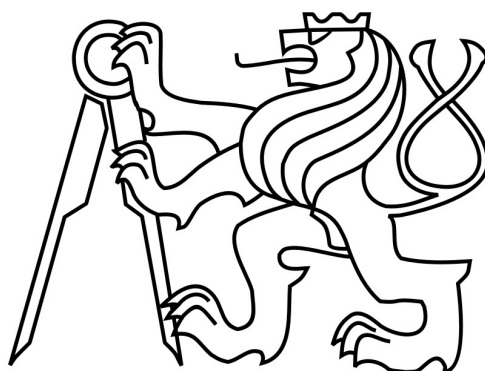


# České vysoké učení technické v Praze

## Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



Diplomová práce



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**

**Technologie zesílení ocelových obloukových mostů při výsunu**

**Technology of arch steel bridges erection strengthening**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

**Bc. Adam Burjan**

---

**Praha 2017**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Burjan Jméno: Adam Osobní číslo: 396495

Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Technologie zesílení ocelových obloukových mostů při výsunu

Název diplomové práce anglicky: Technology of arch steel bridges erection strengthening

Pokyny pro vypracování:

Variantské řešení různých zesílení oblouku při výsunu, s výpočetní analýzou a návrhem a posouzením provizorních prvků, a to zejména se zaměřením na chování táhel, ve variantě zesílení oblouku, zesílení táhel proti vybočení a nezesílení. Analyzovat chování táhel při ztrátě stability GNIA analýzou. Zpracování výkresové dokumentace pro nejefektivnější varianty zesílení.

Seznam doporučené literatury:

Ryjáček, P.: Moderní technologie výstavby ocelových mostů. 2014

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 22.2.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017

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

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)





Prohlašuji, že jsem tuto předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Bc. Adam Burjan

.....

podpis

15. května 2017



Rád bych poděkoval doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a odborné vedení při zpracování této diplomové práce. Také bych poděkoval Ing. Vladanu Michalíkovi z firmy MCE Slaný za cenné rady a poskytnutí výkresů.



Technologie zesílení ocelových obloukových  
mostů při výsunu

Technology of arch steel bridges erection  
strengthening

**Anotace:**

Předmětem diplomové práce je zkoumání chování obloukového mostu s dolní mostovkou během montáže. Varianty řešení zesílení oblouku a táhel během výsunu, návrh a posouzení provizorních prvků. GNIA analýza chování táhel při ztrátě stability Diplomová práce je doplněna řešením jiných postupů montáže.

**Klíčová slova:** *obloukový most, podélný výsun, montáž, nelineární analýza táhel*

**Abstract:**

The subject of this master thesis is to investigate the behavior of the tied-arch bridge during assembly. Variants of arc and tile reinforcement solutions during the assignment, design and assessment of temporary elements. Nonlinear analysis of tackling behavior in the loss of stability. The thesis is supplemented by research of other assembly procedures.

**Keywords:** *Arch Bridge, Erection, Assembly, Nonlinear Analysis of Tile*

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>15</b>
<b>2 Cíle práce .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Obloukové mosty .....</b>	<b>15</b>
3.1 Obloukové mosty s dolní mostovkou.....	16
<b>4 Metody montáže obloukového mostu s dolní mostovkou .....</b>	<b>18</b>
4.1 Bloková montáž jeřábem.....	18
4.2 Podélný výsun za pomoci kolového podvozku .....	19
4.3 Podélný výsun za pomoci nosu .....	21
4.4 Montáž za pomoci lodní dopravy.....	23
4.5 Podélný výsun s podporou jeřábu .....	24
4.5.1 Popis konstrukce .....	25
4.5.2 Popis výsunu .....	25
4.5.3 Numerický model výsunu obloukového mostu.....	27
4.5.3.1 Prvky a jejich průřezy .....	27
4.5.3.2 Podpůrná konstrukce oblouku během výsunu.....	34
4.5.3.3 Fáze výstavby .....	39
4.5.4 Výsledky.....	43
<b>5 Návrh podpůrné konstrukce .....</b>	<b>49</b>
5.1 Úprava numerického modelu .....	49
5.2 Rozhodující fáze.....	50
5.3 Příčné ztužení pro všechny varianty.....	58
5.4 Deskostěnový numerický model .....	60
5.4.1 Popis .....	60
5.4.1.1 Hlavní nosník, mostovka a výsuvná stolice .....	60
5.4.1.2 Táhlo.....	62
5.4.1.3 Oblouk.....	63
5.5 Imperfekce.....	63
5.6 Studie napětí v závislosti na počáteční imperfekci táhla.....	64
5.6.1 Nastavení řešiče a zadání imperfekcí .....	65
5.7 Únosnost táhla .....	66
5.8 Návrhy ztužení oblouku a táhel.....	72
5.8.1 VJ1 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 160.....	73
5.8.1.1 Model .....	73
5.8.1.2 Výsledky.....	75
5.8.1.3 Únosnost.....	75
5.8.2 VJ2 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 220.....	81

5.8.2.1	Model .....	82
5.8.2.2	Výsledky.....	84
5.8.2.3	Únosnost.....	84
5.8.3	VJ3 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 300.....	89
5.8.3.1	Model .....	90
5.8.3.2	Výsledky.....	91
5.8.3.3	Únosnost.....	92
5.8.4	Shrnutí výsledků ze zesílení HEA 160, HEA 220 a HEA 300 .....	96
5.8.5	VJ2.1 – Upravení varianty ztužení táhel nosníky HEA 220 .....	97
5.8.5.1	Model .....	98
5.8.5.2	Výsledky.....	99
5.8.6	VJ4 – Ztužení táhel přidáním stojek k táhlům .....	108
5.8.6.1	Model .....	108
5.8.6.2	Výsledky.....	111
5.8.7	VJ5 – Ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení.....	112
5.8.7.1	Model .....	112
5.8.7.2	Výsledky.....	114
5.8.8	Shrnutí výsledků.....	115
5.9	Kombinace variant .....	115
5.9.1	VS1 – Varianta 1 .....	115
5.9.1.1	Model .....	116
5.9.1.2	Výsledky.....	117
5.9.1.3	Seznam prvků.....	120
5.9.2	VS2 – Varianta 2 .....	121
5.9.2.1	Model .....	122
5.9.2.2	Výsledky.....	123
5.9.2.3	Seznam prvků.....	124
5.9.3	VS3 – Referenční varianta PÍŽMO .....	124
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>125</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>128</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>130</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>131</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>137</b>



## Seznam použitých symbolů

$\sigma_{\perp}$	[MPa]	normálové napětí kolmé na účinný rozměr svaru
$\sigma_M$	[MPa]	normálové napětí ve svaru vyvolané ohybovým momentem
$\tau_{\parallel}$	[MPa]	smykové napětí rovnoběžné s osou svaru
$\tau_{\perp}$	[MPa]	smykové napětí kolmé na osu svaru
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha průřezu
$a$	[mm]	tloušťka koutového svaru
$A_s$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha dřívku šroubu
$d$	[mm]	výška stojiny
$E$	[MPa]	Youngův modul pružnosti
$e_0$	[mm]	počáteční imperfekce prutu
$E_s$	[MPa]	Youngův modul pružnosti oceli
$F_{Ed}$	[kN]	návrhová síla
$F_{p,C}$	[kN]	předpínací síla
$F_{s,Rd}$	[kN]	návrhová únosnost šroubu při prokluzu v mezním stavu únosnosti
$f_u$	[MPa]	mez pevnosti oceli
$f_{ub}$	[MPa]	mez pevnosti šroubu
$F_x$	[kN]	síla ve směru x
$f_y$	[MPa]	mez kluzu oceli
$F_y$	[kN]	síla ve směru y
$F_z$	[kN]	síla ve směru z
$i_y$	[mm]	poloměr setrvačnosti k ose y
$I_y$	[mm <sup>4</sup> ]	moment setrvačnosti k ose y
$I_z$	[m <sup>4</sup> ]	moment setrvačnosti k ose z
$k_s$	-	součinitel závislý na tvaru otvoru u třecích šroubů
$L$	[m]	délka táhla
$L_{cr}$	[m]	kritická délka
$M_y$	[kNm]	ohybový moment kolem osy y
$n$	-	počet třecích ploch
$N_{b,,Rd}$	[kN]	vzpěrná únosnost
$N_{cr}$	[kN]	kritická síla při vybočení prutu
$N_{Ed}$	[kN]	návrhová normálová síla

$\sigma_y^+$	[MPa]	napětí na kladném povrchu plošného prvku v Scia Engineer
$t_w$	[mm]	tloušťka stojiny
$u_0$	[mm]	horizontální posun bodu v polovině výšky táhla
$u_1$	[mm]	horizontální posun horního bodu na táhlu
$u_2$	[mm]	horizontální posun dolního bodu na táhlu
$U_y$	[mm]	vodorovné posunutí v softwaru Scia Engineer
$W_y$	[mm <sup>3</sup> ]	pružný průřezový modul svaru
$\beta_w$	-	korelační součinitel
$\gamma_{m1}$	-	dílčí součinitel spolehlivosti
$\gamma_{m2}$	-	návrhový součinitel
$\gamma_{m3}$	-	dílčí součinitel spolehlivosti
$\mu$	-	součinitel tření
$\pi$	-	Ludolfovo číslo
X (chý)	-	součinitel vzpěrnosti

# 1 Úvod

Montáž mostu je stejně důležitá jako jeho návrh. Mnohdy rozhoduje o hospodárnosti stavby a také o realizaci dané konstrukce. U obloukového mostu to platí též. Tato diplomová práce si dává za cíl zkoumat a popsat chování obloukového mostu s dolní mostovkou během montáže a pomoci tak při dalším navrhování. Špatný návrh montáže může vést k ekonomickým ztrátám nebo případně ke ztrátám na životech.

## 2 Cíle práce

Cílem práce je návrh různých variant ztužení obloukového mostu během výsunu. Návrh se soustředí na vyšetření a posouzení tlačných táhel během výsunu. Nejdříve se najde nejhorší zatěžovací stav pro nejdelší táhlo. V tomto stavu se odzkouší varianty s použitím jednoho typu prvku ztužení, aby se zjistila jeho efektivita. Tento stav bude sloužit k vytvoření modelu únosnosti, kde vyšetříme únosnost tlačného táhla v závislosti na počáteční imperfekci a ztužení.

Z těchto dat následně vzniknou výsledné varianty, které v sobě budou kombinovat předtím navržené prvky z jednoduchých variant. K nejuvhodnější variantě bude vytvořena výkresová dokumentace, která je součástí této diplomové práce.

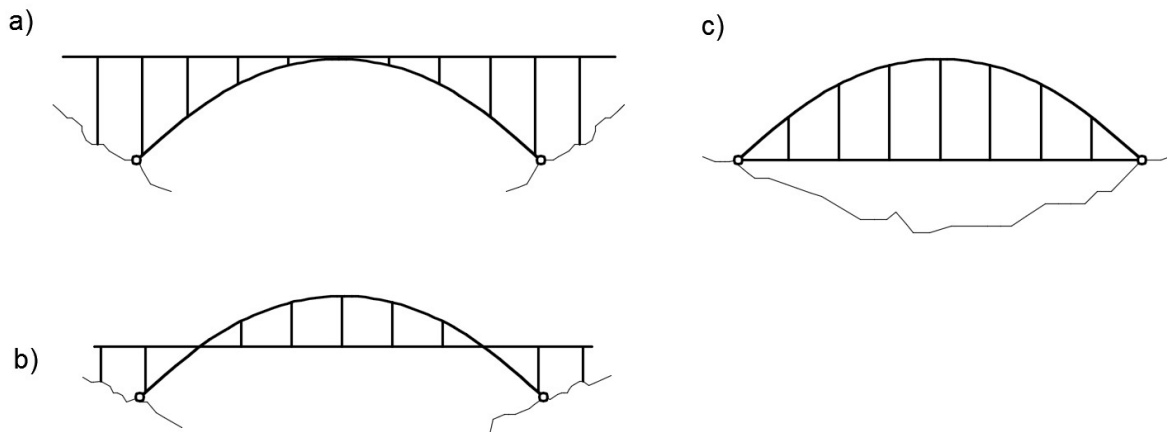
## 3 Obloukové mosty

Obloukový most je stavební konstrukce, která se skládá z mostovky, nosného oblouku a stojek nebo táhel. Obloukové mosty mohou být použity na kratší, ale i delší rozpětí až 500 m. Takové mosty jsou pak dominantou místa a určují jeho charakter. Uplatnění podle druhu dopravy je široké. Lze je použít na lávky pro pěší, na silniční mosty všech typů komunikací a také pro železniční dopravu.

Mezi obloukové mosty s největším rozpětí řadíme most Lupu v Číně (rozpětí 550 m) [1]. V Česku je nejznámější Žďákovský most v jižních Čechách nad Orlickou přehradou (rozpětí 330 m) [2]. Dalšími příklady ocelových obloukových mostů jsou Trojský most v Praze nebo most Apollo v Bratislavě.

Obloukové mosty můžeme dělit podle statického uspořádání, konstrukce oblouku, tuhosti oblouku a trámu nebo polohy mostovky a oblouku.

Podle polohy mostovky a oblouku rozlišujeme most s horní mostovkou, mezilehlou mostovkou a dolní mostovkou (Obr. 1). Obloukové mosty s horní mostovkou jsou vhodné pro přemostění úzkého a hlubokého údolí, kde je možné přenést vodorovné síly z konstrukce do základů oblouku. Naopak obloukový most s dolní mostovkou se používá v plochém údolí. Jeho velkou výhodou je též malá stavební výška.

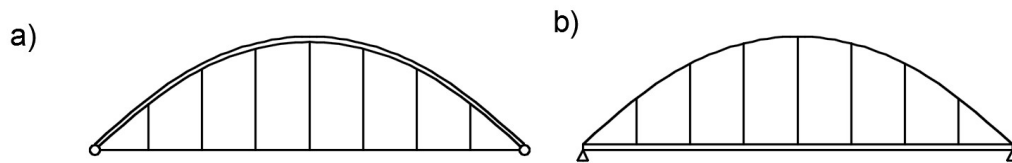


Obr. 1 a) obloukový most s horní mostovkou b) obloukový most s mezilehlou mostovkou  
c) obloukový most s dolní mostovkou [3]

Tato diplomová práce se zabývá montáží mostů s dolní mostovkou, proto se další část zabývá jen obloukovými mosty s dolní mostovkou.

### 3.1 Obloukové mosty s dolní mostovkou

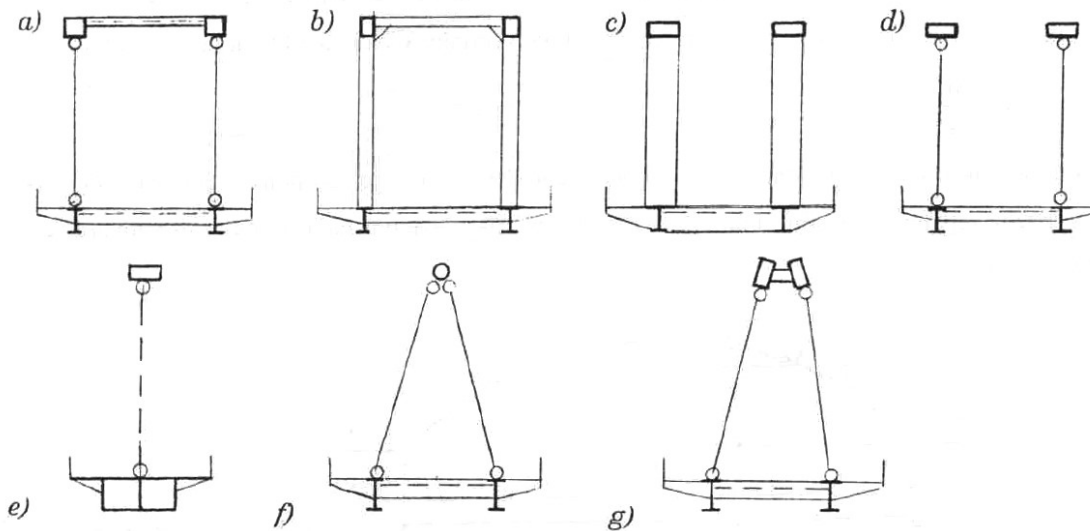
Rozlišujeme dva typy mostů s dolní mostovkou. První je případ, kdy je oblouk tužší než trám. To znamená, že mostovka je zavěšena přes táhla na oblouku. Vznikají tak vodorovné síly v základech. Druhou možností je tzv. Langerův trám, při kterém je trám mnohem tužší a přenáší i tahovou sílu od oblouku.



Obr. 2 a) obloukový most s dolní mostovkou b) Langerův trám [3]

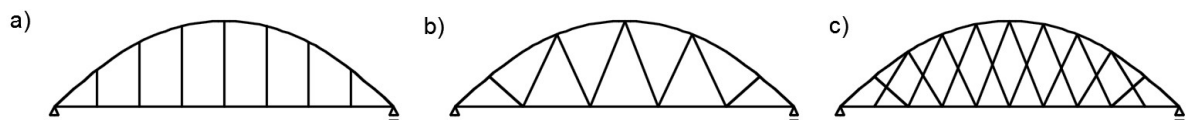
Vzepětí k rozpětí oblouku se pohybuje mezi 1:5 a 1:7. Výška trámu je  $L/25$  až  $L/50$ . Tvar oblouku se obvykle navrhuje jako parabola. Oblouk může být tvořen buď příhradovým nebo plnostěnným nosníkem. Výška tohoto nosníku bývá mezi  $L/50$  až  $L/80$ . [3]

Rovina oblouku s táhly může být kolmá, ukloněná, anebo jenom jedna uprostřed příčného řezu mostu. Táhla mohou být lana, tyče nebo nosníky klasických průřezů jako trubky nebo úhelníky. Obvykle se používá ortotropní mostovka na příčnicích. Hlavní trám buď tvoří dva otevřené I průřezy nebo komorový nosník. Příklady příčných řezů jsou vidět na (Obr. 3)



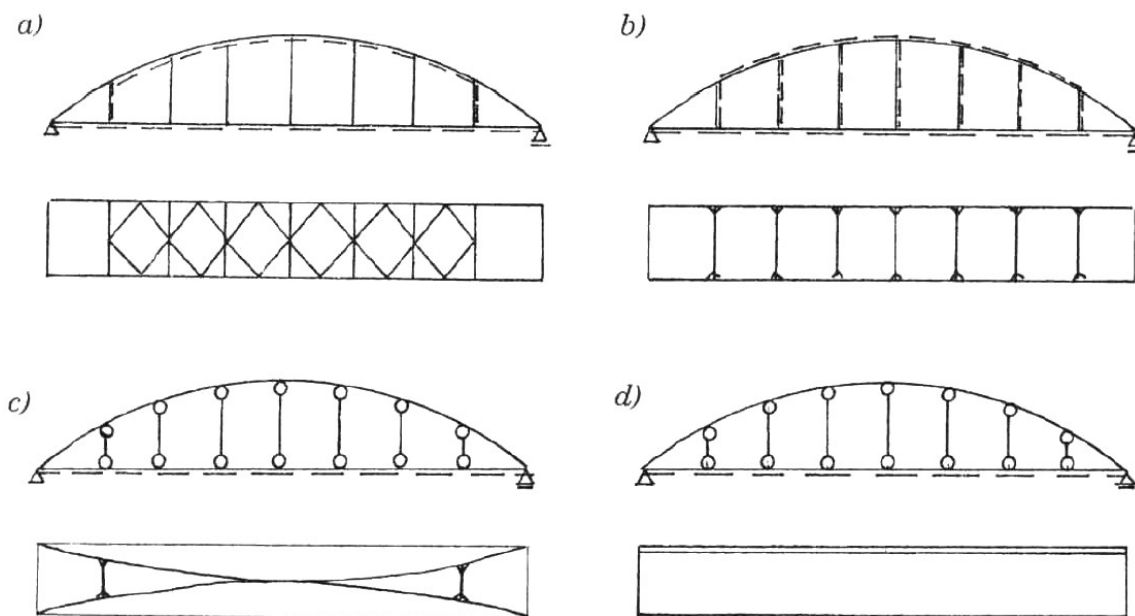
Obr. 3 Příčné řezy obloukovým mostem s dolní mostovkou [3]

Soustava táhel může být svislá, šikmá nebo se použije síťový oblouk (Obr. 4).



Obr. 4 a) svislá táhla b) šikmá táhla c) síťový oblouk [3]

Hlavní ztužidlo se umísťuje do mostovky. Poté je nutné zabránit vybočení oblouku z roviny. Proto umístíme ztužidlo do horní roviny oblouku. Můžeme použít příhradové nebo rámové ztužidlo. Jinou možností je přiblížit oba oblouky k sobě, a tím získat tužší konstrukci.



Obr. 5 a) příhradové ztužení b) rámové ztužení c) uklonění oblouků [3]

## 4 Metody montáže obloukového mostu s dolní mostovkou

První způsob montáže je ten, při kterém se sestavuje v definitivní poloze mostu. Druhým způsobem je montáž celého mostu do definitivní polohy, kdy se konstrukce sestaví mimo definitivní polohu a pak se do ní přemístí. Poté se most musí doplnit o vozovku, kolejové lože, mostní vybavení atd.

### 4.1 Bloková montáž jeřábem

Bloková montáž je, když se jednotlivé části mostu anebo celý most (krátká rozpětí) přesunou do své definitivní polohy za pomoci jakéhokoliv jeřábu. Pro krátké rozpětí se přiveze hotový most z mostárny, například po silnici, a poté se usadí jeřábem. Pokud se montují jednotlivé bloky tak lze nejdříve sestavit oblouk a pak zavěsit mostovku nebo nejdřív mostovku a nad ní vztyčit oblouk a přidat závěsy.

Příkladem tohoto způsobu montáže je Trojský most v Praze přes Vltavu. Rozpětí obloukového mostu je 200,4 m. Na most se ještě napojuje inundační železobetonový most na trojském břehu. Most byl postaven pro pěší, silniční, ale i tramvajovou dopravu. Nahradil zde tramvajový most.

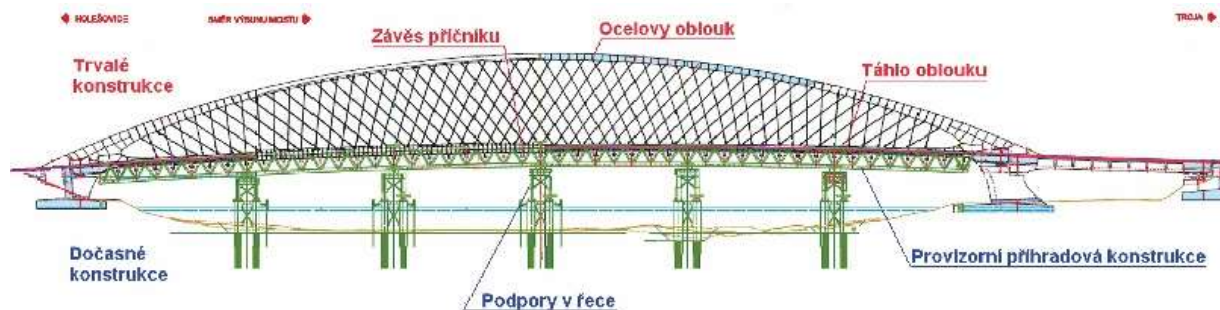
Most se skládá z železobetonové mostovky předepnuté v příčném a podélném směru., která se sestává ze dvou podélných nosníků a prefabrikovaných železobetonových příčníků. Mostovka je připojena k oblouku táhly o průměrech od 76 mm až 105 mm z oceli S520. Materiál oblouku je ocel S420 a S355. Roviny závěsů jsou k sobě ukloněné, tak na místo dvou oblouků přechází v jeden přibližně ve čtvrtině.

