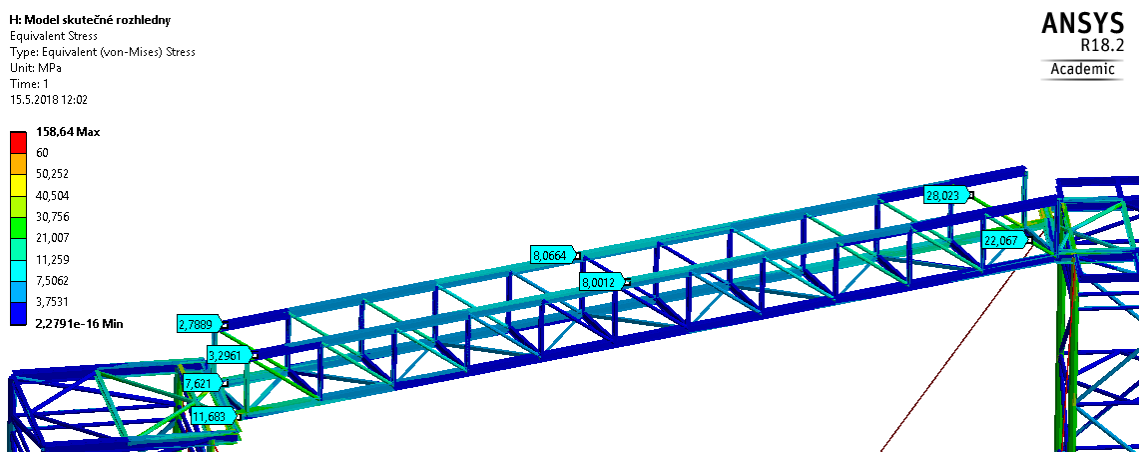
Obr. 41 Svislá (y) deformace rozhledny po předeptnutí táhel

Napjatost v konstrukci

V případě rámové konstrukce se napjatost skládá ze složky normálové a ohybové. Ke zjištění kritických míst je na obr. 42 vykresleno redukované napětí podle teorie HMM. Předepsaného předpětí v táhlech bylo dosaženo vytvořením vůle δ o velikosti 25 mm. V této části budou zkoumány podobnosti s analytickým modelem.

1) Lávka

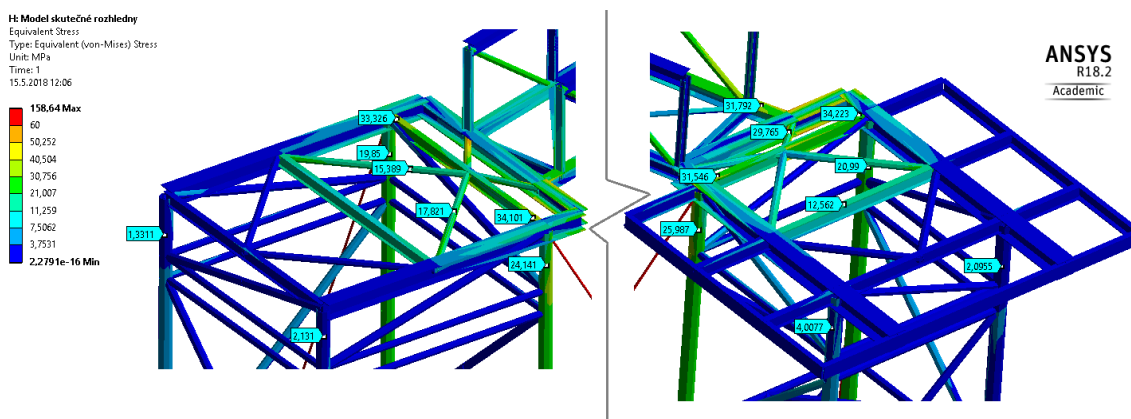
Nejvíce namáhané pruty jsou stejně jako v analytickém modelu krajní diagonály. Na horních podélnících je napjatost největší ve středu lávky a klesá postupně ke krajům. V případě spodních podélníků je to právě naopak, tzn. napjatost roste směrem od středu lávky.