Montáž (Obr. 6) započala uložením podpor do řeky. Jako pomocná podpora byla navržena konstrukce z velkopřůměrových silnostěnných trubek, které se ve všech směrech zavětrovaly.

Na dočasné podpory se z holešovického břehu vysunula železobetonová mostovka. V další části se namontovaly zárodky oblouků za pomoci jeřábu. Poté se mohla vybetonovat a předepnout mostovka.

Následovala montáž oblouku. Z mostárny se přivezlo 28 výrobních dílců o hmotnostech od 43 až po 83 tun. Z těchto dílců se poté na mostě sestavily větší části oblouku. Postavilo se také pět párů věží PIŽMO, které sloužily k zvednutí montážních podsestav. Nejdříve se zvedly montážní dílce u zárodků a poté vnitřní části oblouku. Postupně se pak všechny dílce svařily k sobě.

Stačilo už jen přidat a předepnout 200 ks táhel Macalloy a most byl hotov. [4]



Obr. 6 Trojský most – montáž [4]

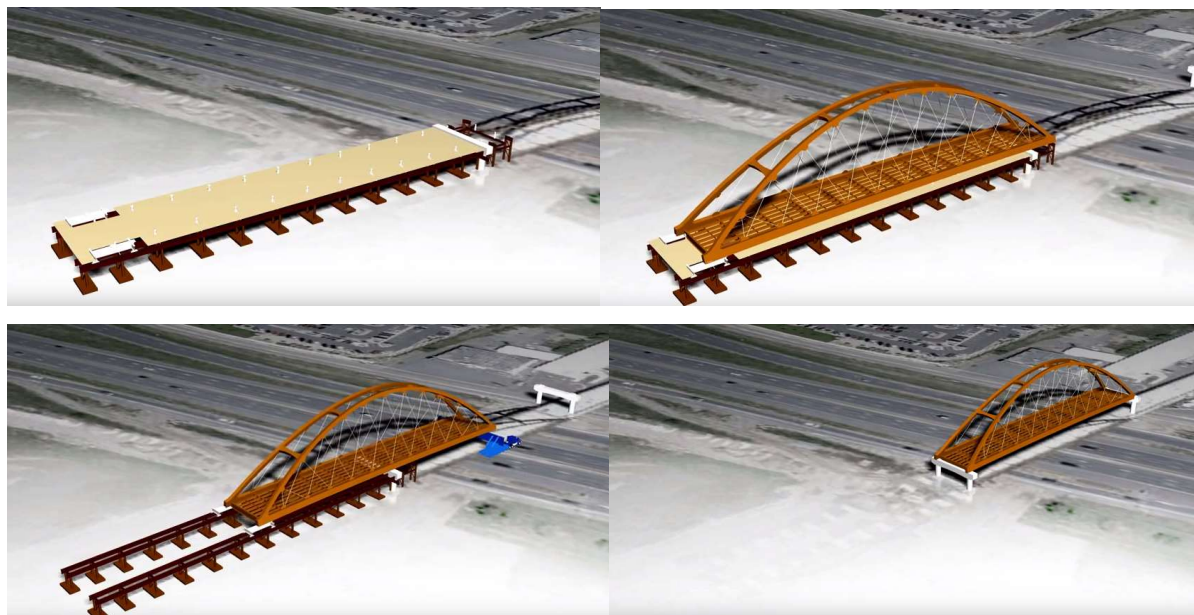
## 4.2 Podélný výsuv za pomoci kolového podvozku

Další metoda montáže je za pomoci kolového podvozku. Jde o způsob, kdy se mostní konstrukce sestaví mimo definitivní uložení. Z tohoto místa se konstrukce přesouvá na místo určení pomocí kolového podvozku. Příkladem takové montáže je železniční most v Denveru

v americkém státě Colorado (6th Avenue Arch Bridge). Most překonává dálnici na okraji města. Jedná se o první použití tohoto typu montáže na takovém mostě ve Spojených státech Amerických.

Je to obloukový most s dolní mostovkou s ukloněnou rovinou závěsů, které tvoří síťový oblouk. Rozpětí obloukového mostu je 81,2 m. Mostovka je ocelová ortotropní. Materiál konstrukce je patinující ocel z důvodu ušetření nákladů během provozu mostu. Celkově má mostní konstrukce pět polí. Vedlejší pole se skládají z trémových mostů o rozpětí 24,7 m. Trémový most je tvořen předpjatými betonovými nosníky s T-průřezem [5]. Hmotnost ocelové konstrukce je 600 tun [6].

Mostní konstrukce byla sestavena v předpolí mostu na podpůrné konstrukci, která bude po montáži odstraněna. Konec, na kterém nebude umístěna kolová podvozková konstrukce, je uložen na kolejových podvozcích. Tyto podvozky pojedou po dráze, která je součástí podpůrné konstrukce. Po kompletaci mostovky, oblouků a táhel v předpolí se jedna strana naložila na kolovou podvozkovou konstrukci a začala se přesouvat. Dálnice se musela před začátkem posunu uzavřít. Přesun konstrukce na konečné umístění trval 14 hodin. Průběh montáže je vidět na (Obr. 7).



*Obr. 7 Montáž za pomoci kolového podvozku [7]*

Přesouvaná konstrukce byla uložena na kolové konstrukci (Obr. 8), která se skládá ze dvou osmi nápravových přívěsů. Na ně je pak uložen plnostěnný nosník, na kterém leží přesouvaná konstrukce. Tyto podvozky mohou vyrovnávat nerovnosti a držet rovinu výsunu. Hlavní tažnou silou tady byl hydraulický lis.



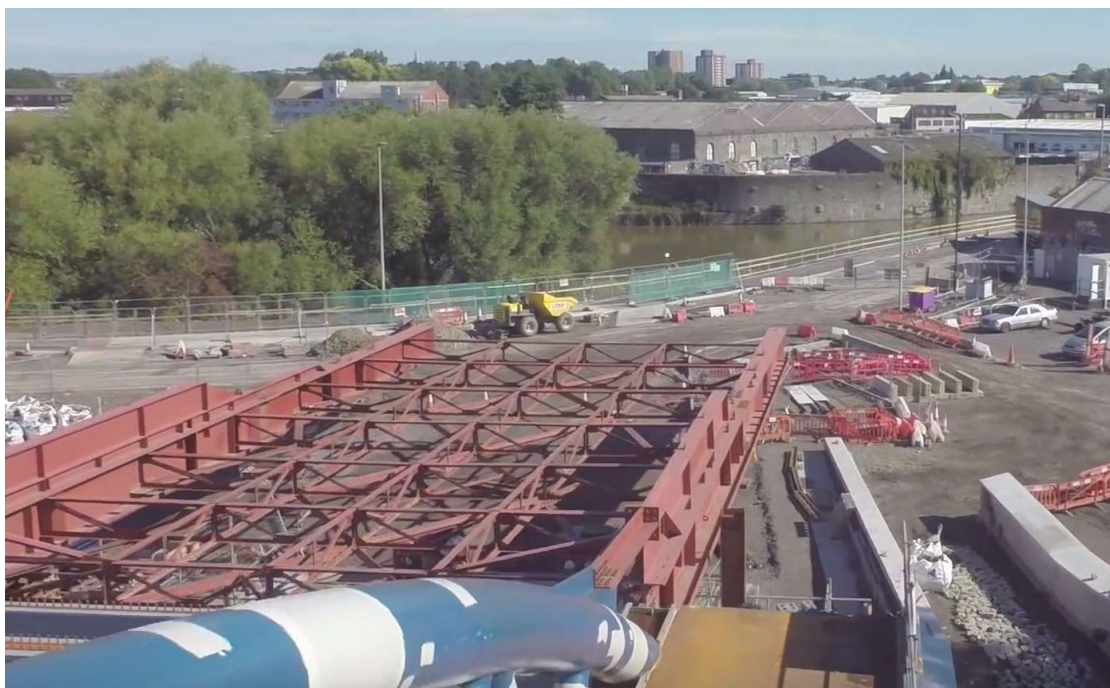


*Obr. 8 Konstrukce pro podepření mostu při přepravě [5]*

### **4.3 Podélný výsuv za pomoci nosu**

Podélný výsuv za pomoci nosu se používá hlavně u trámových mostů, aby se ušetřilo na materiálu, protože stavba dočasné podpůrné konstrukce od země je nevhodná. Příkladem podélného výsuvu obloukového mostu za pomoci nosu je Arena Island Bridge v britském Bristolu přes řeku Avon. Most má rozpětí 63,0 m a šířku 18,0 m. Jedná se o silniční most s prostorem pro cyklisty a chodce na obou stranách v šířce 3,5 m. Hmotnost konstrukční oceli je 820 tun a cena celé konstrukce je 11 milionu liber. [8]

Obloukový most s dolní mostovkou má oblouky a táhla složeny z uzavřených kruhových profilů. Mostovka je spřažená ocelobetonová, tj. železobetonová deska a ocelové příčníky. Výsuvný nos je ze dvou plnostěnných nosníků a mezi nimi je příhradové ztužení. Nos má přibližně délku o něco větší než polovina rozpětí.



*Obr. 9 Nos pro výsun [9]*

Montáž probíhala následovně. Nejdříve se mostní konstrukce sestavila na břehu. Betonová deska mostovky se vybetonovala až po přesunu mostu. Poté se konstrukce dala do pohybu za pomoci hydraulických lisů. V polovině výsunu se nos uložil na podpory na protějším břehu. Poté se most posunul až na konec. Během výsunu byla snížena hladina řeky Avony.



*Obr. 10 Výsun mostu přes řeku Avon [9]*

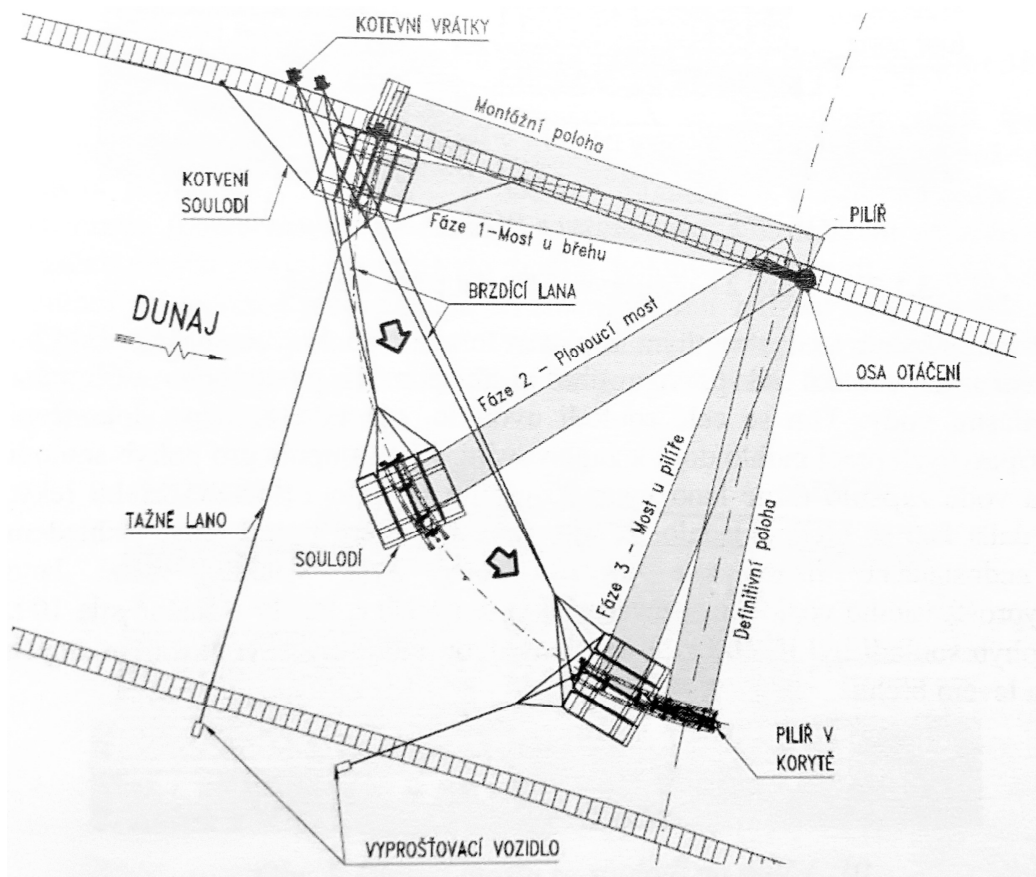
#### 4.4 Montáž za pomoci lodní dopravy

Montáž za pomoci lodní dopravy je taková, kdy se použije plavidlo k přepravě mostní konstrukce. Takovým příkladem je most Apollo přes řeku Dunaj v Bratislavě. Jedná se o silniční most délky 517,5 m, jehož hlavní pole je obloukový most s dolní mostovkou. Oblouky jsou k sobě ukloněny a ocelová mostovka je ortotropní. Rozpětí obloukového mostu je 231,0 m. [10]



*Obr. 11 Otáčení mostu Apollo [11]*

Obloukový most byl nejdříve sestaven na levém břehu Dunaje. Poté se začal otáčet kolem levobřežního ložiska na své konečné místo (Obr. 11 a Obr. 12). Nejdříve se musel posouvatý okraj přesunout na soulodí, na kterém pak byl uložen až k doražení k pilíři. Při přesunu mostu na soulodí se soustava vyvažovala balastní vodou, která byla napouštěna do soulodí. Montáž byla navržena na vhodné klimatické a přírodní podmínky. Hladina Dunaje byla snížena vodním dílem Gabčíkovo a montáž byla navržena pro maximální rychlost větru 10 m/s.



Obr. 12 Schéma montáže mostu Apollo [10]

Otáčení bylo zajištěno vyprošťovacím vozidlem a kotevními vrátky. Předpokládala se i pomoc proudu řeky, ale ta nepůsobila dostatečnou silou, a proto musely pomoci remorkéry. Po překonání Dunaje se mostní konstrukce uložila ze soulodí na pilíř, při kterém byla znovu kontrolovaně přečerpávána balastní voda kvůli přímé dráze při posunu na pilíř.

#### 4.5 Podélný výsun s podporou jeřábu

Most se specifickým způsobem montáže je ocelový železniční most u Veselí nad Lužnicí přes řeku Nežárku. Projektant mostu navrhl výsun po připravené dráze na podporách v řece. Ale tento způsob by zde byl neefektivní a příliš složitý například kvůli založení dočasných pilířů v řece. Proto se dodavatel stavby rozhodl vytvořit ztužující konstrukci a při výsunu si pomoci jeřábem (Obr. 13). Jedná se o rekonstrukci IV. tranzitního železničního koridoru mezi Prahou a Českými Budějovicemi. Je to obloukový most s dolní mostovkou o rozpětí 77,22 m.

Informace k tomuto mostu jsem získal z výkresové dokumentace od pana Vladana Michalíka z firmy MCE Slaný. Pro tuto mostní konstrukci bude proveden porovnávací výpočet reakcí během výsunu konstrukce.





*Obr. 13 Výsun mostu s podporou jeřábu – Veselí nad Lužnicí [12]*

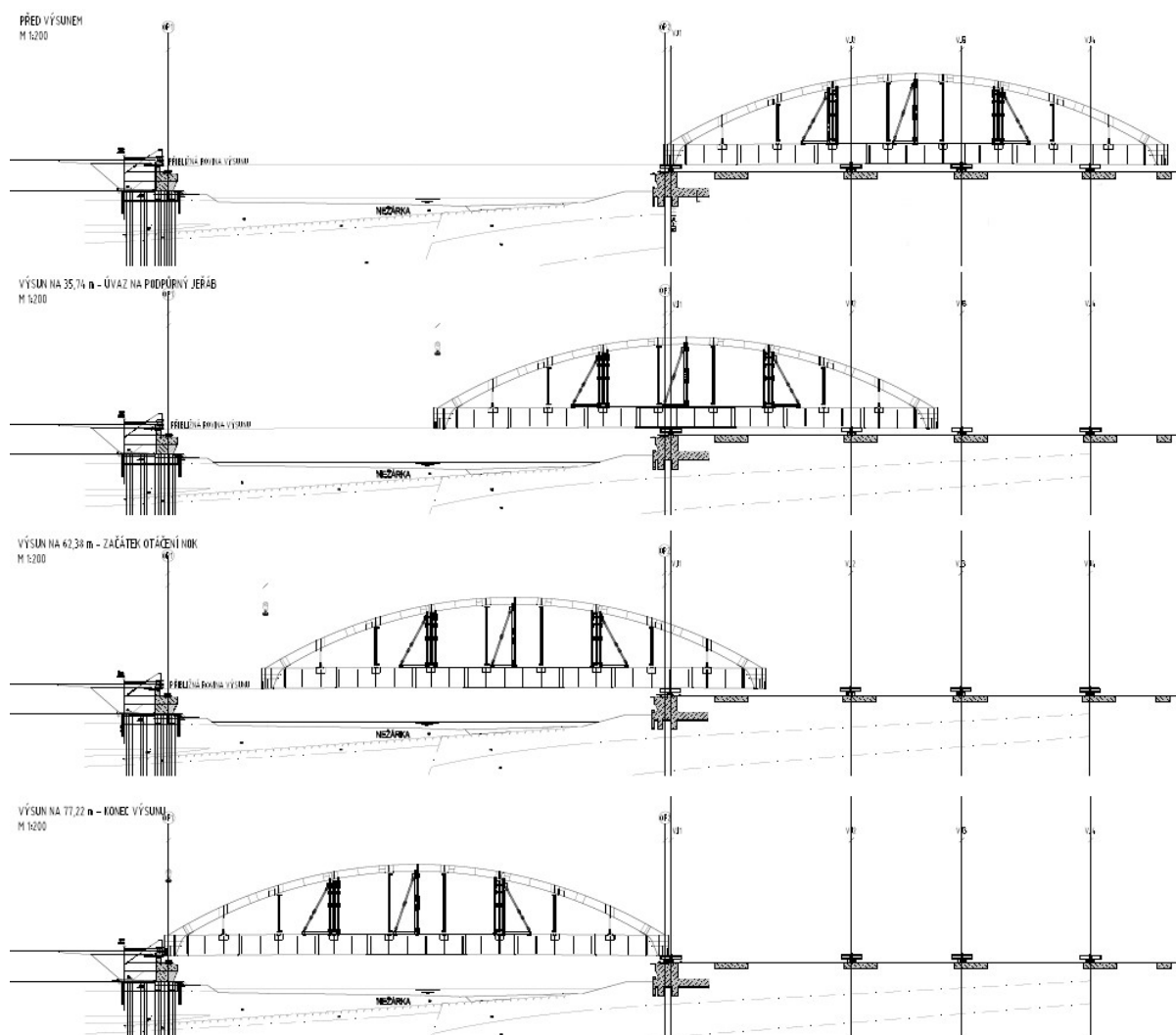
#### **4.5.1 Popis konstrukce**

Obloukový most s dolní mostovkou má ortotropní mostovku s trapézovou výztuhou. Tloušťka plechu mostovky je 16 mm. Osová vzdálenost příčníků je 2,86 m. Vzdálenost střednicových rovin oblouků je 11,82 m. Trám je tvořen plnostěnným nosníkem výšky 3,19 m, Oblouk má lichoběžníkový průřez proměnné výšky. Táhla mají dva průřezy: kruhový a plát s výztuhou. Délka táhel od nejkratšího je 1,89 m, 5,80 m, 7,97 m a 9,03 m. Při sestavování oblouku v modelu byla tato táhla vztyčena z mostovky s přidáním vzdálenosti těžiště od horních vláken u průřezu trámu, a to samé pak u průřezu oblouku, ale zde od dolních vláken. Ztužení oblouku v horní rovině je rámové díky 6 příčlím. [13]

#### **4.5.2 Popis výsunu**

Most byl nejdříve sestaven na pravém břehu. Před výsunem byl most umístěn na čtyřech párech podpor VJ1 až VJ4. VJ1 je neblíže vodnímu toku. Osová vzdálenosti podpor jsou: mezi

VJ1 a VJ2 28,04 m, mezi VJ2 a VJ3 17,16 m a mezi VJ3 a VJ4 20,02 m. Oblouk byl ještě vyztužen přídatnou konstrukcí.

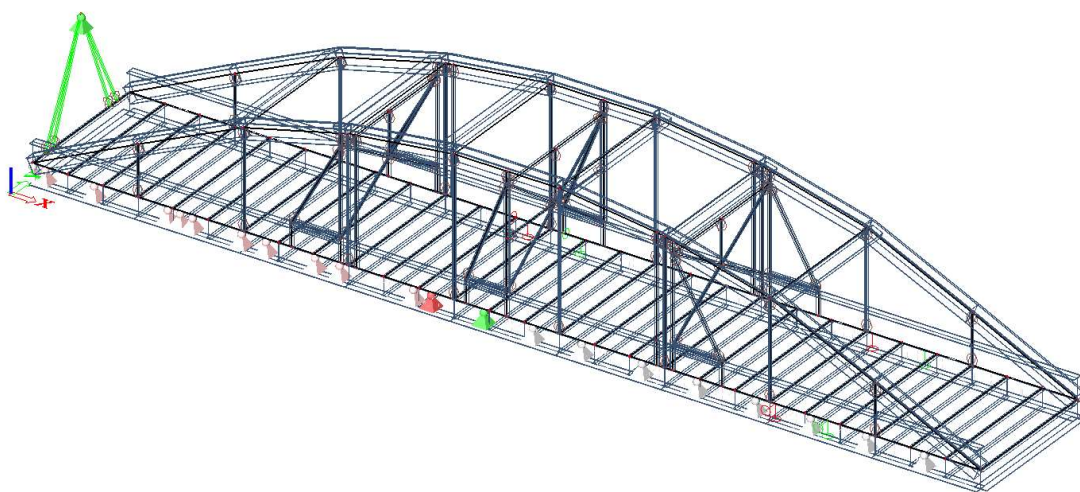


Obr. 14 Schéma výsunu mostu – Veselí nad Lužnicí [14]

Poté byl zahájen výsuv. Počátek výsuvu je 1 m od ložiska na pravém břehu. Výsuv je poháněn dvěma tažnými zařízeními. Podle popisu fází je podpora VJ1 postupně zvedána a podpora VJ3 postupně snižována. Ve stavu, kdy je vysunuto 35,74 m mostní konstrukce, se přední část uvázala na jeřáb DemagTerex TC 2800 [12]. Bude pomáhat se zatížením a uložením do definitivní polohy. Na kótě výsuvu 62,38 m se ještě konstrukce otočila do osy uložení, protože železniční trať je zde v oblouku. Nakonec byl most uložen do definitivní polohy.

### 4.5.3 Numerický model výsunu obloukového mostu

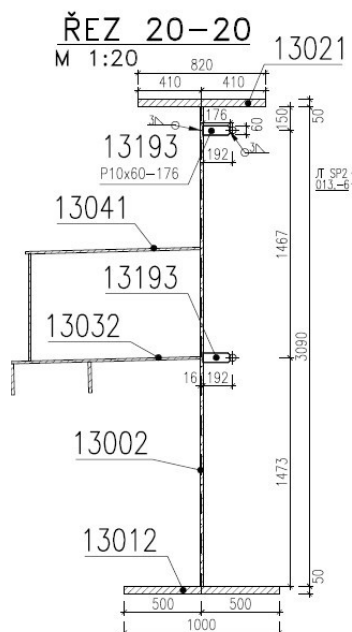
Numerický model byl zadán do softwaru Scia Engineer 2016 – studentská licence. Bude se jednat o 3D prutový model. Použije se funkcionality *Fáze výstavby a provozu*. Výsun mostu se vymodeluje tak, že se budou přidávat a odebírat podpory podle toho, jak je most vysunut. Přidají se také prvky lana jeřábu ve fázi uvázání konstrukce na jeřáb. Návrhové součinitele zatížení jsou všechny rovny 1, aby se zjistily skutečné působící síly na konstrukci. Třída oceli mostu je S355, u pomocné konstrukce pak S235. Objemová hmotnost oceli bude uvažována  $8000 \text{ kg/m}^3$ , aby se započítaly např. výztuhy na konstrukci.



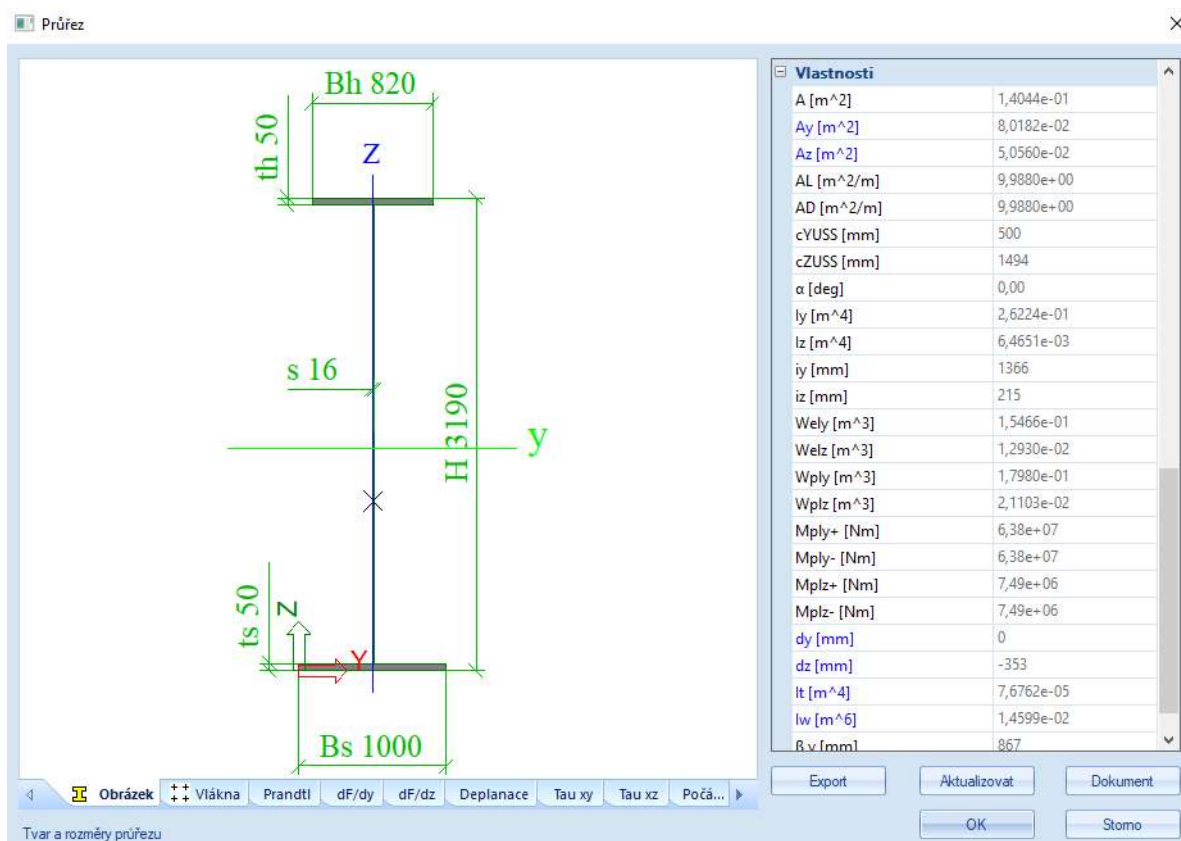
Obr. 15 Výpočtový model v softwaru Scia Engineer

#### 4.5.3.1 Prvky a jejich průřezy

Hlavní nosník je výšky 3,19 m. Tloušťka stojiny je 16 mm. Tloušťka obou pásnic je 50 mm. Šířka dolní pásnice je 1000 mm a horní 820 mm. Viz Obr. 16 a Obr. 17.



Obr. 16 Průřez hlavního nosníku ve výkresu [13]

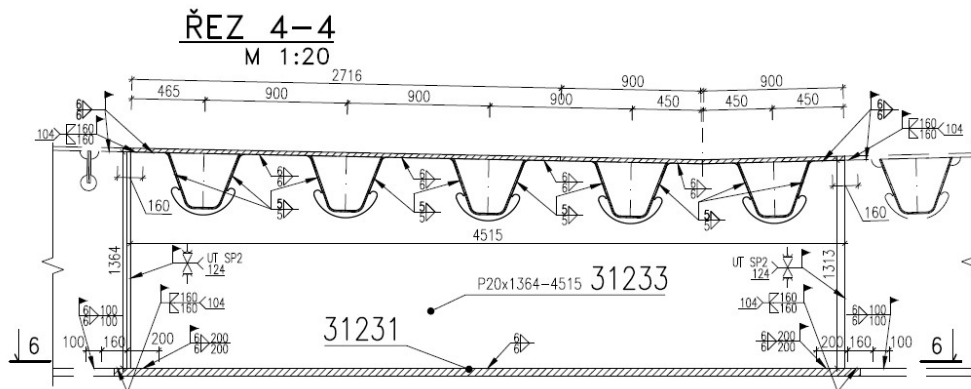


Obr. 17 Průřez hlavního nosníku v numerickém modelu

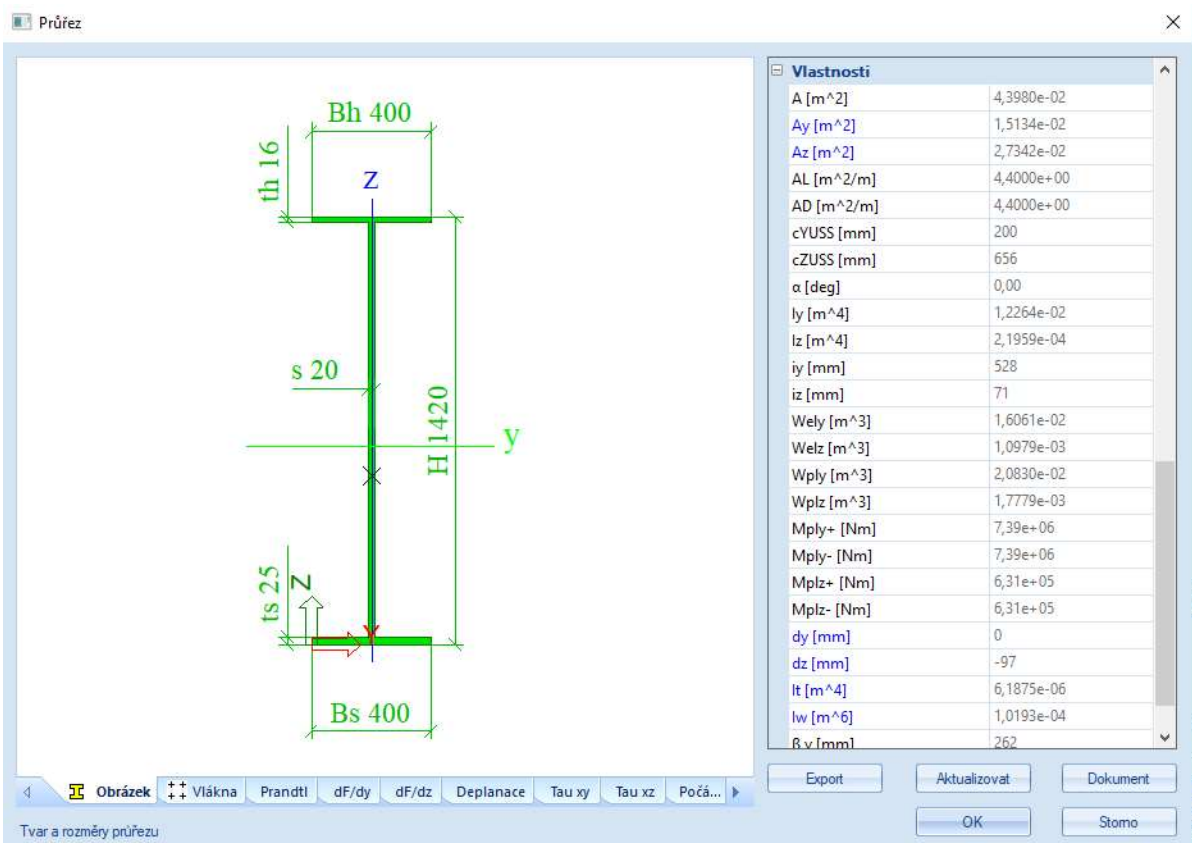
Idealizovaný příčník v modelu má výšku 1420 mm, což odpovídá průměru jeho výšky. Dolní pásnice má tloušťku 25 mm a šířku 400 mm. Tloušťka horní pásnice odpovídá tloušťce plechu mostovky tj. 16 mm. Šířka horní pásnice je pak na každou stranu od stojiny 15.e.t, což vychází



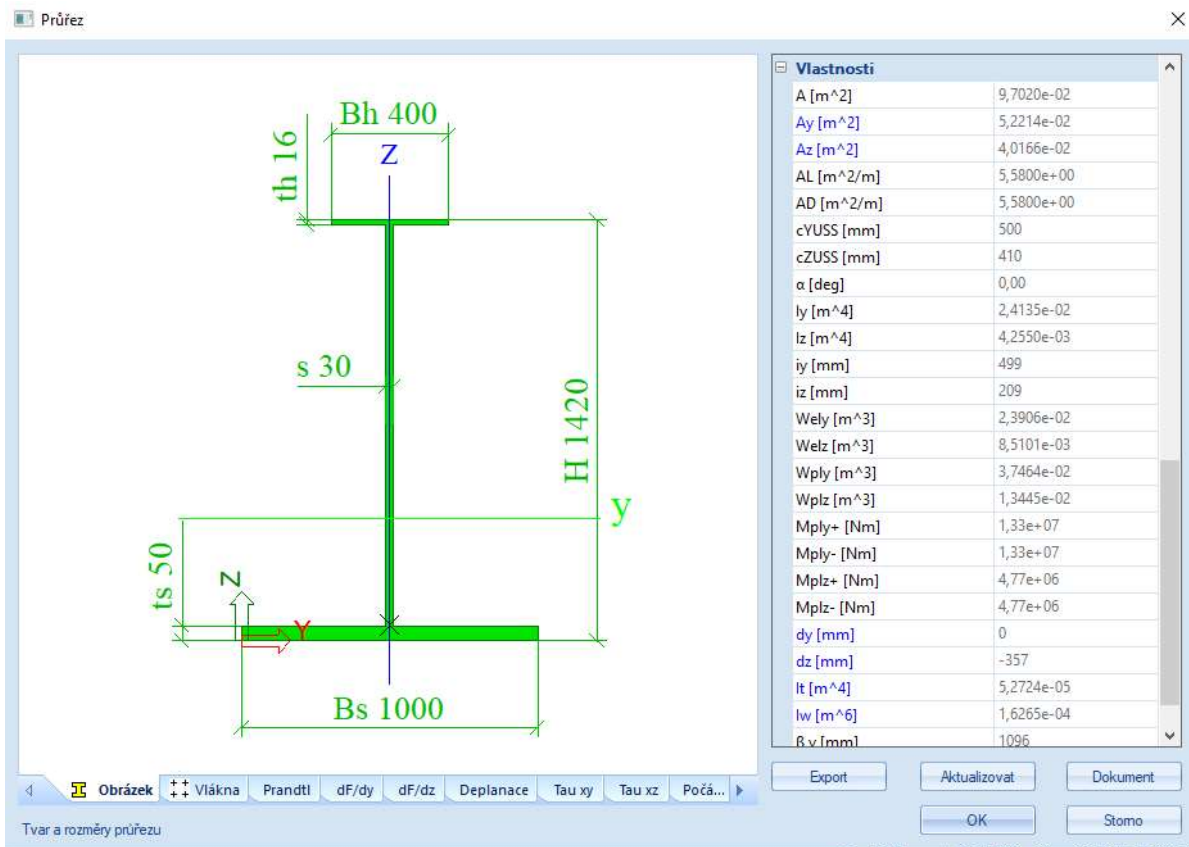
400 mm. Podporový přičník má tlustší a širší pásnici 50 mm resp. 1000 mm. Viz Obr. 18, Obr. 19 a Obr. 20.



Obr. 18 Pohled na přičník ve výkresu [13]

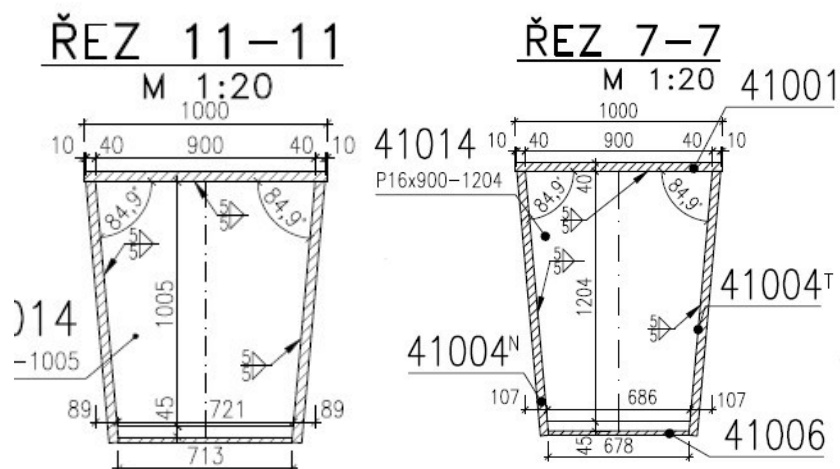


Obr. 19 Průřez přičníku v numerickém modelu

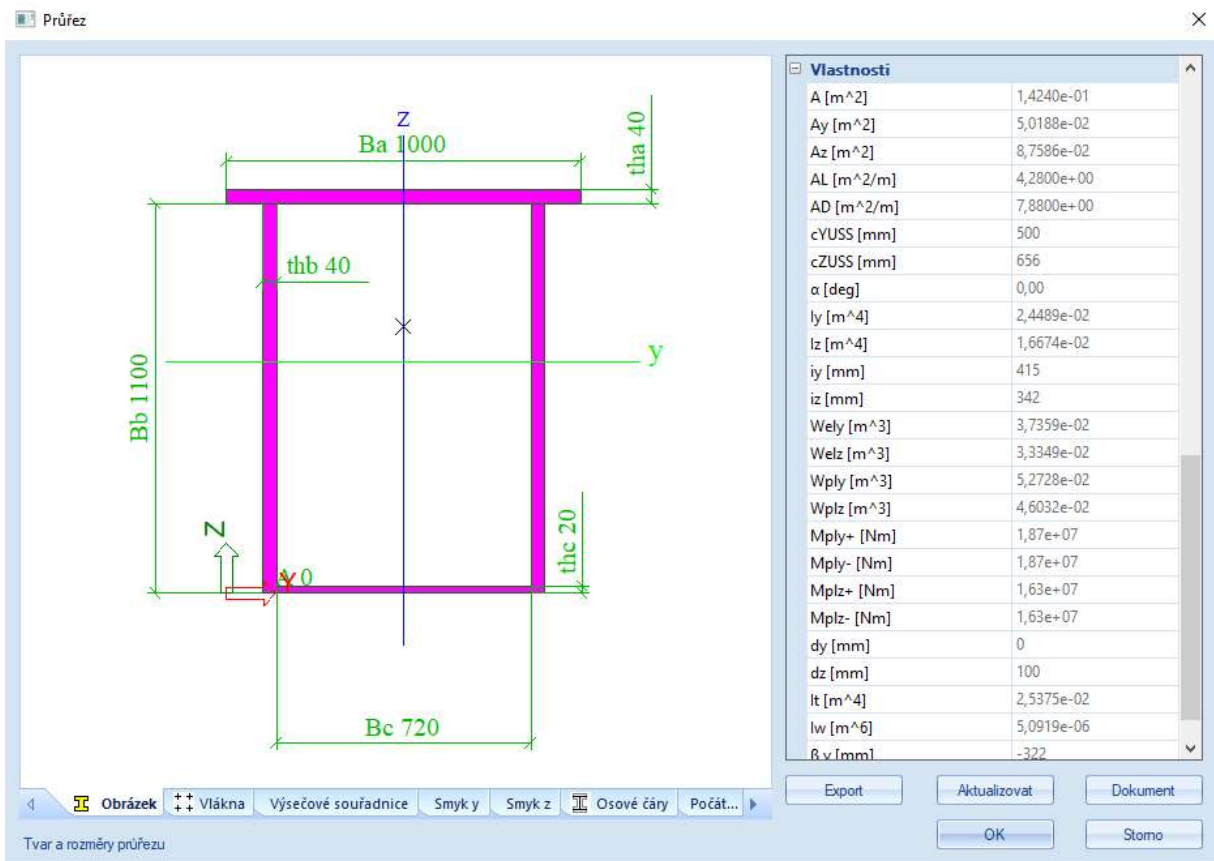


Obr. 20 Průřez podporového příčniku v numerickém modelu

Průřez oblouku má lichoběžníkový tvar (Obr. 21). V numerickém modelu se tento proměnný průřez idealizoval ekvivalentním uzavřeným obdélníkovým průřezem (Obr. 22). Výška nosníku je 1100, což odpovídá přibližnému průměru výšky nosníku po délce. Tloušťka spodního plechu je 20 mm, ostatní plechy mají tloušťku 40 mm. Šířka horní části průřezu je 1000 mm, spodní je 800 mm.

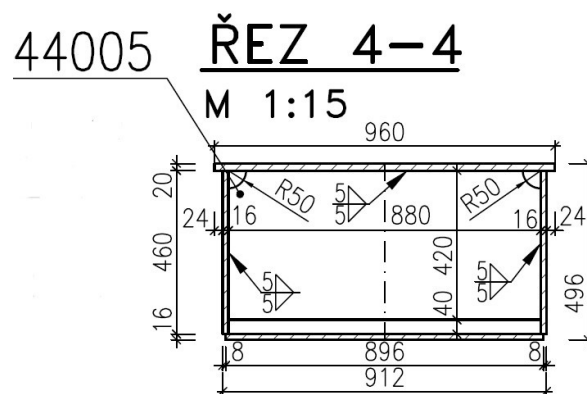


Obr. 21 Průřez oblouku v polovině a ve čtvrtině rozpětí ve výkresu

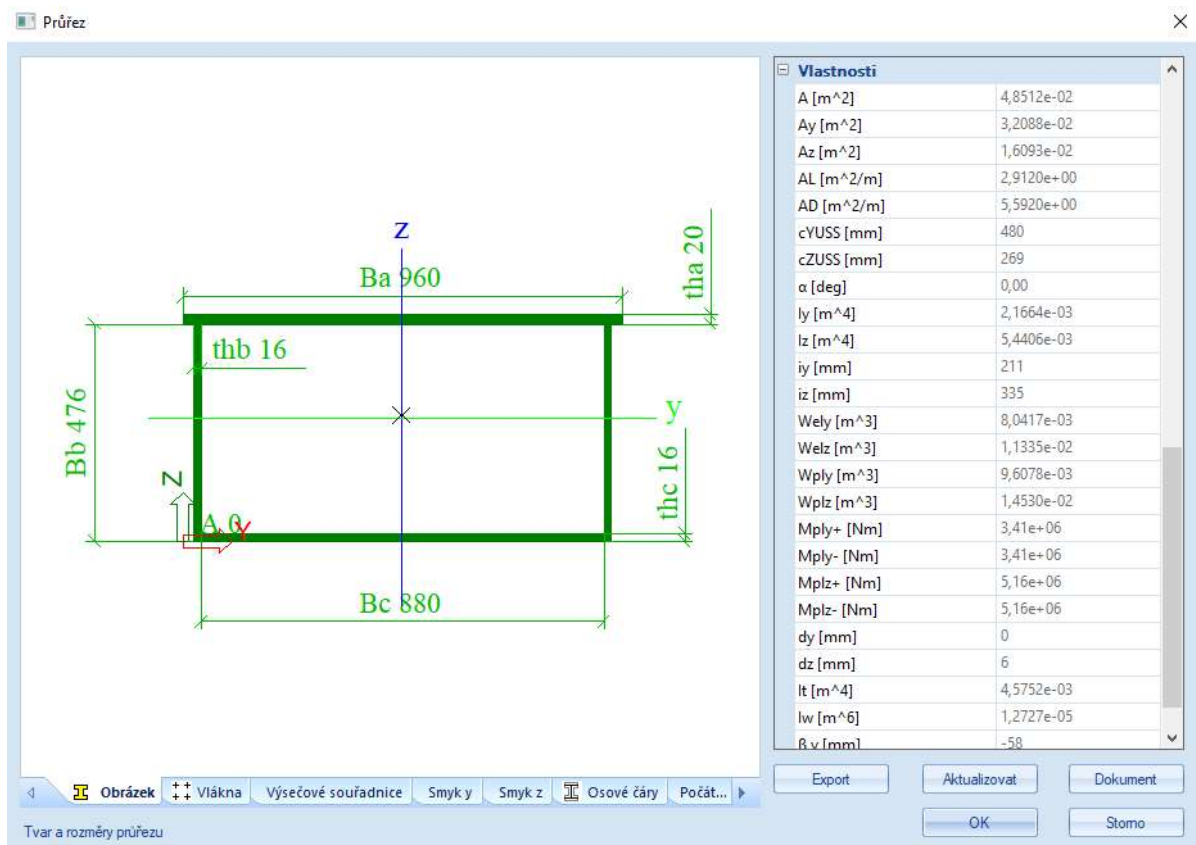


Obr. 22 Průřez oblouku v numerickém modelu

Příčle má průřez obdélníkového uzavřeného průřezu výšky 496 mm a horní šířky 960 mm. Tloušťka horního plechu je 20 mm, tloušťka ostatních plechů je 16 mm. Viz Obr. 23 a Obr. 24.