Obr. 42 Redukované napětí dle teorie HMM na lávce skutečné konstrukce

2) Plošiny

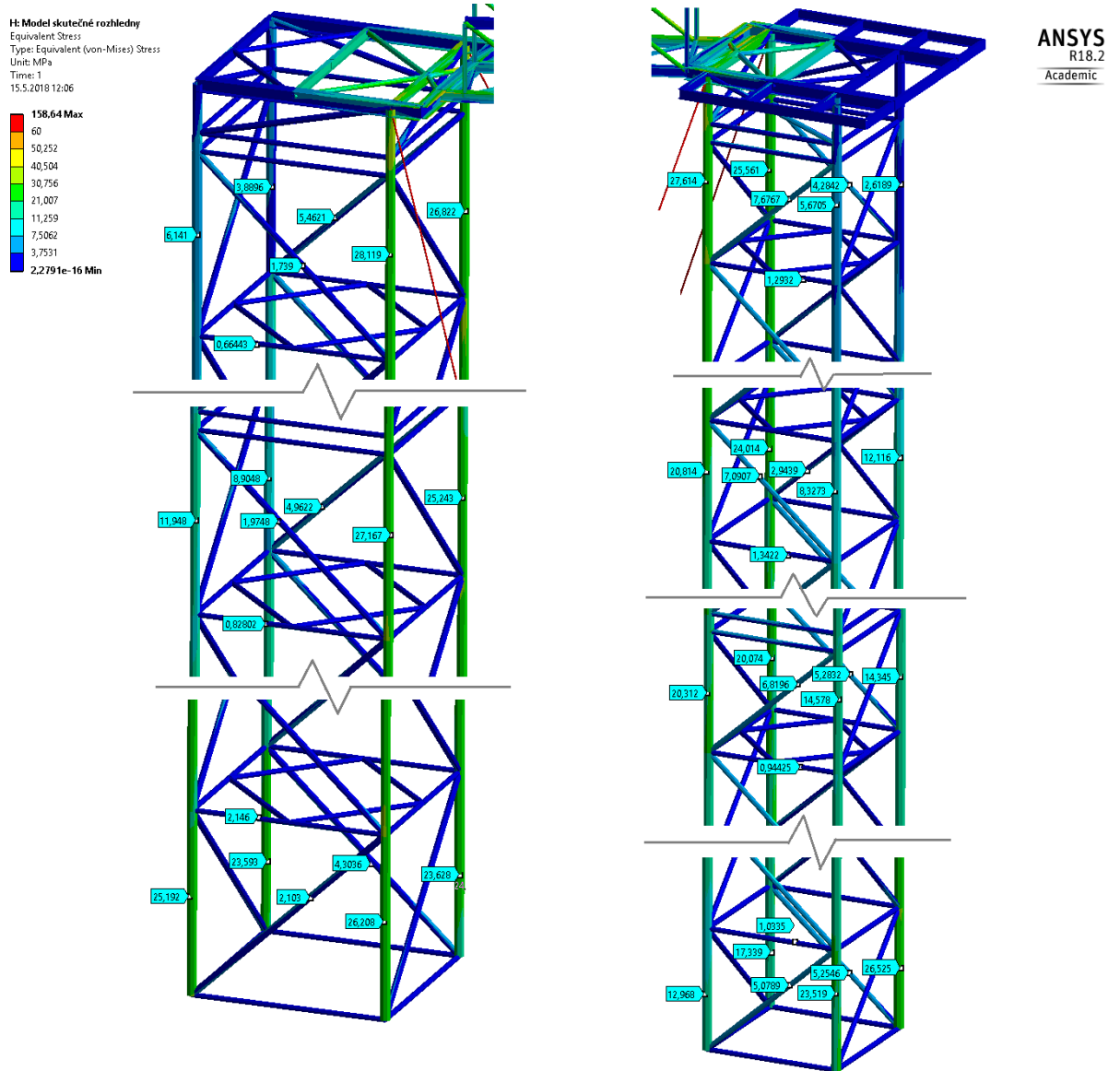
Nejrizikovější místa celé konstrukce jsou na plošinách. Vyosení věží vyvolává nesymetrickou napjatost. Mezi nejvíce namáhané pruty patří ty, které slouží k ukotvení táhel. U takového horizontálního prutu se stejně jako v analytickém modelu mění charakter napjatosti. Z obr. 43 jde také vidět značný rozdíl mezi vertikálními pruty vnitřními a vnějšími.