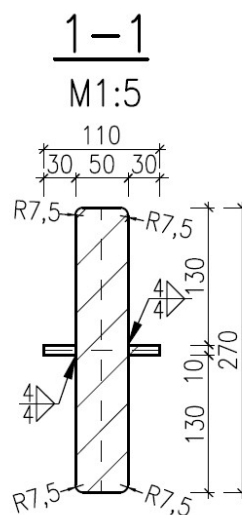


Obr. 23 Průřez příčle ve výkresu [13]

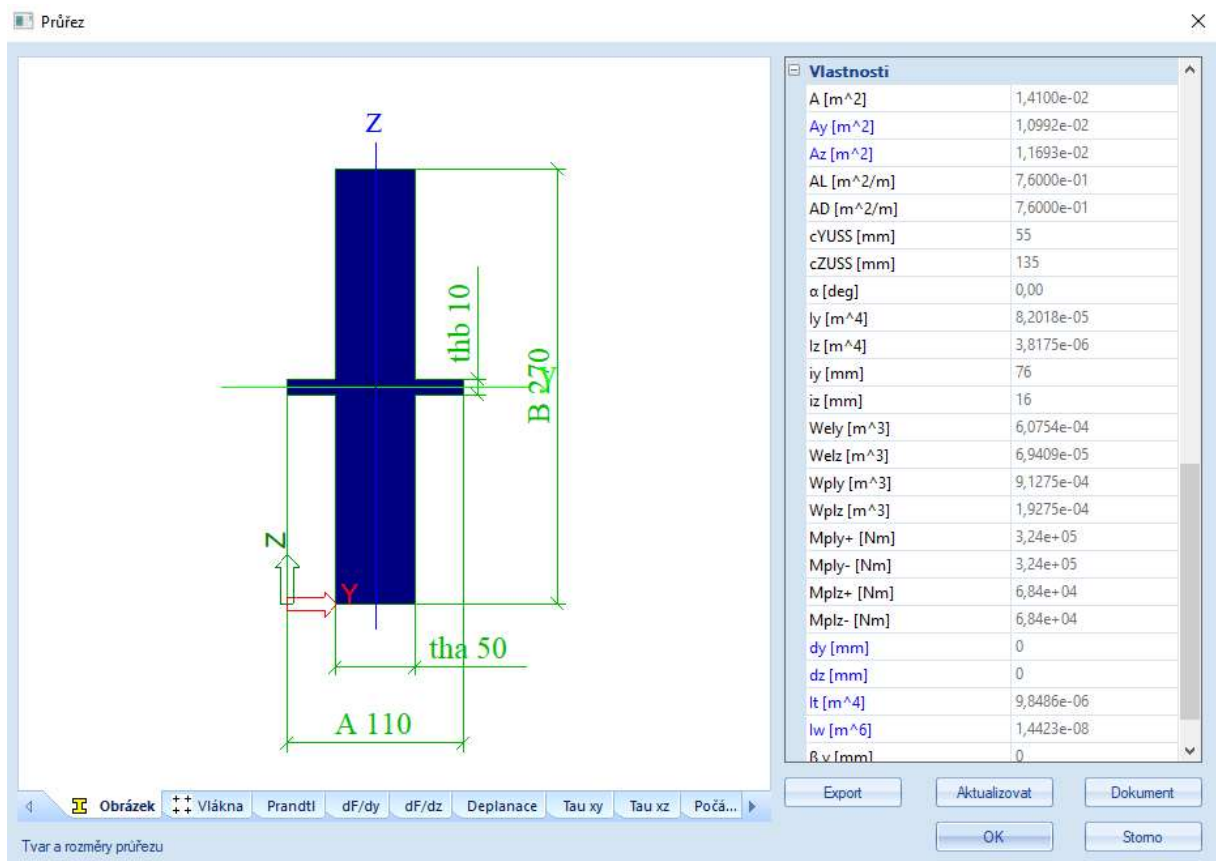


Obr. 24 Průřez příčle v numerickém modelu

V modelu rozlišujeme dva druhy závěsů. První je plech šířky 270 mm a tloušťkou 50 mm s výztuhou. Výztuha má rozměry 10x30 mm (Obr. 25 a Obr. 26).

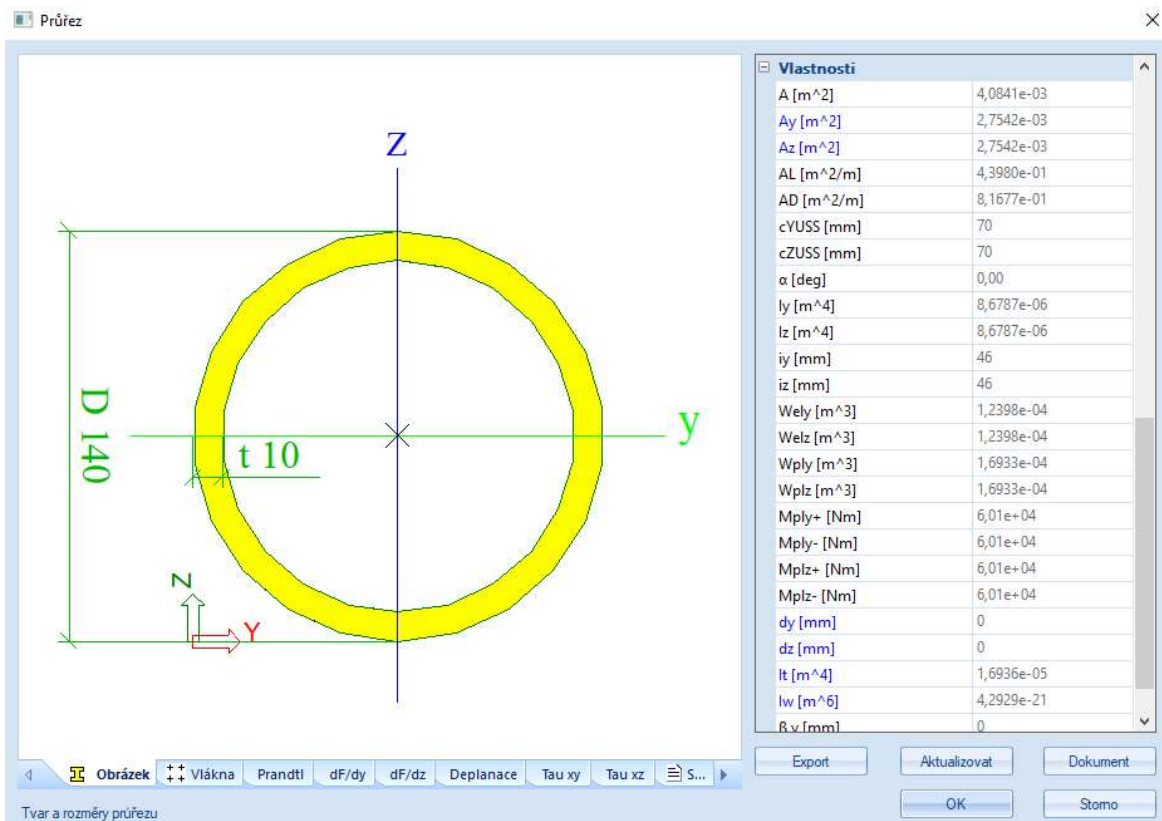


Obr. 25 Průřez táhla ve výkresu [13]



Obr. 26 Průřez táhla v numerickém modelu

Druhým typem je pak trubka průměru 140 mm a tloušťkou 10 mm (Obr. 27). Tento průřez odpovídá nejkratšímu závěsu.

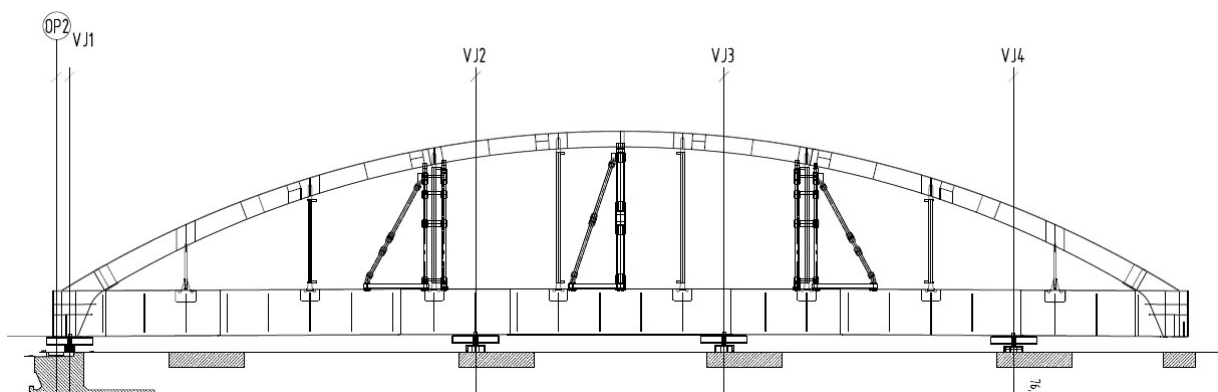


Obr. 27 Trubkový závěs v numerickém modelu

Ortotropní mostovka je nahrazena deskou tloušťky 26 mm. To odpovídá součtu tloušťky ocelového plechu 16 mm a 10 mm plechu od trapézové výztuhy. Ta má délku střednice 900 mm a osová vzdálenost výztuh je také 900 mm. [13]

#### 4.5.3.2 Podpůrná konstrukce oblouku během výsunu

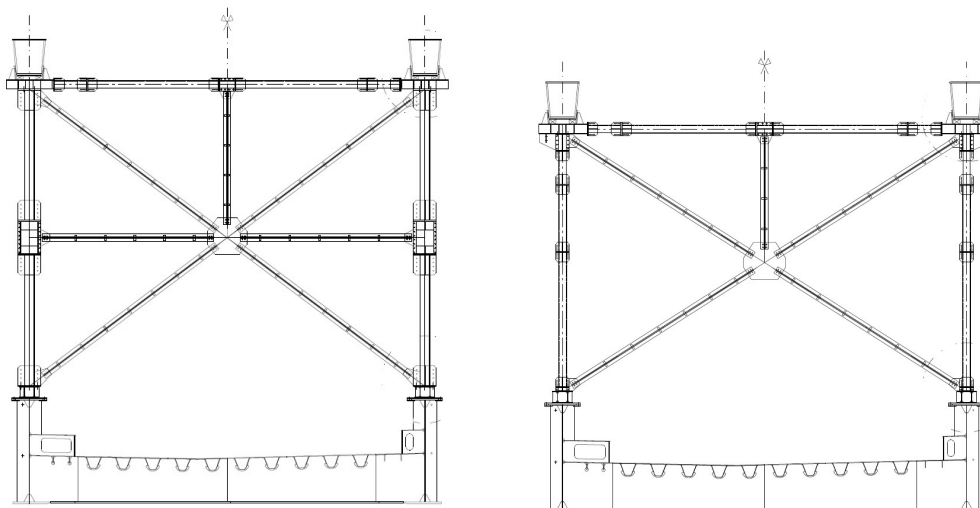
Podpůrná konstrukce se nachází na třech místech konstrukce. Ve dvou pětinach rozpětí z obou stran a jednou v polovině rozpětí (Obr. 28). Podpůrná konstrukce se skládá z prvků různých průřezů a má pomoci stabilizovat oblouk a táhla během výsuvu.



Obr. 28 Podélný pohled na podpůrnou konstrukci obloukového mostu [14]



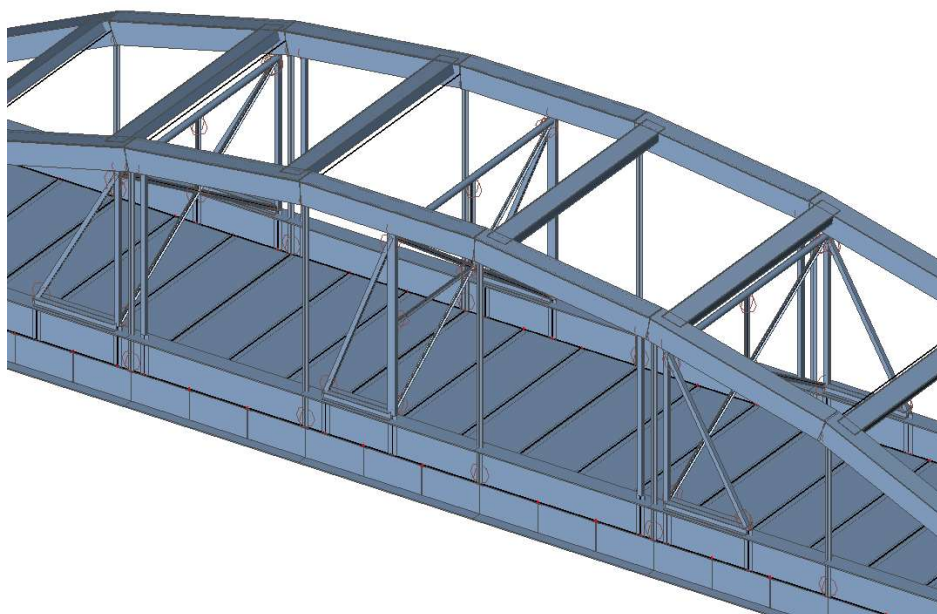
Podpůrná konstrukce v polovině rozpětí se skládá z jedné roviny úhelníkových ztužidel ohraničených nosníky s uzavřeným průřezem. V rovině oblouků pak diagonálami uzavřeného průřezu a vodorovným nosníkem ze dvou HEB340.



*Obr. 29 Příčný řez v polovině rozpětí a ve dvou pětínách rozpětí [14]*

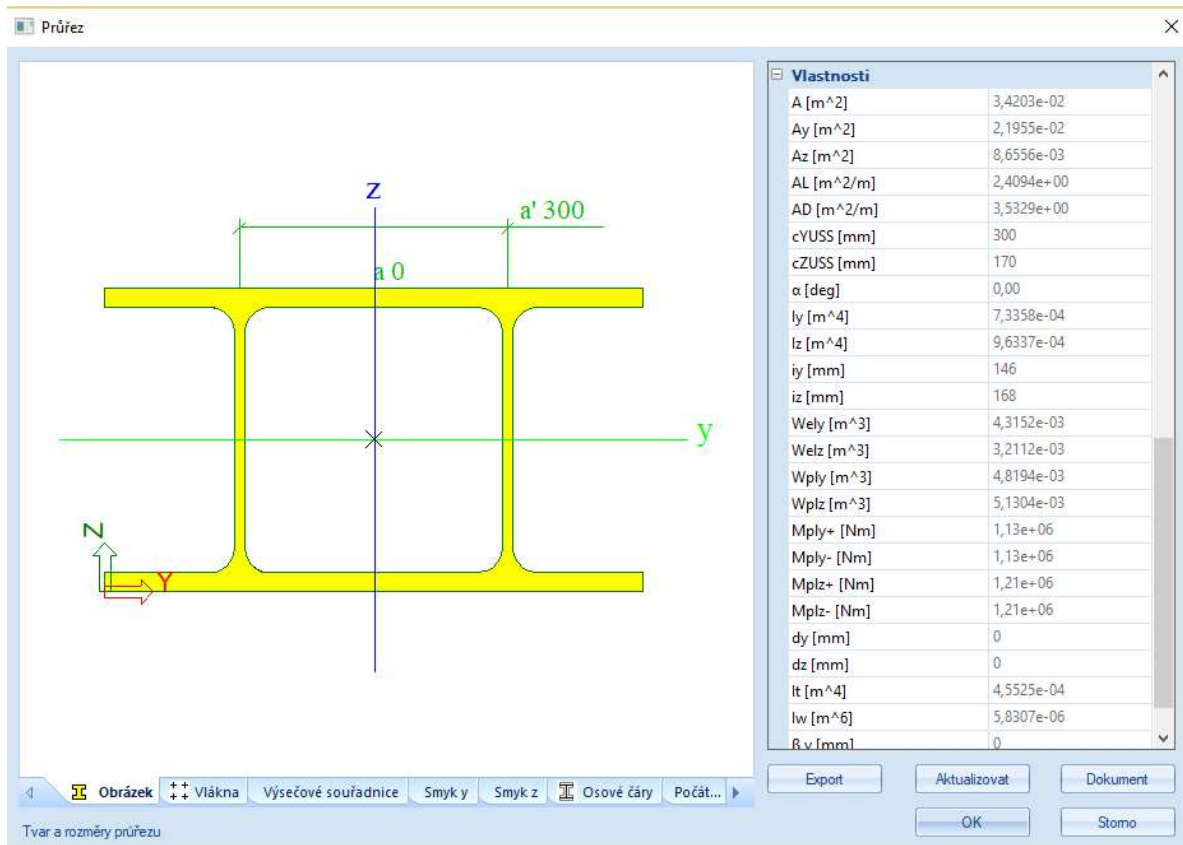
Ztužující konstrukce ve dvou pětínách rozpětí se podobá konstrukci v polovině rozpětí. Navíc jsou stojky v rovinách oblouků, které zároveň s prvkem v rovině zavětrování symetricky ztužují závěs. Délka dvojitého HEB nosníku je delší.

Spojení prvků je kloubové kromě připojení HEB nosníku k hlavnímu nosníku a svislic k tomuto nosníku.



*Obr. 30 Numerický model – podpůrná konstrukce*

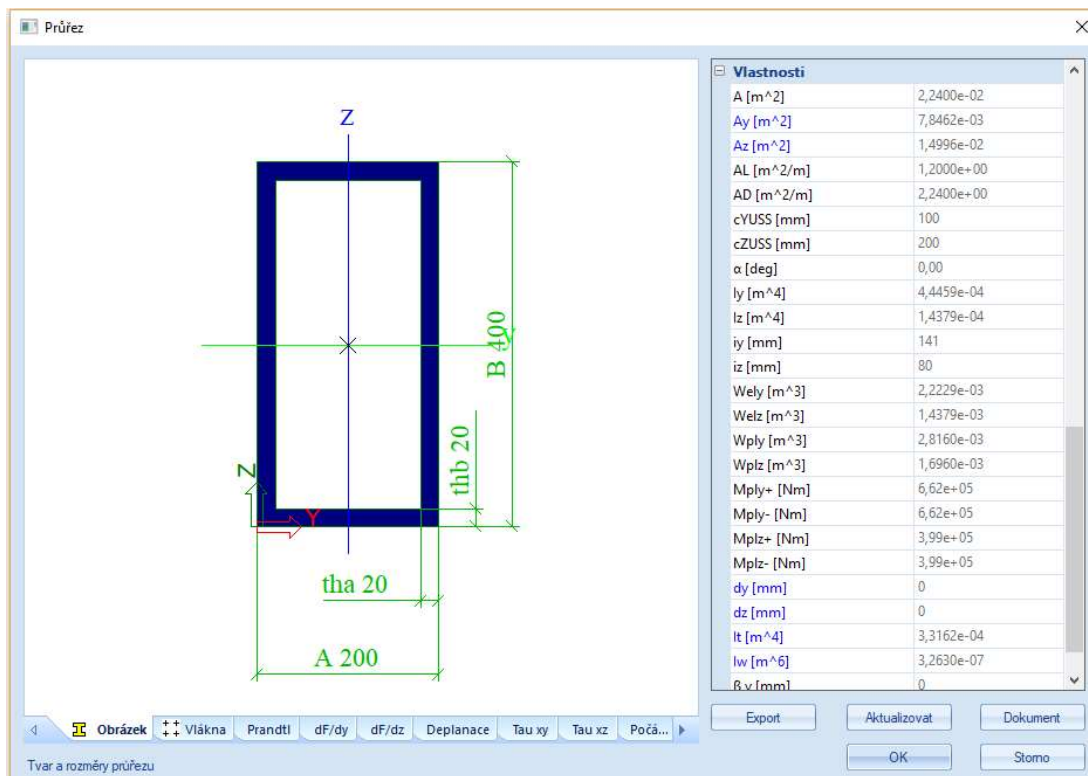
V modelu se podpůrná konstrukce sestavila následovně. Nejdříve se v místech kontaktu s hlavním nosníkem zavedly prvky odpovídající připojení na stojinu hlavního nosníku. V tomto případě prvek s průřezem 16x390 mm. Délka prvku odpovídala vzdálenosti těžišť hlavního nosníku a HEB340 (Obr. 31), který byl na něj ve skutečnosti připevněn. Délka nosníku s tímto průřezem je 3300 mm (uprostřed rozpětí) resp. 4000 mm (ve dvou pětinách rozpětí). [14]



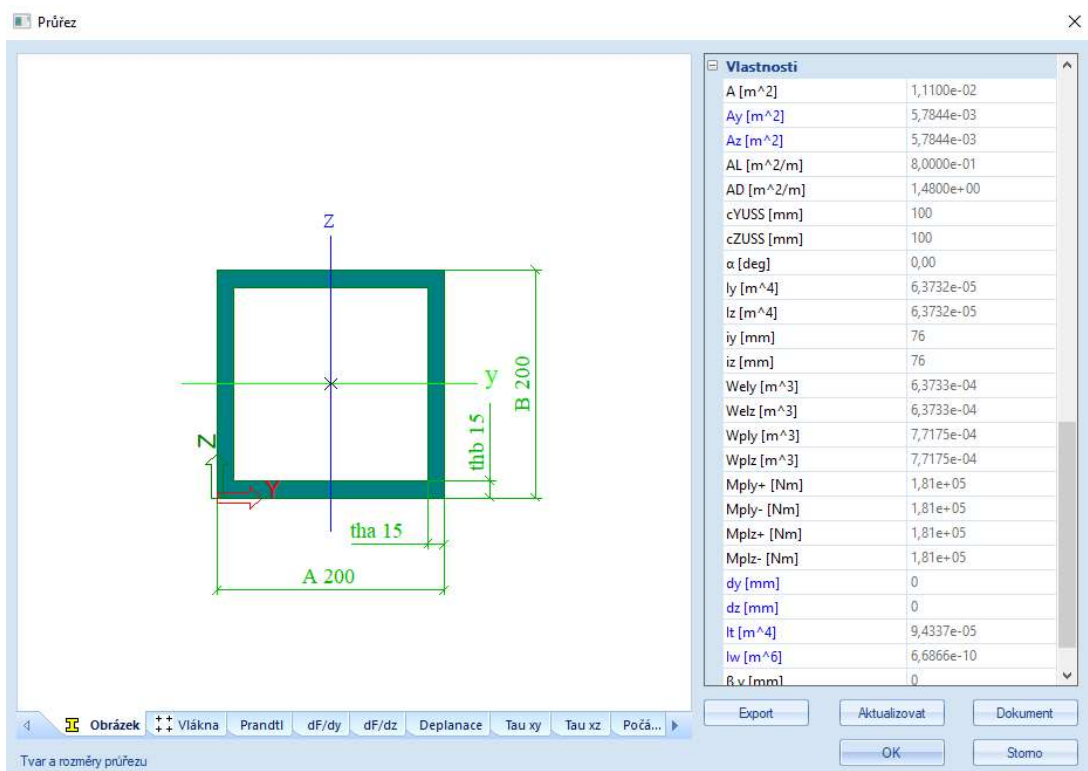
Obr. 31 Numerický model – průřez 2xHEB340

Byly vztyčeny stojky k oblouku a k nim diagonály. Průřez stojky uprostřed rozpětí se použil uzavřený průřez 400x200x20 mm (Obr. 32). Ostatní stojky a diagonály 200x200x15 mm (Obr. 33). Přidal se nosník mezi body křížení diagonály a stojky. Jako průřez se použila uzavřená trubka 300x20 mm (Obr. 34). Průřezy stojek, diagonál a nosníků mezi oblouky nejsou ve výkresech přesně určeny. Rozměry byly odhadnuty z výkresů montáže mostu.