Obr. 43 Redukované napětí dle teorie HMM na plošinách skutečné konstrukce

3) Věže

Největší zatížení přenáší podle očekávání vertikální pruty obou věží. Za kritická místa je možné považovat nejnižší sekci, která je namáhána tíhou celé konstrukce. Na věži A je patrný rozdíl v napjatosti vnitřních a vnějších vertikálních prutů, kdy stejně jako v analytické části je větší napětí na vnitřní straně. U věže B se podobnost nepotvrdila z důvodu vyosení konstrukcí. Zatížení horizontálních prutu je oproti těm vertikálním zanedbatelné. Výsledky shrnuje obr. 44



Obr. 44 Redukované napětí dle teorie HMM na věžích skutečné konstrukce

ZÁVĚR

V závěru je dobré si opět připomenout hlavní cíle této práce.

- Rešerše a získání vstupních údajů o rozhledně na Hraničním vrchu.
- Úprava topologie rozhledny tak, aby splňovala podmínky kladené na prutovou soustavu.
- Vytvoření zjednodušeného 3D výpočtového modelu prutové soustavy, který odpovídá skutečné konstrukci a zároveň nepřesahuje svou složitostí míru bakalářské práce
- Analýza zatěžujících prvků a vymezení zátěžných stavů.
- Posouzení změny napjatosti a deformace konstrukce rozhledny při změně míry statické neurčitosti uložení analytickým řešením v softwaru Maple.
- Verifikace vybraného analytického výpočtu numerickým řešením v prostředí ANSYS Workbench.

Většina vstupních údajů byla získaná z odborného časopisu Konstrukce pro stavebnictví a strojírenství, konkrétně z článku [3]. Tyto informace byly ověřeny a doplněny vlastním měřením. Nejproblematictější bodem v této části bylo zjištění průřezů horizontálních, vertikálních a diagonálních trubek na původních telekomunikačních věžích. Byla oslovena projekční kancelář Fevia, konkrétně Ing. Martin Krajíček, který nám poskytl nejen potřebné tloušťky trubek, ale také technologický postup napínání táhel, fotografie a další zajímavosti z výstavby rozhledny.

Jelikož se jedná o rozsáhlou konstrukci, bylo rozhodnuto o zjednodušení modelu odebráním opakujících se částí. Ve výpočtech se zkoumalo, jaký vliv na napjatost má míra vnější statické neurčitosti. Byla snaha navrhnout model vnitřně staticky určitý a zároveň zachovat 3D charakter soustavy. Takto vytvořený model obsahuje 60 prostorových styčniců a 174 prutů.

Zatěžujícími prvky jsou vlastní tíha konstrukce, tíha střech, schodiště a zábradlí. Ty byly do výpočtu zahrnuty jako síly v konkrétních styčnicích. Z důvodu kontroly předepnutí táhel bylo nutné soustavu zatížit také ve směru z . Jako zatížení byl zvolen dynamický tlak větru, který byl vypočítán podle studijních materiálů [8]. Důvodem volby právě takového zatížení byl fakt, že rozhledna je postavená v oblasti, kde je základní rychlost větru stanovena normou ČSN EN 1991-1-4 na 27,5 m/s

Celkem byly řešeny 3 zátěžné stavy, které se liší hodnotou vnější statické neurčitosti. Při Z1 bylo zamezeno deformaci ve směru y ve všech spodních styčnicích. Navíc byly přidány podpory ve směru x a z na věži A, u věže B byla umožněna deformace ve směru z . Takovýmto rozložením vazeb byl výpočet $5 \times$ staticky neurčitý. Stav Z2 se oproti Z1 lišil zvýšením statické neurčitosti na 6 právě přidáním podpory F_{hz} k věži B a tím bylo zamezeno deformaci ve všech směrech. Ve stavu Z3 byla řešena situace, kdy se zvýší tuhost konstrukce předepnutím 4 táhel. Toho bylo dosaženo předepsáním vůle $\delta = 2 \text{ mm}$ do každé ze 4 deformačních podmínek a tím vytvoření přepětí okolo 20 kN. Výpočet stavu Z3 byl $10 \times$ staticky neurčitý.

Výpočtem byly zjišťovány bezpečnosti k meznímu stavu pružnosti a meznímu stavu vzpěrné stability. Jako místo největší svislé deformace byl odhadnut styčník SL12 uprostřed lávky.

Bezpečnosti vůči MSP byly ve všech případech nejmenší u prutu L54.

Zátěžný stav	Z1	Z2	Z3
Bezpečnost k MSP (L54)	3,94	3,87	3,88

Bezpečnost k MSVS byla nejmenší u prutu A1a s narůstající statickou neurčitostí klesala.

Zátěžný stav	Z1	Z2	Z3
Bezpečnost k MSVS (A1)	12,68	12	11,3

Svislá deformace styčníku SL12 se ve všech případech pohybovala okolo hodnoty 11,3 mm.

Zátěžný stav	Z1	Z2	Z3
Posuv v styčníku SL12 v mm	11,52	11,27	11,36

Mezi stavy Z1 a Z2 se výrazně změnila napjatost v diagonálách obou věží. Jelikož tyto pruty patří k nejdelším na modelu, tato změna se nejvíce projeví při porovnání výsledku MSVS. Při srovnání Z2 a Z3, tzn. po ukotvení konstrukce táhly, se u 63 % prutů zvýší napjatost. Tento závěr byl předpokládán. Po upnutí je možné předvídat vyšší tuhost konstrukce a vyšší odolnost proti rozkmitání. Toto tvrzení ale není ničím ověřené, protože dynamická analýza v této práci řešena nebyla. Podstatný vliv na deformaci uprostřed lávky neměl žádný z vyšetřovaných stavů.

V poslední řadě bylo nutné analytické výsledky verifikovat metodou konečných prvků. Numerický výpočet byl zpracován v prostředí ANSYS Workbench 18.2. K porovnání byly vybrány hodnoty normálového napětí zátěžného stavu 1. Odchytky metod se v tomto případě pohybovaly v rámci setin MPa a nepřesáhly hodnotu 0,5 %. Tímto závěrem byly splněny hlavní cíle práce.

Za vedlejší cíle je možné považovat vytvoření podrobného návodu na nastavení numerického výpočtu tak, aby bylo možné provést verifikaci. V numerické části je také provedena kontrola vazeb, kde byly nejprve srovnány hodnoty osových sil při variantě uložení zátěžného stavu 2 a varianty vetknutí. Přestože se tyto dva stavy lišily o 36 stupňů statické neurčitostí, jejich výsledky jsou vzájemně porovnatelné. Následuje kontrola předepnutí táhel, při které bylo přidáno zatížení od působícího větru. Byly porovnány hodnoty osových sil v táhlech a největších deformacích ve směru x na modelu.

V poslední části byl vytvořen nový numerický model, kde byla snaha se co nejvíce přiblížit skutečné konstrukci. Ten byl následně porovnáván s modelem analytickým za účelem nalezení společných vlastností. Nejvíce pozornosti bylo věnováno lávce, kde stejně jako u zmenšeného modelu vyšla nejmenší bezpečnost u krajních diagonál. Shodovaly se také průběhy napětí u horních i spodních podélníků. Na věžích byly nejvíce ovlivněny ty pruty, do kterých se kotví táhla.