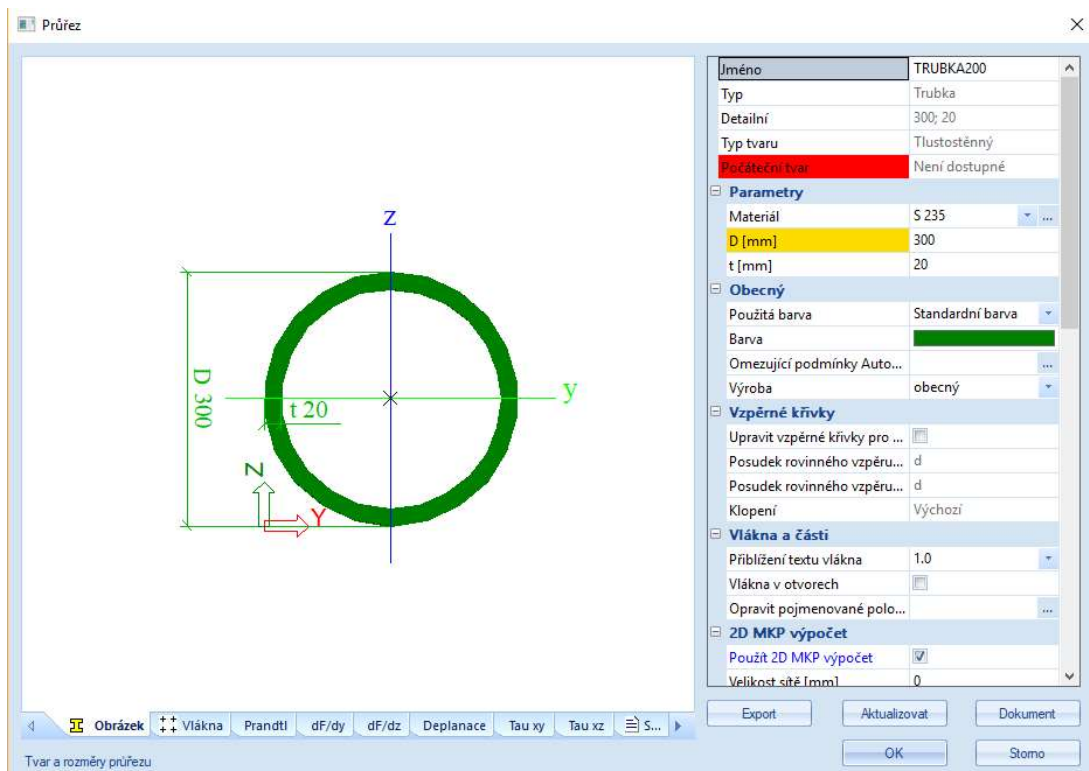




Obr. 32 Numerický model – průřez 400x200x20 mm

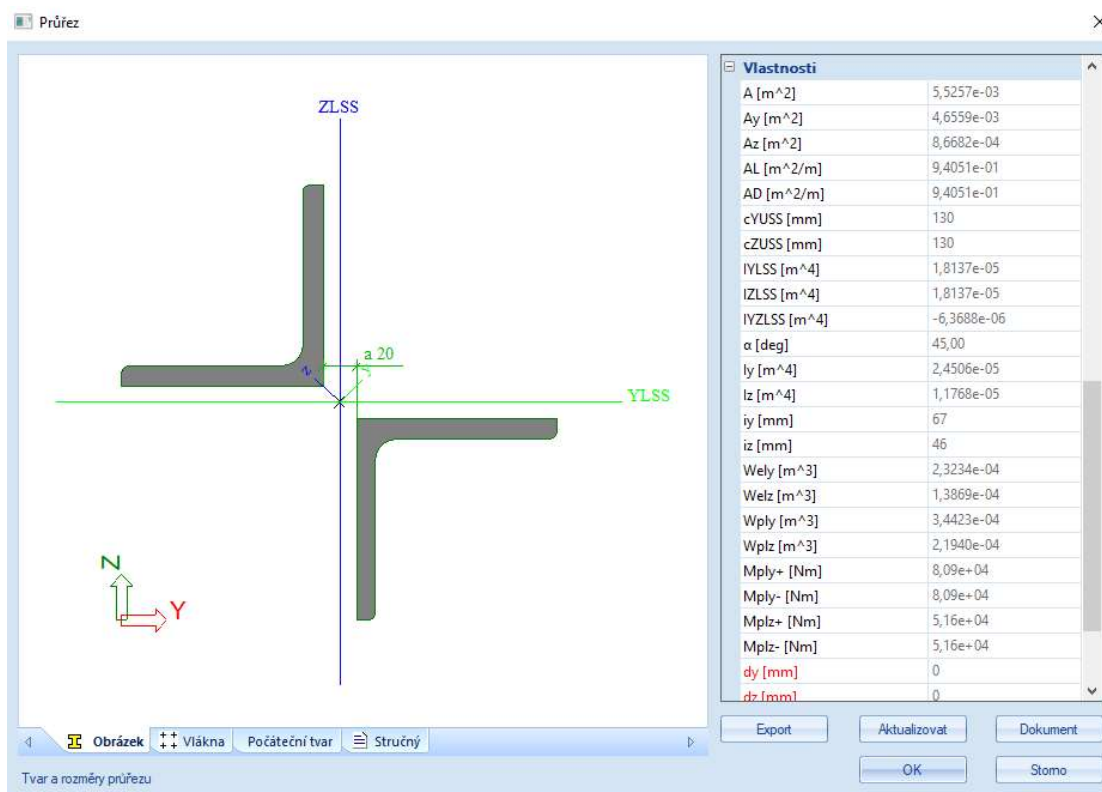


Obr. 33 Numerický model – průřez 200x200x20 mm



Obr. 34 Numerický model – průřez TR300x20 mm

Nakonec se vyplnila příčná rovina diagonálami podle příčných řezů. Průřezem jsou dva úhelníky 100x100x10 mm (Obr. 35). [14]



Obr. 35 Numerický model – průřez 2xL100/10

#### 4.5.3.3 Fáze výstavby

Pro návrh fází výstavby se vycházelo z tabulek výkresu montáže. Výsledky se budou porovnávat s tabulkami Tab. 1 a Tab. 2. K těmto fázím se zahrnují i podfáze z tabulky Tab. 3.

Tab. 1 Zatížení jeřábu a výsuvných jednotek [14]

Fáze	Reakce [kN]				
	HÁK	VJ1	VJ2	VJ3	VJ4
1. před výsunem	0	612	1483	681	1224
2. před sjezdem z VJ4	0	1389	1175	1007	428
3. po sjezdu z VJ4	0	1197	1181	1623	0
4. před sjezdem z VJ3	0	2895	1374	-269	0
5. po sjezdu z VJ3	0	3060	940	0	0
6. zavěšení na hák	0	3428	572	0	0
7. před sjezdem z VJ2	1730	3125	0	0	0
8. po sjezdu z VJ2	1730	3125	0	0	0
9. před otáčením	3010	2495	0	0	0
10. před spuštěním	4000	2000	0	0	0

\*pro hák je reakce z modelu násobena už dvěma

\*\* pro VJ to je pro jednu jednotku

Tab. 2 Průběh zatížení jeřábu [14]

Vyložení	Zatížení [kN]		
	Hák	VJ1	VJ2
37,2	0	6856	1144
35,2	50	7398	592
33,2	50	7972	18
31,2	392	7608	0
29,2	748	7252	0
27,2	1074	6926	0
25,2	1372	6628	0
23,2	1644	6356	0
21,2	1896	6104	0
19,2	2128	5872	0
17,2	2342	5658	0
15,2	2544	5458	0
13,2	2728	5272	0
12,2	2818	5182	0
12,2	4000	4000	0

V tabulce (Tab. 2) vyložení 37,2 odpovídá vysunutí 35,74 m konstrukce.

Tab. 3 Tabulka podfází – manipulace s podpůrnou konstrukcí během výstavby [14]

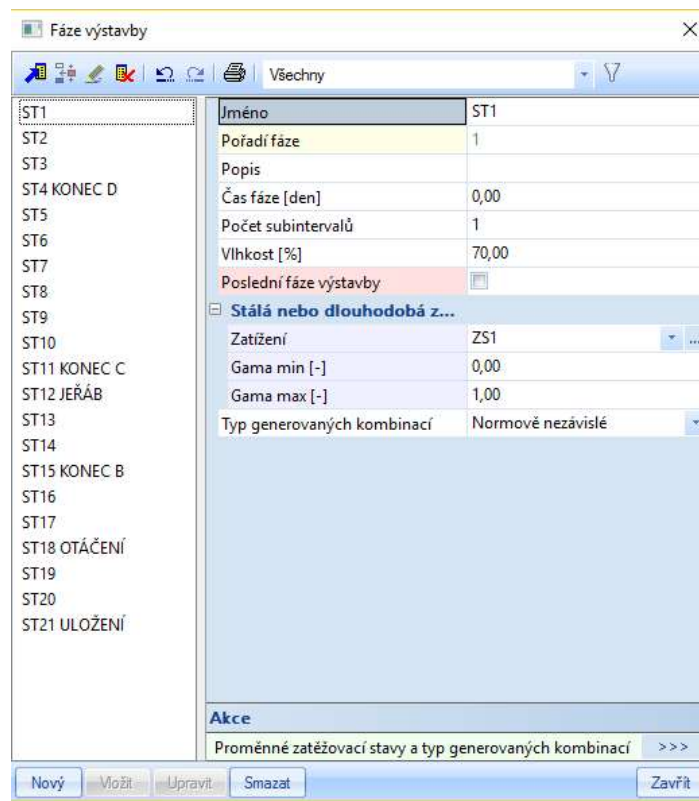
Vysunuto [m]	Akce
4	+ 30 mm zvýšení VJ1
10	+ 30 mm zvýšení VJ1
11	podepření VJ4 před sjezdem
12	- 30 mm snížení VJ3
16	+ 30 mm zvýšení VJ1
18	- 30 mm snížení VJ3
22	+ 40 mm zvýšení VJ1
24	- 30 mm snížení VJ3
30	- 30 mm snížení VJ3
31,46	sjezd z VJ3
35,74	úvaz na podpůrný jeřáb
48,62	sjezd z VJ2
62,38	začátek otáčení do osy
76,22	podepření VJ1 proti překlopení

Přidaly se ještě fáze ke konci výsunu, zde byl rozdíl vysunuté délky moc velký, snížil se proto vložím dvou fází. Zvyšování podpor během výsunu bylo nakonec zanedbáno z důvodu, že výsledky neodpovídaly skutečnosti a vznikaly velké tahy v podporách. Zanedbáno bylo též natočení konstrukce kolem svislé osy do definitivní polohy z důvodu nepatrných změn reakcí.

Tab. 4 Fáze numerického modelu včetně délky vysunutí a odpovídající fáze ve výkresu

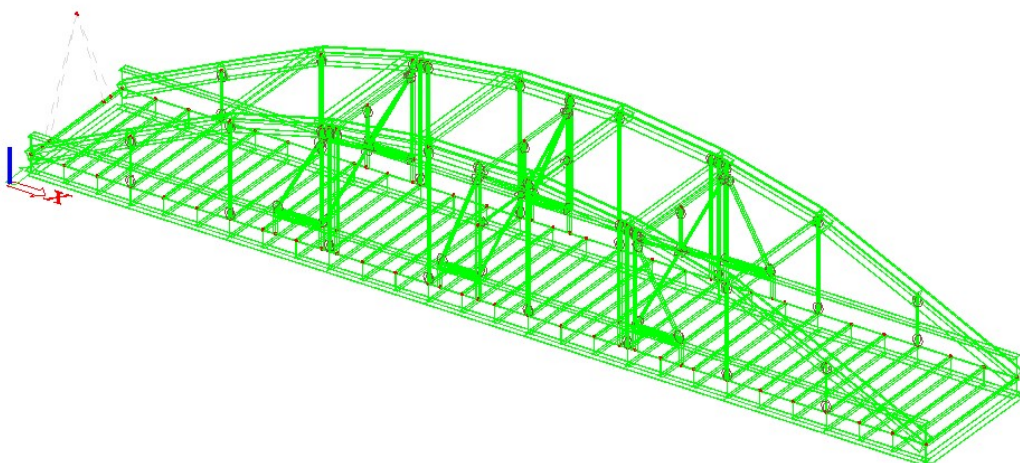
č. fáze	vysunuto [m]	odpovídá fázi	Reakce [kN]				
			HÁK	VJ1	VJ2	VJ3	VJ4
1	0,00	1.před výsunem	0	593	1311	683	1073
2	4,00	-	0	831	1267	722	841
3	10,00	-	0	1088	1345,7	835	392
4	11,00	2.před sjezdem z VJ4	0	1130	1381	817	334
5	12,00	3.po sjezdu z VJ4	0	1023	1486	1152	0
6	16,00	-	0	1260	1715	686	0
7	18,00	-	0	1398	1778	485	0
8	22,00	-	0	1695	1850	116	0
9	24,00	-	0	1864	1832	-35	0
10	30,00	4.před sjezdem z VJ3	0	2457	1549	-345	0
11	31,46	5.po sjezdu z VJ3	0	2859	802	0	0
12	35,74	6.zavěšení na hák	0	3418	243	0	0
13	39,74	zat. jeřábu, vyložení 35,2 m	481	3351	70	0	0
14	43,74	zat. jeřábu, vyložení 31,2 m	1008	3154	3	0	0
15	48,62	7.před sjezdem z VJ2	1626	2847	0	0	0
16	53,72	zat. jeřábu, vyložení 19,2 m	2157	2582	0	0	0
17	57,72	zat. jeřábu, vyložení 15,2 m	2509	2406	0	0	0
18	62,38	9.před otáčením	2863	2229	0	0	0

19	66,90	-	3160	2081	0	0	0
20	71,62	-	3431	1945	0	0	0
21	76,22	10.před spuštěním	3663	1830	0	0	0



Obr. 36 Zobrazení fázi v softwaru Scia Engineer

Fáze se zadaly do softwaru (Obr. 36). Každé fázi odpovídá jeden zatěžovací stav. První fázi odpovídá zatěžovací stav vlastní tíha. V této fázi byl také celý model sestaven (Obr. 37).



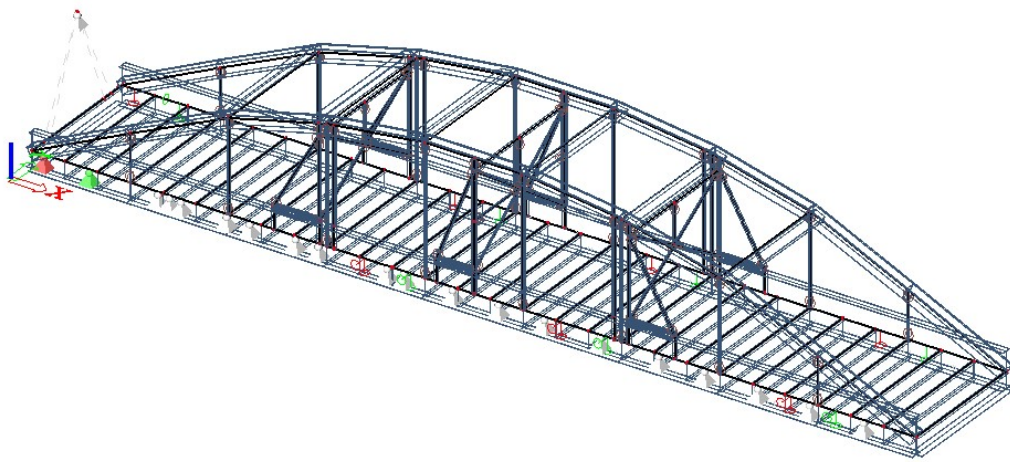
Obr. 37 1. fáze výstavby – numerický model výsunu



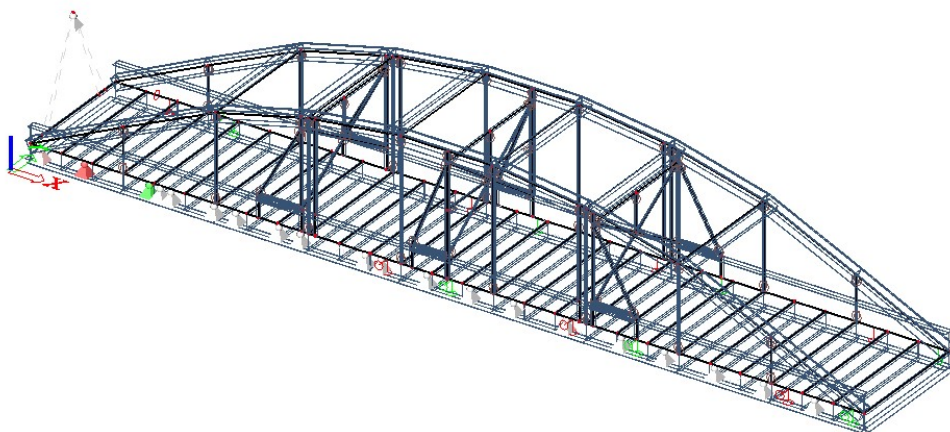
Poté se ve všech dalších fázích posunovaly podpory zrušením podpor z předchozí fáze a zavedením nových. Vždy byla jedna kloubová podpora pevná. Od této podpory ve směru oblouku byly všechny kloubové podpory pevné ve směru kolmo na rovinu oblouku a osu Z. Symetrická podpora k neposuvné v druhé rovině oblouku byla pevná v podélném směru mostu a ose Z. Ostatní kloubové podpory byly pevné ve směru Z.

Vzdálenost mezi podporami VJ1 až VJ4 je popsána výše.

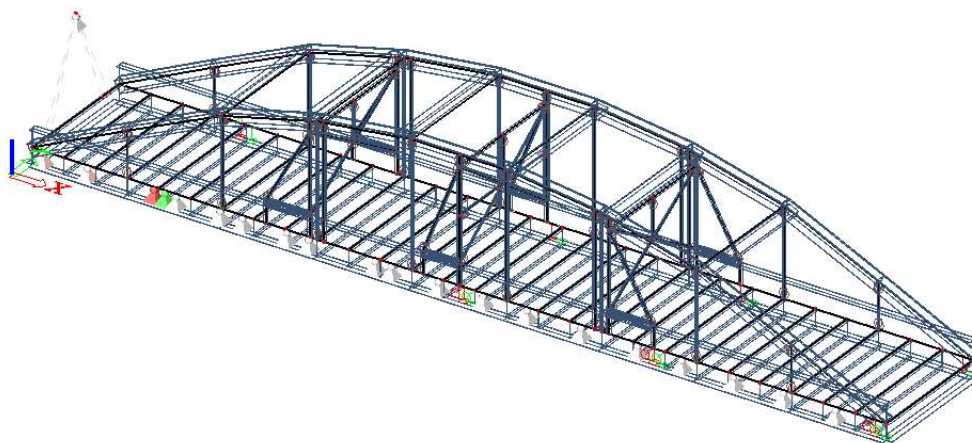
Ukázky zadání fází jsou fáze 2, 3, 4, 13 (Obr. 38 až Obr. 41). Ve fázích 2, 3, 4 je vidět posun podpor a ve fázi 13 zavěšení konstrukce na hák.



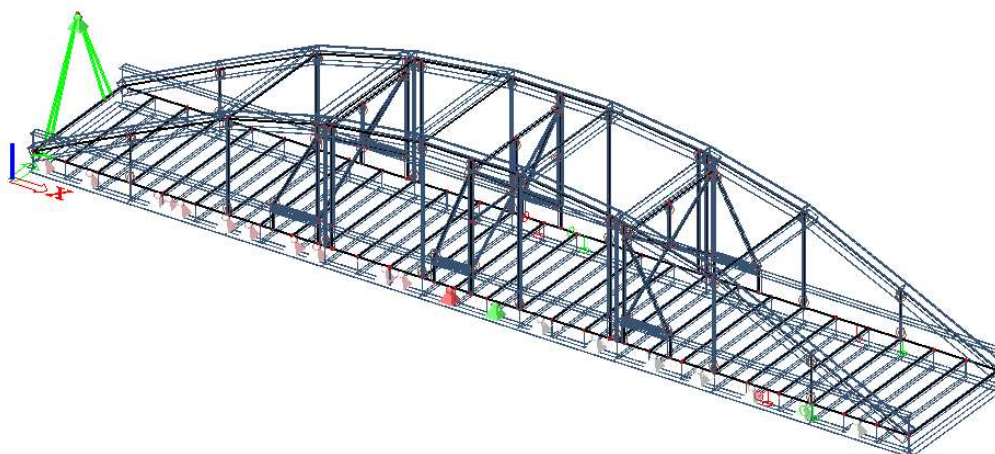
*Obr. 38 2. fáze výstavby – numerický model výsunu*



*Obr. 39 3. fáze výstavby – numerický model výsunu*



*Obr. 40 4. fáze výstavby – numerický model výsunu*

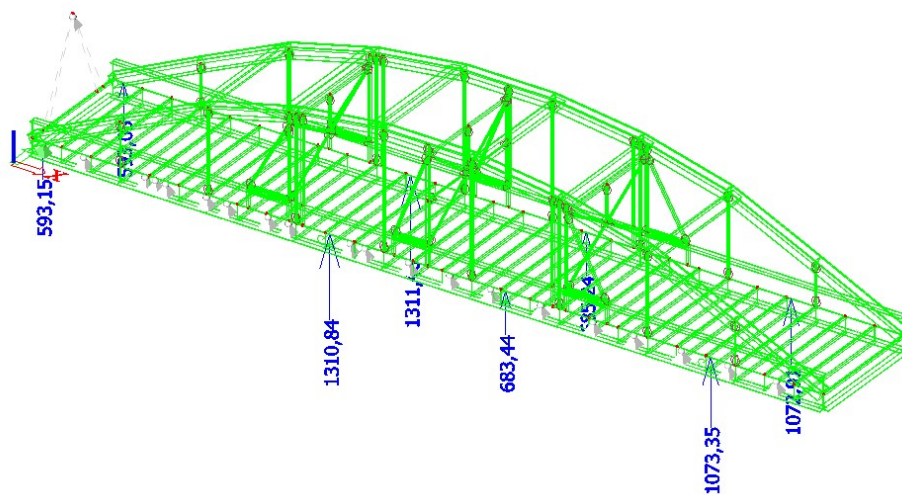


*Obr. 41 13. fáze výstavby – numerický model výsunu*

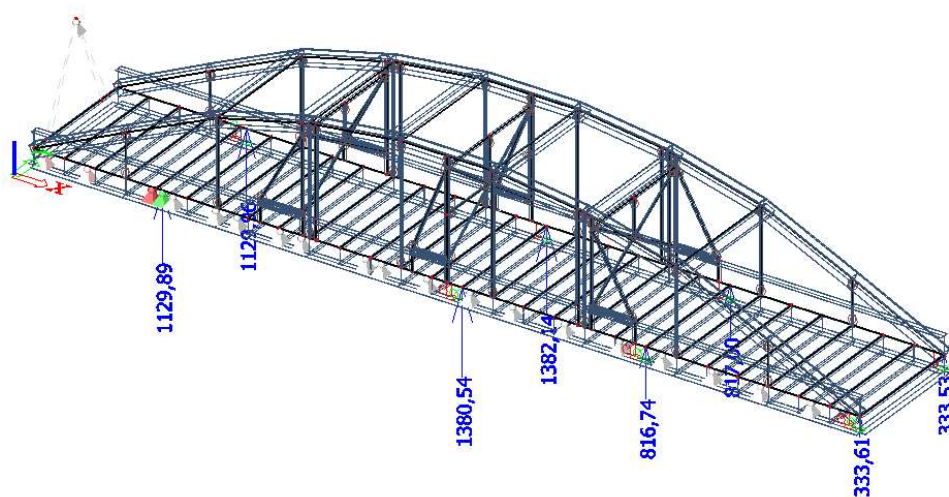
Připojení modelu k pomyslnému jeřábu se provedlo za pomoci čtyř prvků kruhového průřezu a jedné pevné kloubové podpory. Dle výkresu montáže [14].