V závěru je možné konstatovat, že i přes značná zjednodušení nám analytický výpočet zjednodušeného modelu poskytl důležité informace o nejvíce namáhaných prutech konstrukce. Při výpočtu konkrétních hodnot napětí a bezpečností by řešitel doporučil použít numerický software, ve kterém je práce mnohonásobně rychlejší a dovoluje řešit daleko náročnější a komplexnější úlohy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOUZA, Jan. *Rozhledny Čech, Moravy a Slezska*. Vyd. 1. Liberec: Nakladatelství 555, 1999. ISBN 8090259049.
- [2] *Rozhledna Hraniční vrch* [online]. b.r. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.mesto-albrechtice.cz/navstevnik/rozhledna-hranicni-vrch/>
- [3] LUKÁŠEK, Michal. Rozhledna Hraniční vrch, Město Albrechtice: přestavba anténních věží na rozhlednu. *Časopis KONSTRUKCE: informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství* [online]. 2012 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rozhledna-hranicni-vrch-mesto-albrechtice-prestavba-antennich-vezi-na-rozhlednu/>
- [4] FLORIAN, Zdeněk, Emanuel ONDRÁČEK a Karel PŘIKRYL. *Mechanika těles: statika*. Vyd. 7., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 9788021434400.
- [5] JANÍČEK, Přemysl. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 3., přeprac. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-x.
- [6] HORNÍKOVÁ, Jana. *Pružnost a pevnost: Interaktivní učební text*. 1. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-268-8.
- [7] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, Miloš VLK, ed. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.
- [8] ŠVAŘÍČKOVÁ, Ivana. *Studijní materiály: zatížení větrem* [online]. b.r. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/BZK/svarickova.i/pdf/BL05/zatizeni%20vetrem.pdf>
- [9] PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II* [online]. b.r. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2499>
- [10] TOMEK, Lukáš. Rovinná priehradová konštrukcia (LINK180). In: *Youtube* [online]. b.r. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Un7dsz4zI2U>
- [11] SIMUTECH GROUP, . How to change BEAM188 Line Bodies into LINK180 Elements in ANSYS Mechanical Workbench. In: *Youtube* [online]. b.r. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KYtrufszGM8&t=371s>
- [12] *ANSYS Mechanical HELP*. b.r.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
v	Použitelné statické podmínky	
μ_A	Neznámé parametry	
p	Počet prutů	
k	Počet styčníků	
A	Matice koeficientů	
x	Matice neznámých parametrů	
b	Matice vnějšího zatížení	
ε	Délkové přetvoření	
γ	Úhlové přetvoření	
T_ε	Tenzor přetvoření	
T_σ	Tenzor napětí	
E	Yangův modul pružnosti	<i>MPa</i>
G	Modul pružnosti ve smyku	<i>MPa</i>
A	Deformační práce síly	
W	Energie napjatosti	
u	posuv	<i>mm</i>
φ	natočení	<i>rad</i>
σ	napětí	<i>MPa</i>
Re	Mez kluzu	<i>MPa</i>
K_k	Bezpečnost MSP	
F	Osová síla	<i>N</i>
F_v	Kritická síla vzpěru	<i>N</i>
λ	Štíhlost prutu	
λ_k	Kritická štíhlost prutu	
J	Kvadratický moment	<i>mm⁴</i>
α	Součinitel vazby	
K_v	Bezpečnost MSVS	
$v_{b,0}$	Výchozí základní rychlost větru	<i>m/s</i>
v_b	Základní rychlost větru	<i>m/s</i>
C_{dir}	Součinitel směru větru	
C_{season}	Součinitel ročního období	
q_b	Základní tlak větru	
v_m	Střední rychlost větru	<i>m/s</i>
C_r	Součinitel drsnosti terénu	
C_o	Součinitel ortografie	
k_r	Součinitel terénu	
Z_0	Parametr drsnosti terénu	
Z_{min}	Minimální výška	<i>m</i>
I_v	Intenzita turbulence	
K_1	Součinitel turbulence	
M1-M24, A1-A29	Pruty na věži A	
N1-N38, B1-B29	Pruty na věži B	
L1-L56	Pruty na lávce	
SM1-SM20	Styčnický na věži A	
SN1-SN24	Styčnický na věži B	

SL1-SL16	Styčníky na lávce	
FgM1-FgM20	Tíhová síla styčnicků SM1-Sm20	<i>N</i>
FgSCH	Tíha schodiště	<i>N</i>
DP1-DP10	Deformační podmínky	
Fdoplň	Doplňková síla	
v	Deformace ve směru y	<i>mm</i>
δ	Vůle v táhlech	<i>mm</i>
K	Celková matice tuhosti	
U	Matice neznámých parametrů	
F	Matice vnějšího zatížení	
Z1	Zátěžný stav 1	
Z2	Zátěžný stav 2	
Z3	Zátěžný stav 3	
MSP	Mezní stav pružnosti	
MSVS	Mezní stav vzpěrné stability	
MKP	Metoda konečných prvků	