#### **4.5.4 Výsledky**

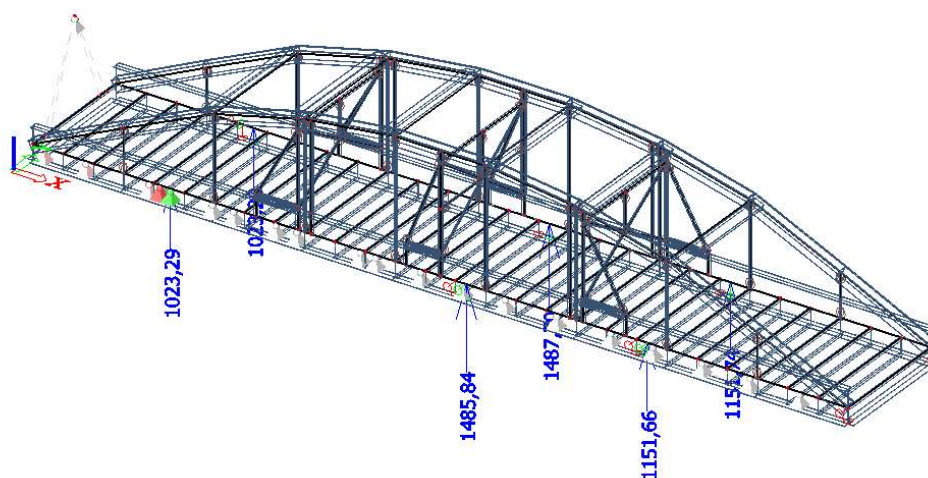
Pro zobrazení výsledků se použily předdefinované kombinace fází v programu. Viz Obr. 42 až Obr. 54). Jsou zde výsledky k porovnání.



Obr. 42 Výsledné reakce [kN] – 1.fáze

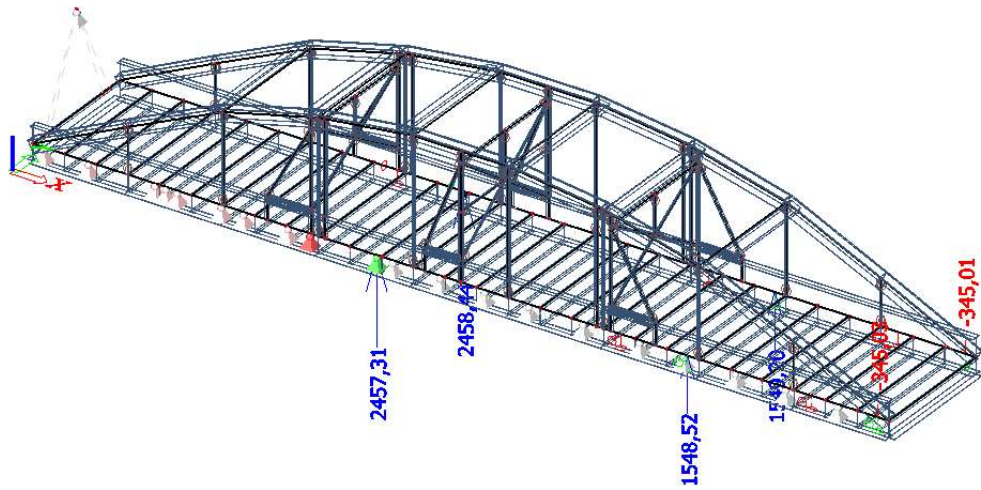


Obr. 43 Výsledné reakce [kN] – 4.fáze

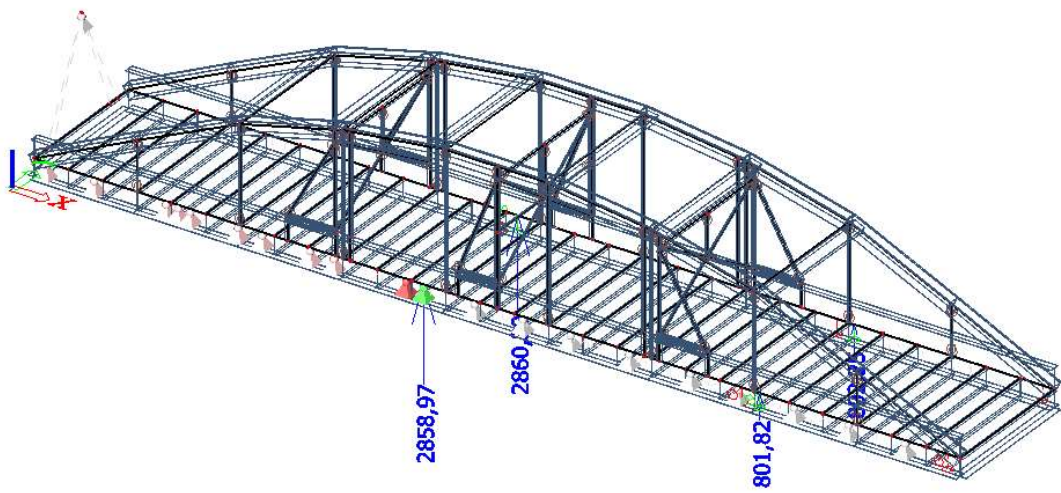


Obr. 44 Výsledné reakce [kN] – 5.fáze

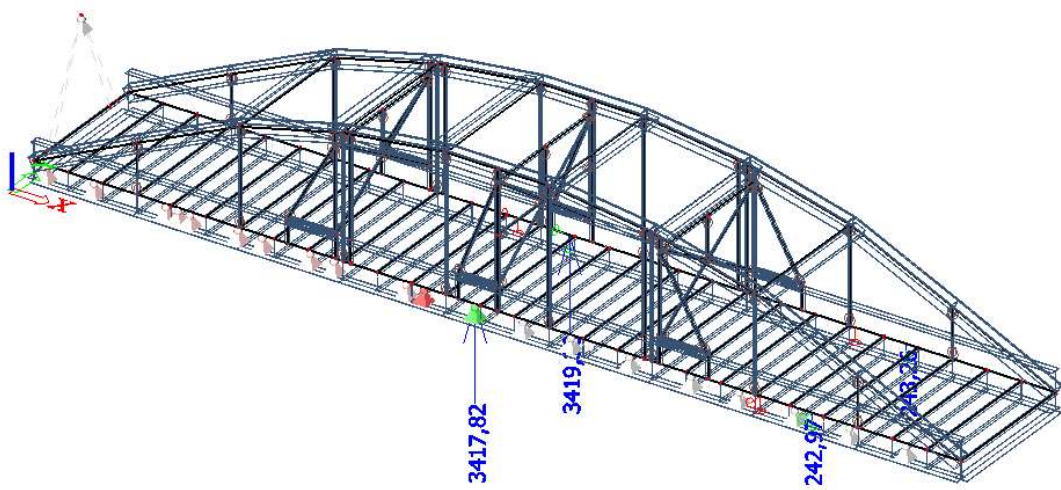




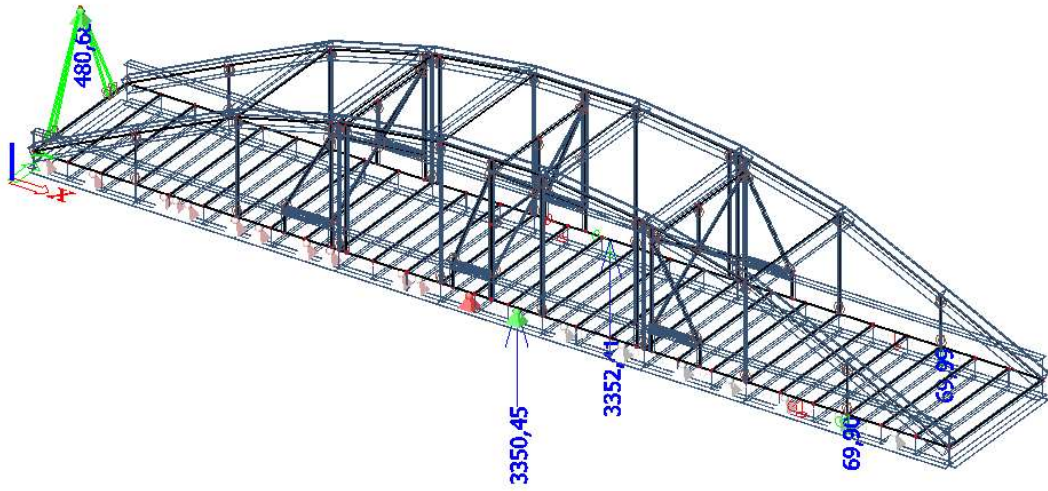
Obr. 45 Výsledné reakce [kN] – 10.fáze



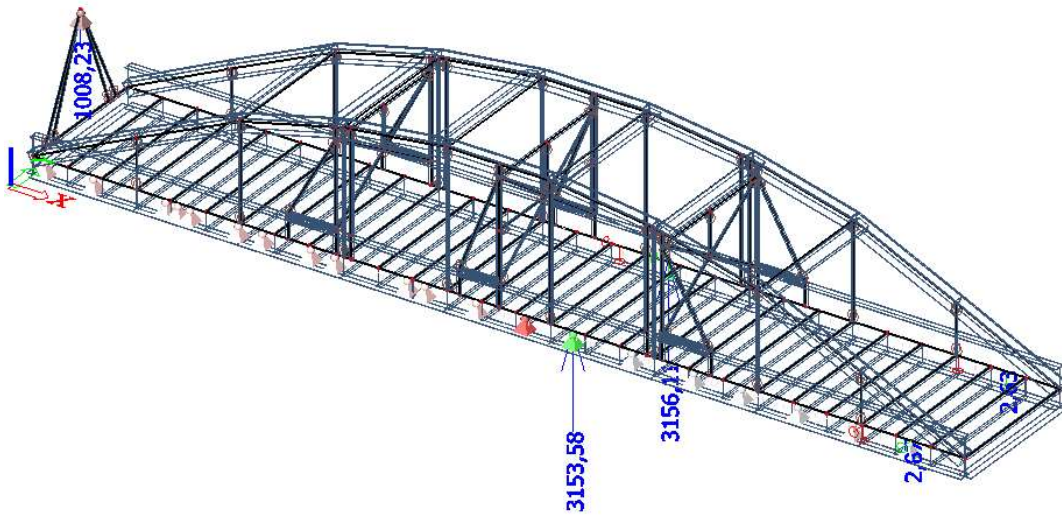
Obr. 46 Výsledné reakce [kN] – 11.fáze



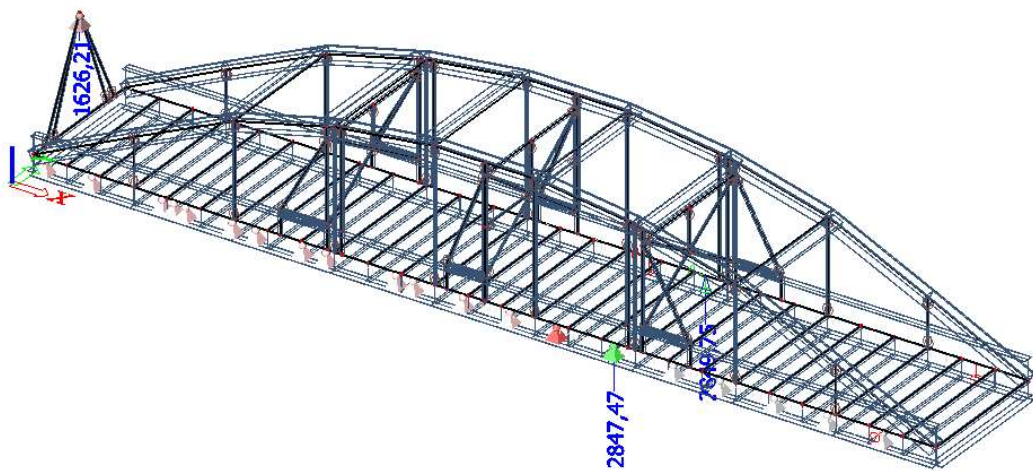
Obr. 47 Výsledné reakce [kN] – 12.fáze



Obr. 48 Výsledné reakce [kN] – 13.fáze

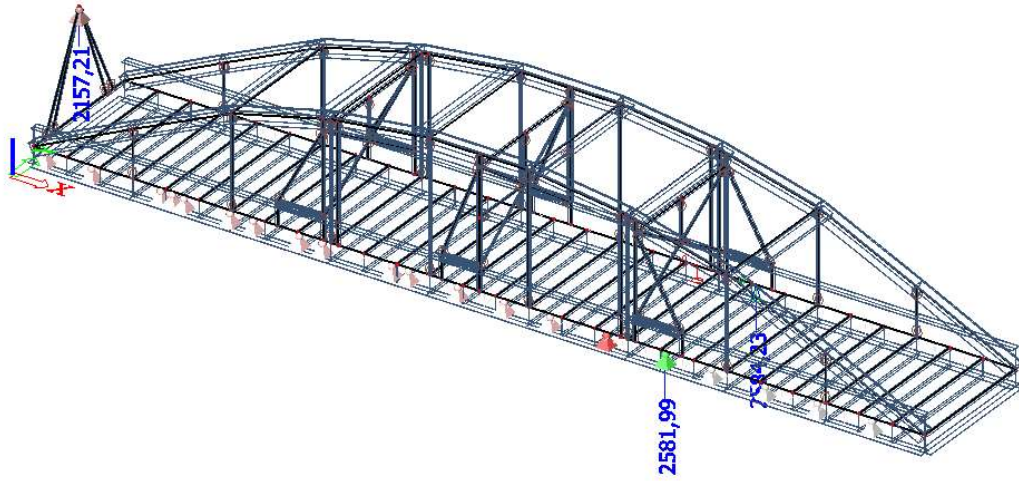


Obr. 49 Výsledné reakce [kN] – 14.fáze

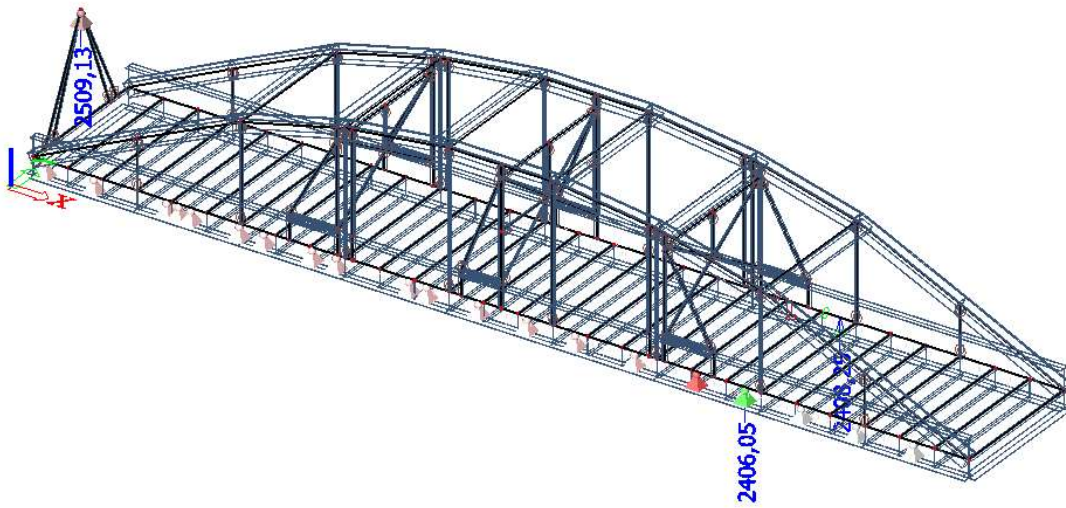


Obr. 50 Výsledné reakce [kN] – 15.fáze

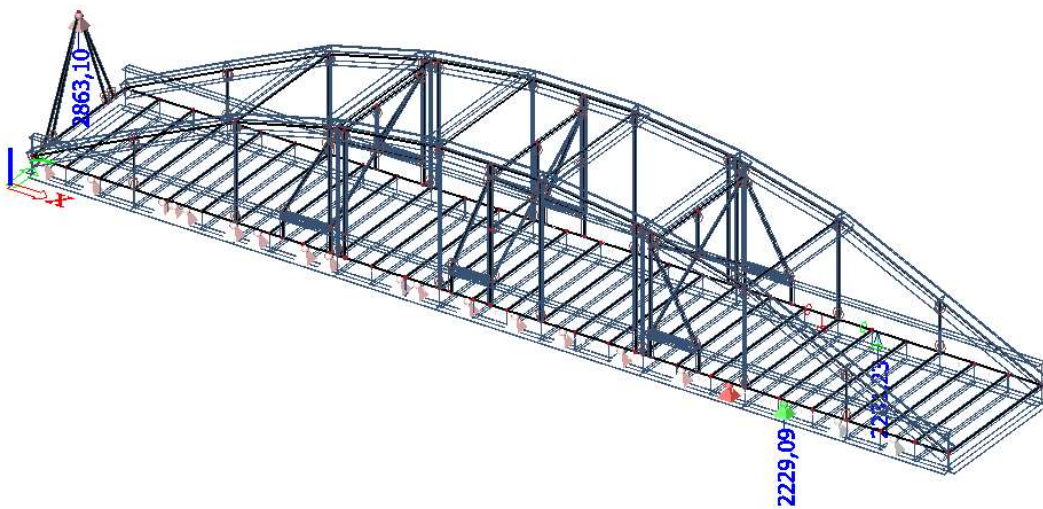




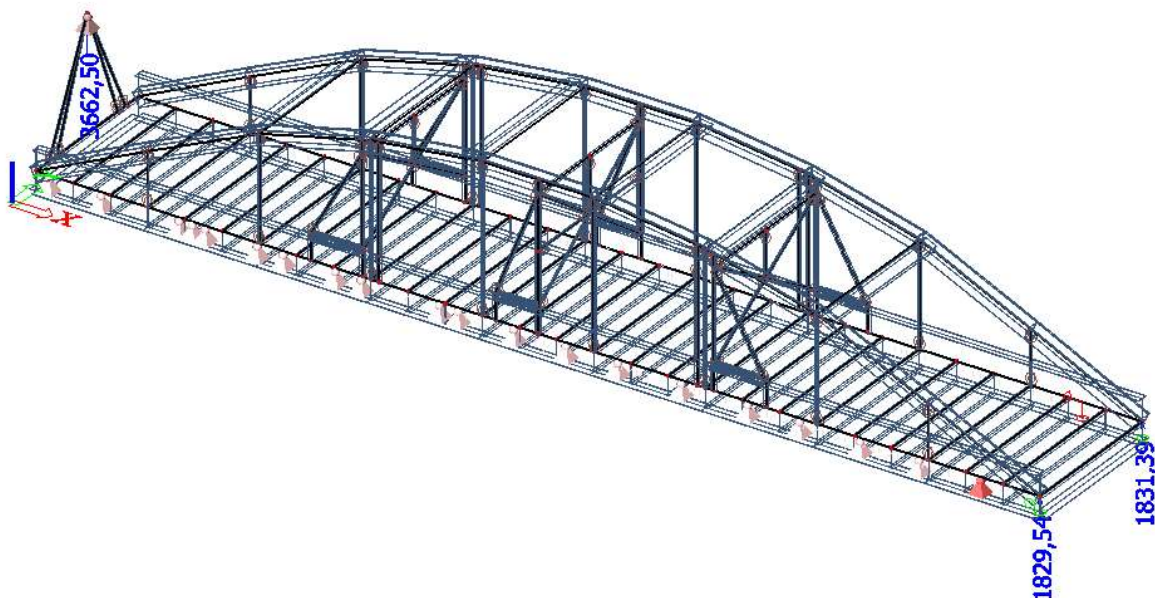
Obr. 51 Výsledné reakce [kN] – 16.fáze



Obr. 52 Výsledné reakce [kN] – 17.fáze



Obr. 53 Výsledné reakce [kN] – 18.fáze



Obr. 54 Výsledné reakce [kN] – 21.fáze

Výsledky porovnatelných fází výstavby jsou shrnuty v tabulce Tab. 5. Na lichém místě je výsledek z modelu, na sudém, pak reakce k porovnání.

Tab. 5 Výsledky v souhrnné tabulce

fáze	Reakce [kN]				
	HÁK	VJ1	VJ2	VJ3	VJ4
1.fáze	0	593	1311	683	1073
1.před výsunem	0	612	1483	681	1224
4.fáze	0	1130	1381	817	334
2.před sjezdem z VJ4	0	1389	1175	1007	428
5.fáze	0	1023	1486	1152	0
3.po sjezdu z VJ4	0	1197	1181	1623	0
10.fáze	0	2457	1549	-345	0
4.před sjezdem z VJ3	0	2895	1374	-296	0
11. fáze	0	2859	802	0	0
5.po sjezdu z VJ3	0	3060	940	0	0
12.fáze	0	3418	243	0	0
6.zavěšení na hák	0	3428	572	0	0
13.fáze	481	3351	70	0	0
zat. jeřábu, vyložení 35,2 m	50	3699	296	0	0
14.fáze	1008	3154	3	0	0
zat. jeřábu, vyložení 31,2 m	392	3804	0	0	0
15.fáze	1626	2847	0	0	0
7.před sjezdem z VJ2	1730	3125	0	0	0
16.fáze	2157	2582	0	0	0
zat. jeřábu, vyložení 19,2 m	2128	2936	0	0	0

17.fáze	2509	2406	0	0	0
zat. jeřábu, vyložení 15,2 m	2544	2729	0	0	0
18.fáze	2863	2229	0	0	0
9.před otáčením	3010	2495	0	0	0
21.fáze	3663	1830	0	0	0
10.před spuštěním	4000	2000	0	0	0

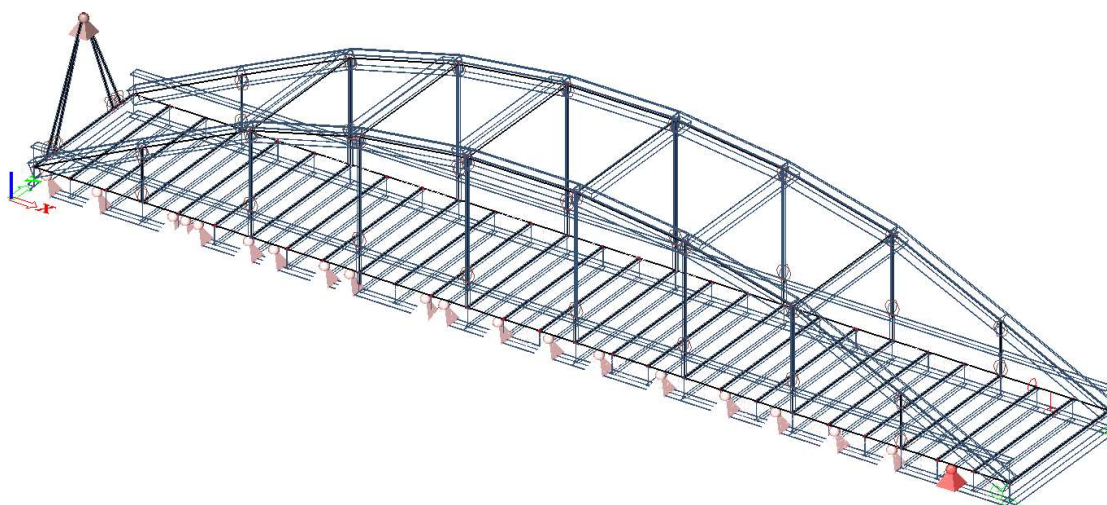
Z porovnání výsledků se ukazuje, že můj model je lehčí a poměry mezi reakcemi se nerovnejí. Ale konstrukce se chovají podobně, příliš se neliší. V porovnání čtvrté fáze je vidět, že by k shodnějšímu výsledku by možná pomohlo zvednutí podpory VJ1 dle podfází. K shodnějšímu výsledku by se dalo dojít použitím nelineárního výpočtu *fází výstavby a provozu*.

## 5 Návrh podpůrné konstrukce

Další část diplomové práce se zabývá výpočtem a návrhem různých způsobů vyztužení oblouku a táhel proti trvalým deformacím vzniklých během montáže.

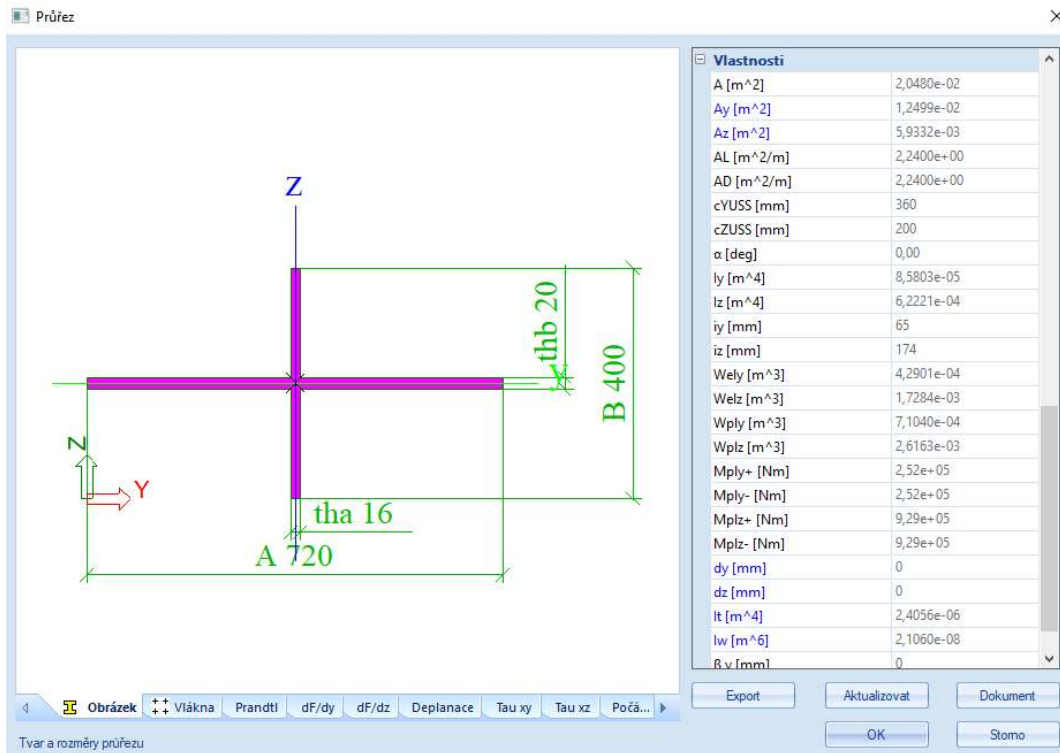
### 5.1 Úprava numerického modelu

Pro další výpočty se numerický model (Obr. 55) upravil tak, aby model pomohl k lepšímu popsání chování táhel. Nejprve se smazala původní podpůrná konstrukce. Upravilo se uložení táhel. Nyní jsou připojena k hlavnímu nosníku přes prvek, který reprezentuje stěnu hlavního nosníku. Průřez tohoto prvku je vidět na Obr. 56. U oblouku tento problém nenastává, protože pomyslný kloub se nachází uvnitř průřezu oblouku.



Obr. 55 Upravený numerický model výsunu





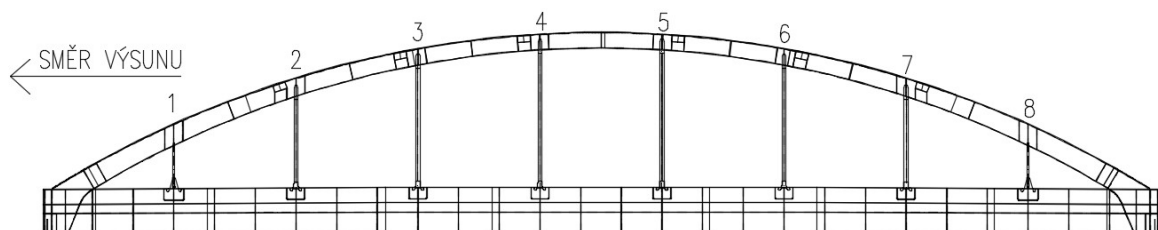
Obr. 56 Průřez reprezentující stěnu hlavního nosníku a výztuhu

Pro rychlejší výpočet se odstranily desky tvořící mostovku. Z tohoto důvodu se také upravil zatěžovací stav. Kombinace se skládá ze zatížení vlastní tíhou a spojitým zatížením na příčníc od mostovky. Spojité zatížení na příčníc je 5,95 kN/m, na koncové příčnící pak poloviční.

$$f_{deska} = B \cdot \gamma \cdot t = 2,86 \cdot 80 \cdot 0,026 = 5,95 \text{ kN/m} \quad (1)$$

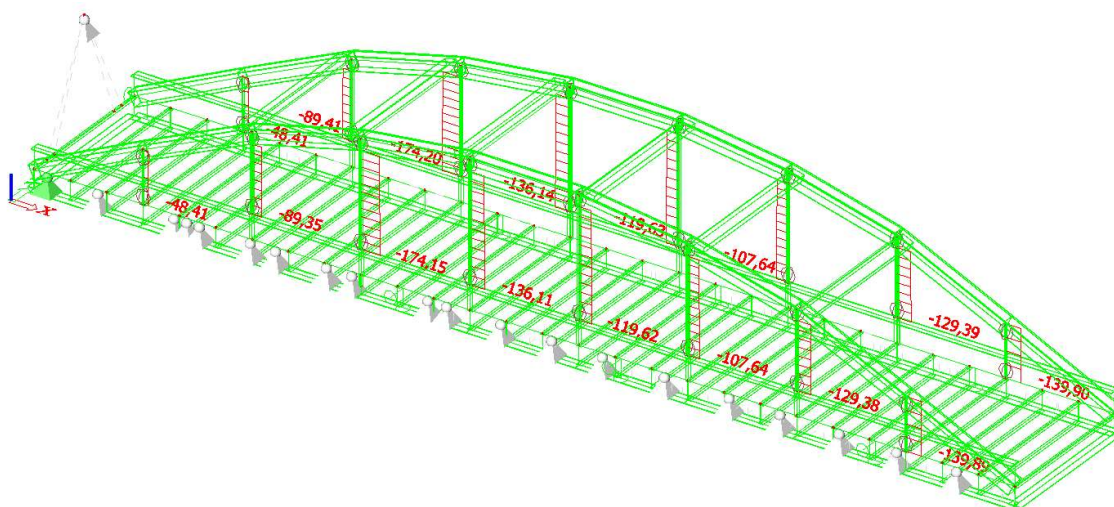
## 5.2 Rozhodující fáze

Nelineární výpočet lze provést pouze pro jednu fázi montáže. Proto vybereme jednu, při které jsou táhla nejvíce namáhána a tu podrobněji vyšetříme. Určení této fáze bude probíhat na modelu bez jakékoliv pomocné konstrukce a ve stejných fázích výstavby jako v předešlém modelu s fázemi výstavby. Abychom přesně popsali varianty ztužení, očíslováme jednotlivá táhla (Obr. 57).

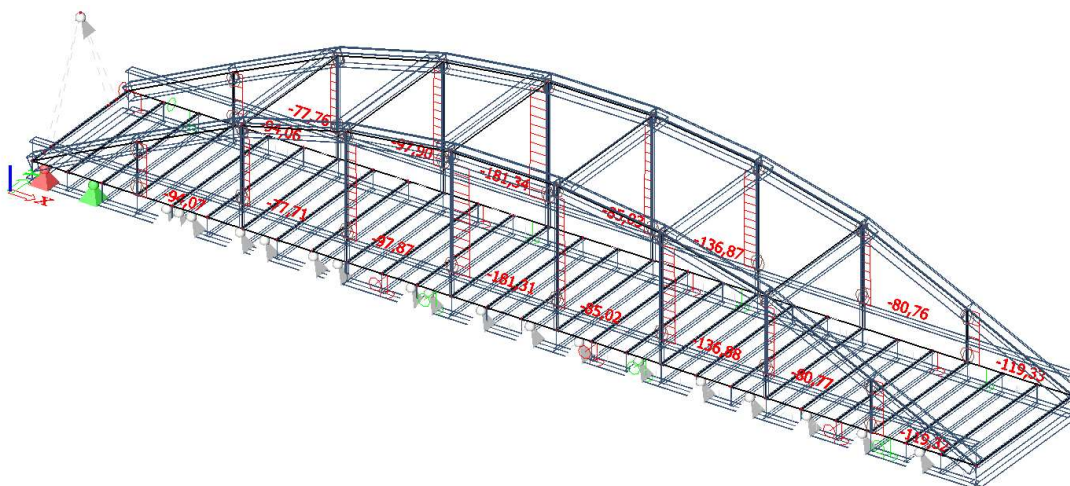


Obr. 57 Očíslování táhel obloukového mostu

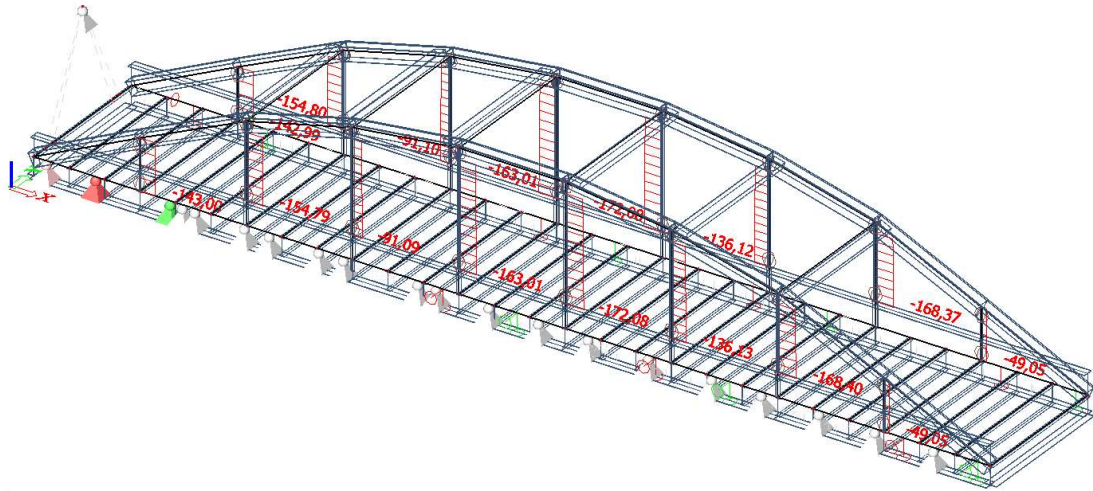
Z výsledků vnitřních sil ve fázích vybereme jen normálové síly v táhlech. Výsledky důležitých fází jsou vidět od Obr. 58 až Obr. 72 a všechny fáze v Tab. 6.



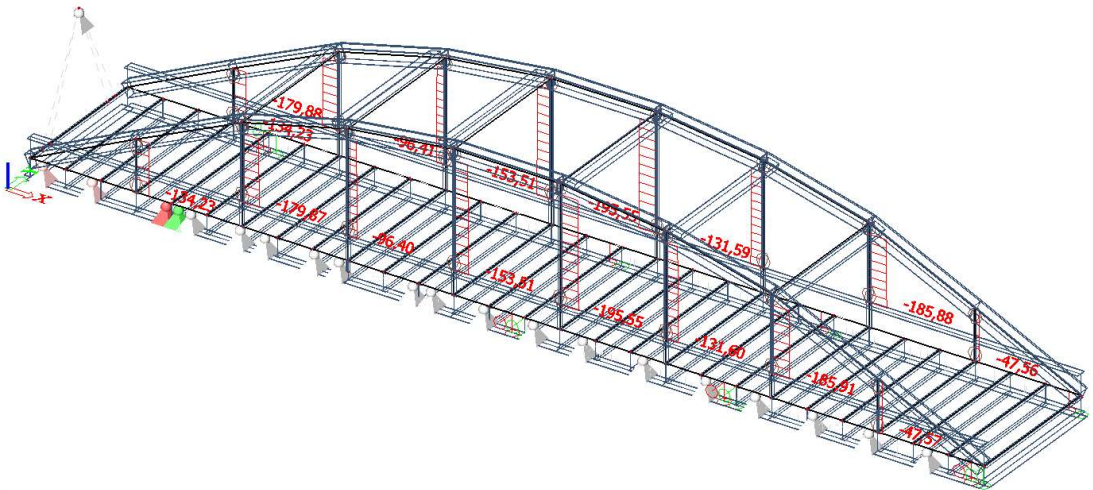
Obr. 58 Normálové síly [kN] v táhlech – 1.fáze – model výsunu bez ztužení



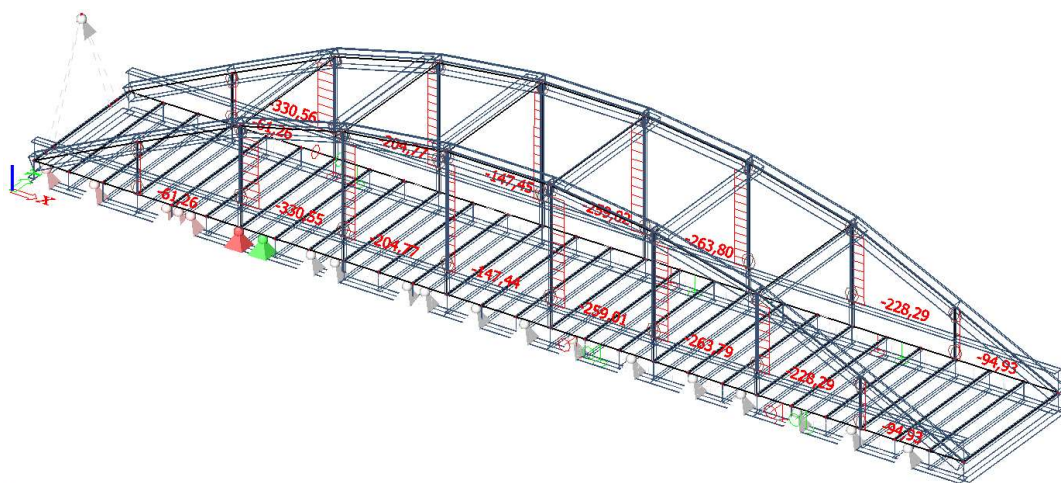
Obr. 59 Normálové síly [kN] v táhlech – 2.fáze – model výsunu bez ztužení



Obr. 60 Normálové síly [kN] v táhlech -3.fáze – model výsunu bez ztužení

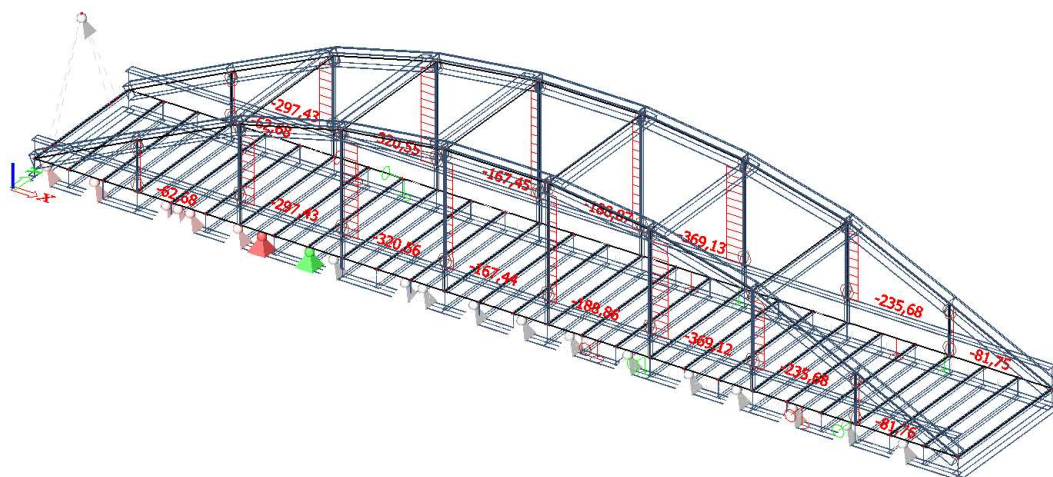


Obr. 61 Normálové síly [kN] v táhlech – 4.fáze – model výsunu bez ztužení

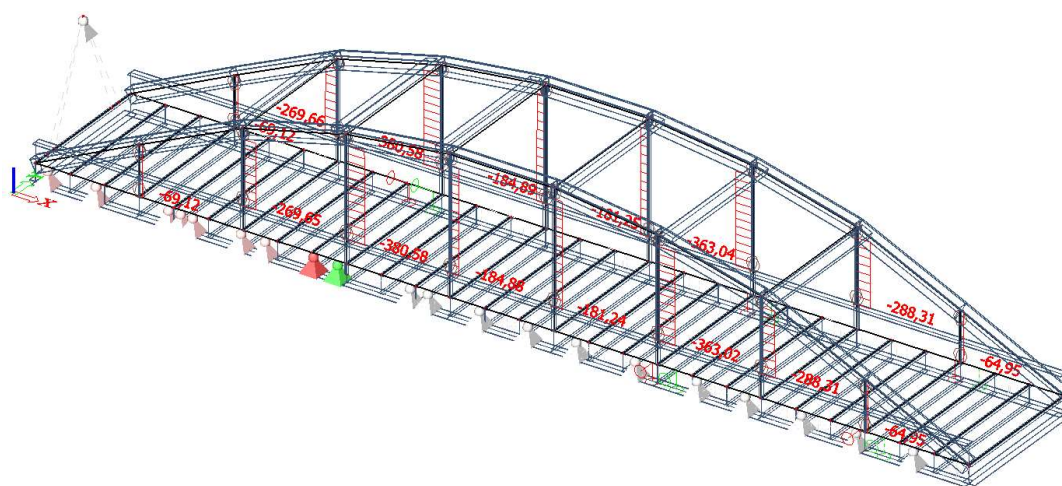


Obr. 62 Normálové síly [kN] v táhlech – 7.fáze – model výsunu bez ztužení

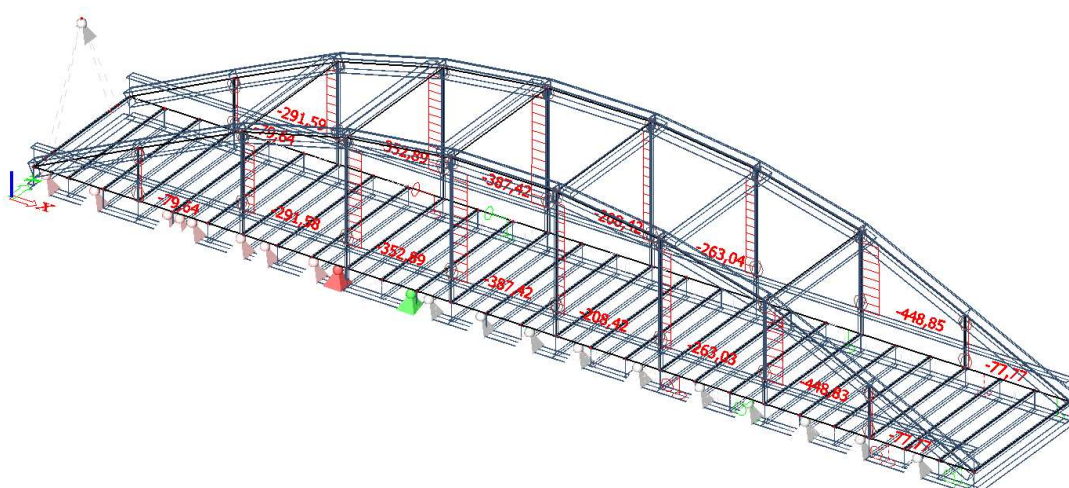




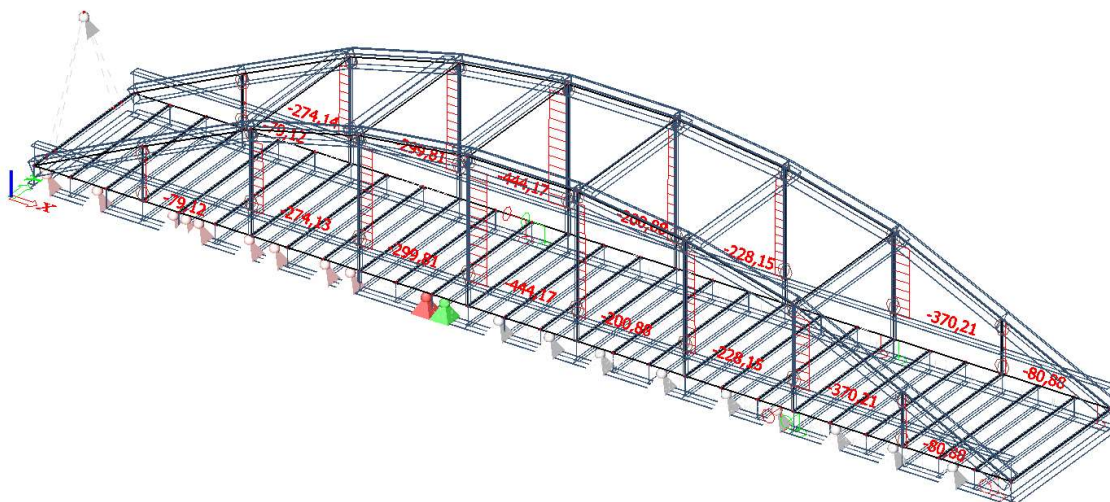
Obr. 63 Normálové síly [kN] v táhlech – 8.fáze – model výsunu bez ztužení



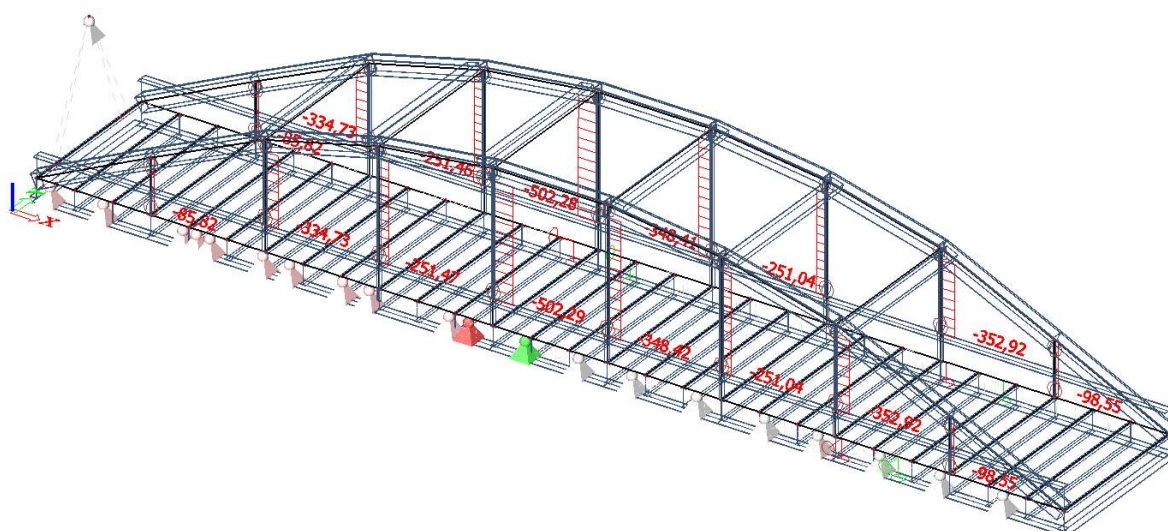
Obr. 64 Normálové síly [kN] v táhlech – 9.fáze – model výsunu bez ztužení



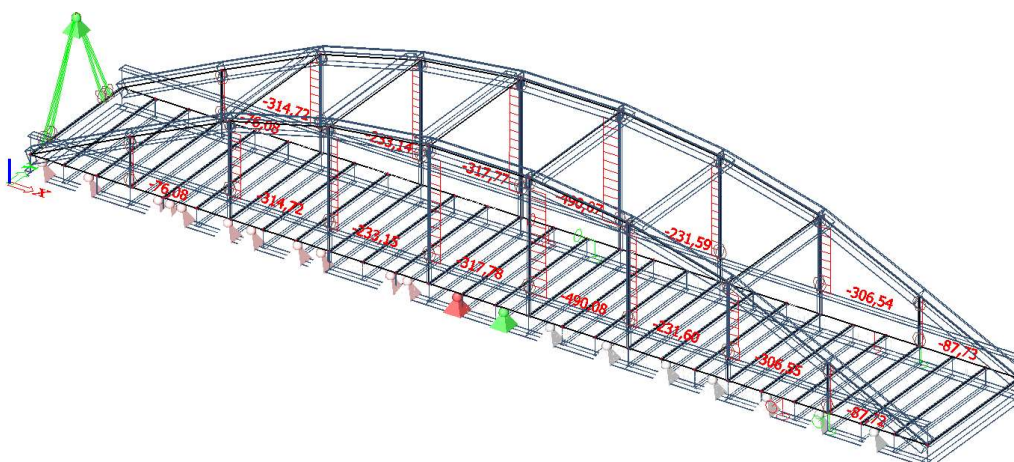
Obr. 65 Normálové síly [kN] v táhlech – 10.fáze – model výsunu bez ztužení



Obr. 66 Normálové síly [kN] v táhlech – 11.fáze – model výsunu bez ztužení



Obr. 67 Normálové síly [kN] v táhlech – 12.fáze – model výsunu bez ztužení



Obr. 68 Normálové síly [kN] v táhlech – 13.fáze – model výsunu bez ztužení

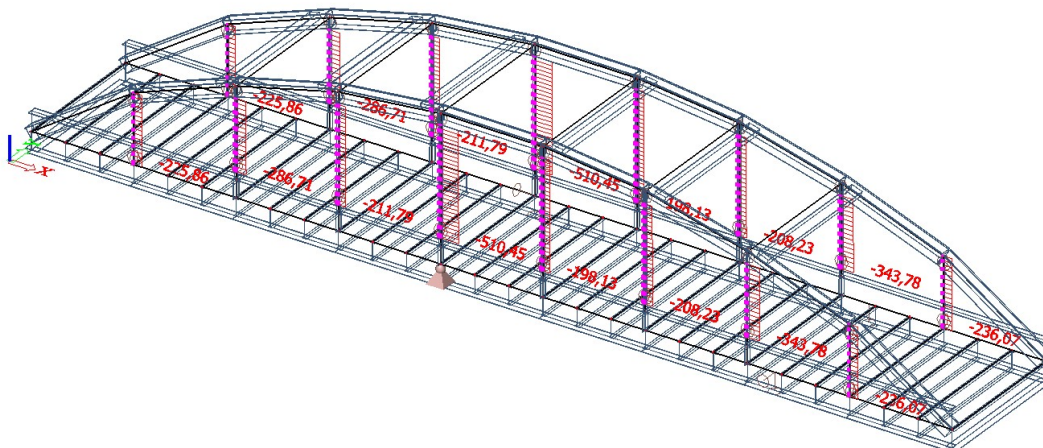






namáháno největší silou v porovnání se všemi fázemi. Táhlo č.4 má také nejdelší kritickou délku.