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Původní telekomunikační věže [2]*
- Obr. 2 Nově postavená rozhledna Hraniční vrch [2]*
- Obr.3 Prutová napjatost [5]*
- Obr. 4 Příklady uvolnění VVÚ [6]*
- Obr. 5 Deformace elementárního prvku prostým tahem [6]*
- Obr. 6 Jednoosá napjatost tahová a tlaková na Elementární krychli a v Mohrově rovině [5]*
- Obr. 7 Deformace kostky tahem [6]*
- Obr. 8 Podmínka MS pružnosti [5]*
- Obr.9 Závislost tlakové síly na průhybu prutu [6]*
- Obr.10 Závislost tlakového napětí na štihlosti prutu pro křehký a tvárný materiál [6]*
- Obr.11 Mapa větrných oblastí na území ČR [8]*
- Obr. 12 Model prutové soustavy věže A*
- Obr. 13 Model prutové soustavy věže B*
- Obr. 14 Model prutové soustavy lávky*
- Obr. 15 Tiha na styčnick SM6*
- Obr.16 Střecha [2]*
- Obr. 17 Schodiště [2]*
- Obr. 18 Částečné uvolnění Z1*
- Obr. 19 Nejkritičtější místa MSP při Z1*
- Obr. 20 Nejkritičtější místa MSVS při Z1*
- Obr. 21 Pruty podílející se na deformaci styčnicku SL12*
- Obr. 22 Částečné uvolnění Z2*
- Obr. 23 Nejkritičtější místa MSP při Z2*
- Obr. 24 Nejkritičtější místa MSVS při Z2*
- Obr. 25 Změna napjatosti mezi stavy Z1 a Z2*
- Obr. 26 Model prutové soustavy při zátěžném stavu 3*
- Obr. 27 Částečné uvolnění Z3*
- Obr. 28 Nejkritičtější místa MSP při Z3*
- Obr. 29 Nejkritičtější místa MSVS při Z3*

- Obr. 30 Změna napjatosti mezi stavy Z2 a Z3*
- Obr. 31 Tvorba geometrie v Design Modeleru 1*
- Obr. 32 Tvorba geometrie v Design Modeleru 2*
- Obr. 33 Tvorba geometrie v Design Modeleru 3*
- Obr. 34 Nastavení sítě v ANSYS MECHANICAL*
- Obr. 35 Změna prvku BEAM na LINK180*
- Obr. 36 Nastavení výstupu v ANSYS MECHANICAL*
- Obr. 37 Normálové síly po vetknutí prutové soustavy*
- Obr. 38 Maximální posuv ve směru z při zatížení větrem na variantě bez lan*
- Obr. 39 Maximální posuv ve směru z při zatížení větrem na variantě s lany*
- Obr. 40 Reálný model konstrukce rozhledny Hraniční vrch*
- Obr. 41 Svislá (y) deformace rozhledny po předepnutí táhel*
- Obr. 42 Redukované napětí dle teorie HMM na lávce skutečné konstrukce*
- Obr. 43 Redukované napětí dle teorie HMM na plošinách skutečné konstrukce*
- Obr. 44 Redukované napětí dle teorie HMM na věžích skutečné konstrukce*

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Součinitel α pro různé vazby [6]

Tab. 2 Kategorie terénu [8]

Tab. 3 Úhly vyskytující se na konstrukci

Tab. 4 Přehled profilů použitých na modelu

Tab. 5 Hodnoty maximálního dynamického tlaku vzduchu v závislosti na výšce nad povrchem

Tab. 6 Hodnoty sil od dynamického tlaku větru

Tab. 7 Výsledky zátěžného stavu 1

Tab. 8 Výsledky zátěžného stavu 1 pro MSVS

Tab. 9 Výsledky zátěžného stavu 2

Tab. 10 Výsledky zátěžného stavu 2 pro MSVS

Tab. 11 Výsledky zátěžného stavu Z3

Tab. 12 Výsledky zátěžného stavu 2 pro MSVS

Tab. 13 Verifikace zátěžného stavu 1

Tab. 14 Srovnání hodnot posuvů

Tab. 15 Odchyšky

Tab. 16 Srovnání osových sil v táhlech stavu Z3

Tab. 17 Srovnání vybraných osových sil stavu Z2 a vetknutí

Tab. 18 Změna normálových sil v táhlech po zatížení větrem

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Rovnice analytického modelu	Maple
Příloha 2	Zátěžný stav 1	Maple
Příloha 3	Zátěžný stav 2	Maple
Příloha 4	Zátěžný stav 3	Maple
Příloha 5	Výsledky Z1, Z2, Z3	MS Excel
Příloha 6	Verifikace analytického modelu	ANSYS 19.0
Příloha 7	Numerický model rozhledny	ANSYS 18.2