Jelikož budeme modelovat a přesněji vyšetřovat táhlo 4, tak získáme větší sílu v táhlu, když přesuneme model mezi fáze 11 a 12, kdy se táhlo 4 nachází nad podporou. Na kótě vysunutí 33,32 m.



Obr. 73 Normálové síly [kN] v táhlech – mezi 11. a 12. fází – model výsunu bez ztužení

Vidíme (Obr. 73), že v táhlu vyšel tlak 510,5 kN. Tento tlak je vyšší než 502,3 kN, proto budeme tuto podfázi vyšetřovat pro varianty ztužení táhel.

Spočteme kritické síly v jednotlivých táhlech, abychom zjistili, jaká táhla mohou vybočit a bude tak potřeba je vyztužit. Kritické délky jednotlivých táhel pochází z výkresu táhel a jsou to délky táhel mezi přivařením k hlavnímu nosníku a k oblouku. Za svarem se plech rozšiřuje a mění tak svůj průřez.

Tab. 7 Výpočet kritické síly v táhlech

č. táhla	1,8	2,7	3,6	4,5
$L_{cr}$ [m]	3,031	5,803	7,965	9,034
$E_s$ [MPa]	210000	210000	210000	210000
$I_z$ [m <sup>4</sup> ]	8,6787E-06	3,8175E-06	3,818E-06	3,82E-06
$N_{cr}$ [kN]	1958,0	235,0	124,7	96,9

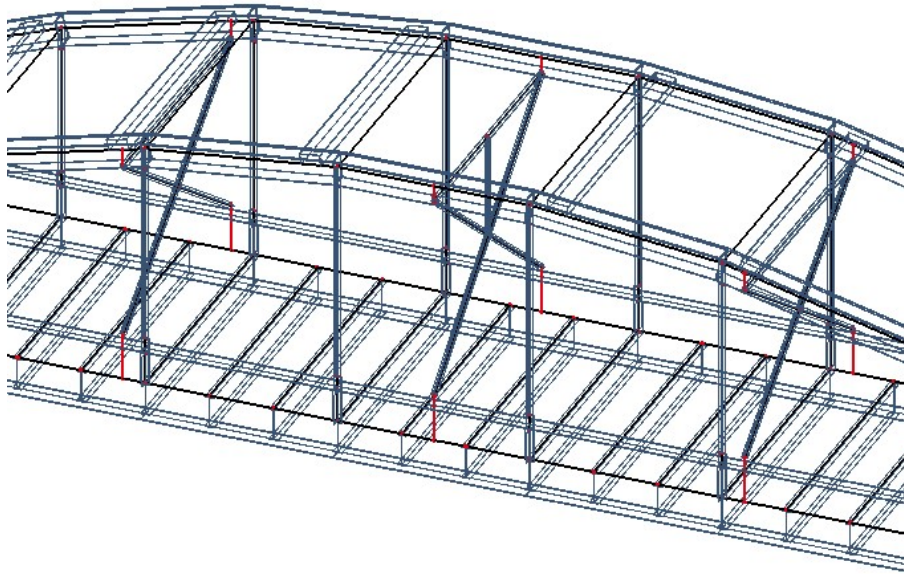
$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (2)$$

Vidíme, že nejmenší kritická síla je pro táhla 4 a 5 a že kritická síla táhel 1 a 8 je mnohem větší než největší tlaková síla v táhlu během výsunu.



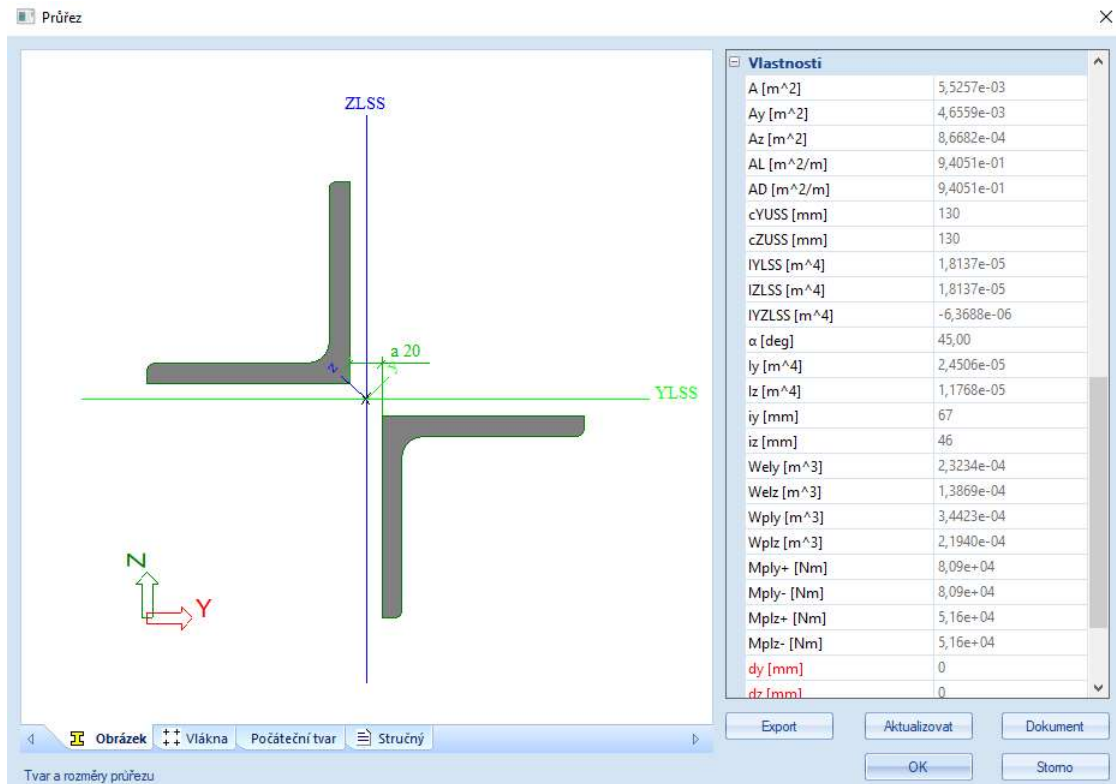
### 5.3 Příčné ztužení pro všechny varianty

Aby nedošlo ke zkreslení výsledků, budou mít všechny varianty stejné příčné ztužení. Ztužení se bude nacházet ve třech příčných rovinách na mostě. Jedno se nachází v polovině rozpětí a liší se od dalších svislým prvkem mezi průnikem diagonálních ztužidel a vodorovným nosníkem ztužidla. Další dvě ztužidla se nachází mezi táhly 3 a 4 a 6 a 7. Pozice ztužidla je 1 metr od táhel 4 resp. 6.

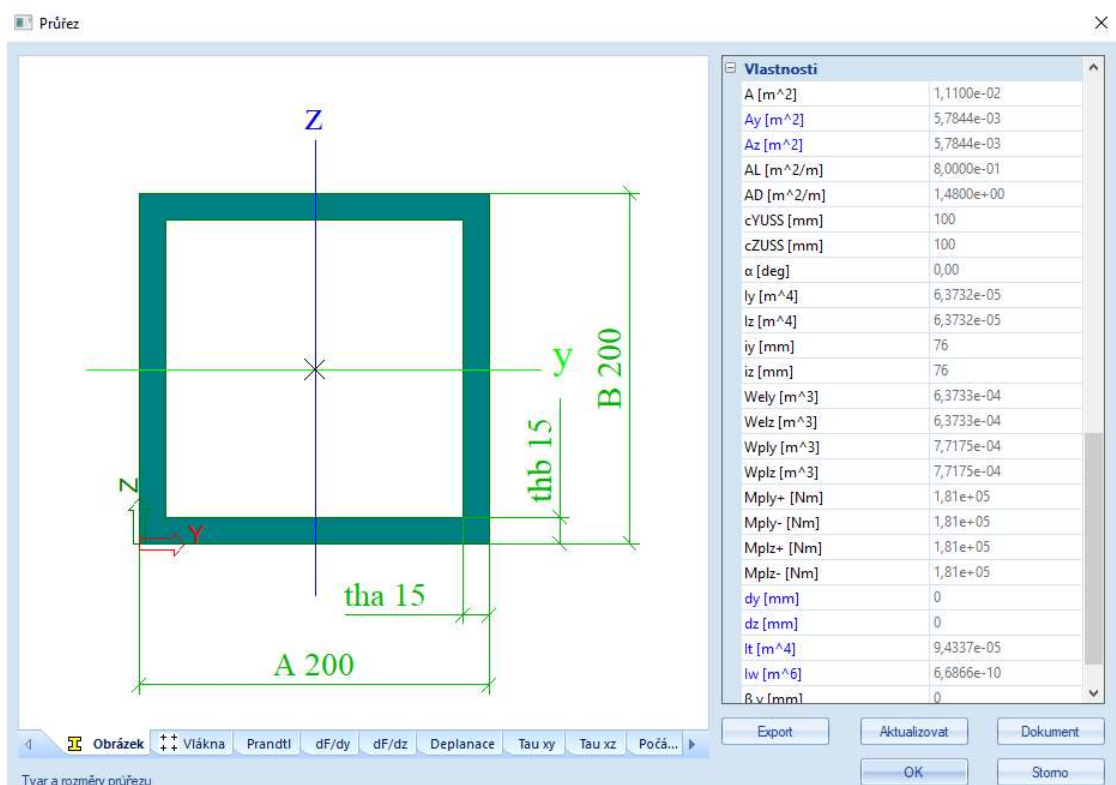


*Obr. 74 Numerický model – příčné ztužení*

Ztužení (Obr. 74) se skládá z diagonál ze dvou úhelníků L120x12 (Obr. 75), tento průřez platí i pro svislý prvek na prostředním ztužení. Poté je zde horizontální ztužující prvek v horní části ztužení, který spojuje připojení diagonál k oblouku. Má uzavřený čtvercový průřez 200x15 (Obr. 76).



Obr. 75 Průřez L120x12 – příčné ztužení



Obr. 76 Průřez 200x15 – příčné ztužení

Ztužidlo je připojeno v modelu k hlavnímu nosníku a oblouku *tuhými rameny*.

## 5.4 Deskostěnový numerický model

Chceme-li popsat lépe deformace táhla během vysouvání mostu, použijeme deskostěnový numerický model. Tento model se může přiblížit skutečnému tvaru konstrukce. Ovšem při takové složitosti modelu se zvyšuje potřeba na vyšší výkon výpočetní techniky. Proto nebudeme modelovat celý most ale jen výsek kolem táhla. Výpočet bude nelineární s počátečními imperfekcemi a metoda výpočtu bude Newton-Raphson (3.řád, velké deformace).

Vymodelujeme výsek kolem levého táhla 4. Na každou stranu od táhla vymodelujeme hlavní nosník v délce 2 m. Nosník oblouku bude vymodelován jen ve vzdálenosti 0,7 m od táhla na obě strany. Mostovka bude vymodelována do vzdálenosti 2 m od táhla.

Pro výpočet se bude nadále používat software Scia Engineer.

### 5.4.1 Popis

Deskostěnová část numerického modelu by se mohla rozdělit na tři důležité části. První je hlavní nosník s mostovkou, kde se musí řešit plynulé změny tloušťek prvků, jejich spojení a vymodelování výsuvné stolice. Druhou je táhlo, které se musí připravit na zadání počátečního vybočení. Třetí je část oblouku, kterou bylo složité vymodelovat, protože táhlo je připojeno uvnitř průřezu oblouku.

Třída oceli prvků konstrukce je S355 a prvků ztužení je S235.

#### 5.4.1.1 Hlavní nosník, mostovka a výsuvná stolice

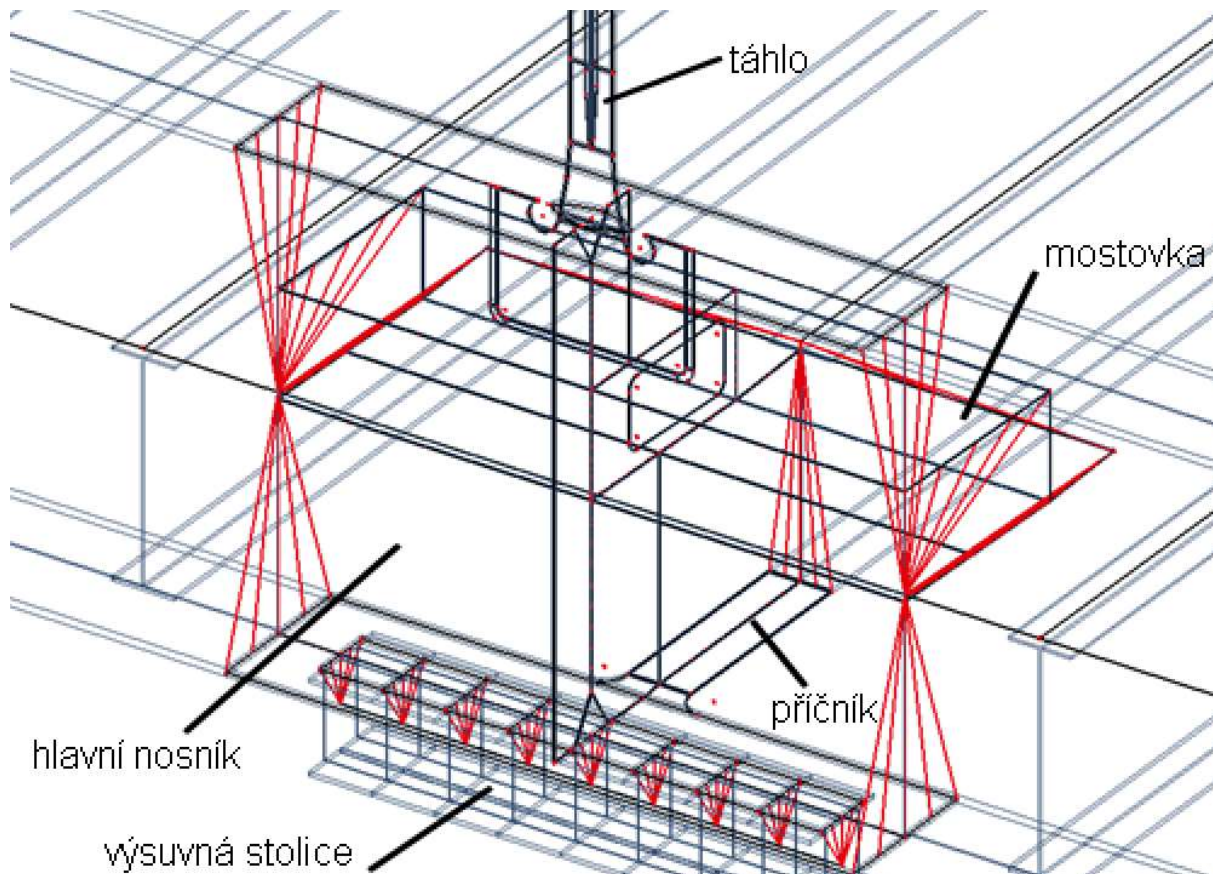
Komponenty hlavního nosníku sestavíme od původní střednice. Nejdříve vytvoříme stojiny tloušťky 16 mm. Směrem vzhůru 1671 mm a směrem dolů 1469 mm. Poté přidáme na tyto vzniklé linie pásnice šířky 1000 mm (dolní) a 820 mm (horní) s tloušťkou 50 mm.

Vytvoříme v horní části stojiny výsek pro zesílení kvůli přípoji. Otvor je široký 1,3 m a vysoký 0,825 m se zaoblením s poloměrem 100 mm. Do otvoru pak umístíme prvky reprezentující plynulý přechod tloušťky ze 16 mm na 40 mm v délce 48 mm. V zaobleném rohu výseku zanecháme tloušťku konstantní, nejde vytvořit kuželovou plochu. Zbytek do výšky horní pásnice vyplníme deskou tloušťky 40 mm. Nyní je potřeba vyříznout otvory v horní pásnici a v horní části upravené stojiny. Vyřízneme dva kruhy s poloměrem 100 mm, které mají střed umístěný 85 mm pod střednicovou rovinou horní pásnice a 310 mm od osy táhla. Poté ještě ořízneme tento prvek o 75 mm. Na toto místo přidáme prvek, který reprezentuje spojení stojiny a táhla. Jeho tloušťka je 50 mm a změna ze 40 mm probíhá v délce 50 mm. Prvek mění



plynule šířku z 420 mm na 270 mm u táhla ve výšce 424 mm nad střednicovou rovinou horní pásnice. Nakonec uděláme přibližný elipsovité otvor v horní pásnici délky 500 mm a šířky 200 mm.

Dále přidáme výztuhu šířky 360 mm a tloušťky 20 mm na vnější straně hlavního nosníku šířky i se zkosením 265/160 mm.



*Obr. 77 Deskostěnový model – hlavní nosník a výsuvná stolice*

Mostovku a příčník vmodelujeme společně. Začneme u dolní pásnice hlavního nosníku. Tady se mění tloušťka z 50 mm na 25 mm v délce 150 mm, přechod je půdorysně zaoblen oblouky s poloměrem 150 mm. Dílec se mění s dolní pásnicí příčníku, která má šířku 400 mm a tloušťku 25 mm. Následuje stojina příčníku s tloušťkou 20 mm., která má proměnnou výšku přibližně 1,4 m. Poté se přidá mostovkový plech 16 mm v rovině pomyslné horní pásnice příčníku a také komora s výškou 670 mm a šířkou 1385 mm, do které se přidá výztuha tloušťky 16 mm s otvorem. Ještě se přidá vnitřní výztuha hlavního nosníku stejně jako na vnější straně do zbylého prostoru. Výztuhy mostovky byly zanedbány.

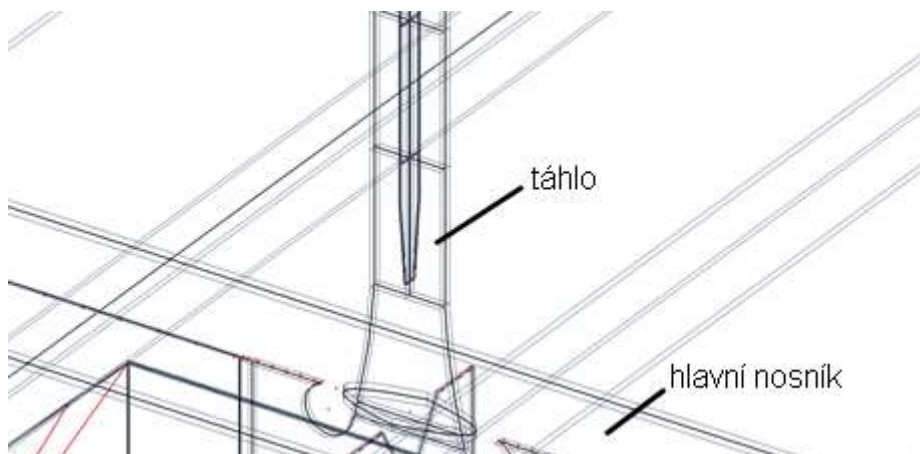
Aby model správně pracoval, musí se připojit k původním střednicím hlavního nosníku a příčníku. Na spojení mezi uzlem a linií se použila funkcionalita *liniová tuhá ramena*, při nichž se spojil uzel na střednici s příslušnou linií jak na stojině tak na pásnici nebo plechu mostovky.

Nakonec se vytvoří otvor 3,2 m x 0,4 m v dolní pásnici, do kterého se vloží stejně tlusté destičky po 0,4 m, které vytvoří linie na přenos zatížení z hlavního nosníku na vymodelovanou vysouvací stolici. Střednice vysouvací stolice se nachází 0,3 m pod střednicovou rovinou dolní pásnice. Příčný řez stolice je 2 x HEA 600. Nosník stolice je tvořen nosníky po 0,4 m. Ty jsou spojeny uzlem, který je ve všech směrech tuhý jen ne ve směru střednice stolice. To je z důvodu, aby se mohl hlavní nosník v tomto směru deformovat a nebyl tak v tomto směru omezen. Nakonec se spojily uzly s přilehlými hranami na dolní pásnici *tuhým liniovým ramenem* a doprostřed stolice se umístila kloubová podpora.

Ztvárnění výsuvné stolice se nepovedlo vytvořit za pomoci *plošné podpory*, model nedával symetrické výsledky, a tak musel být předělán.

#### 5.4.1.2 Táhlo

Táhlo výšky 9,0 m je rozděleno na úseky po 0,5 m, aby se mohla snadno zadat počáteční imperfekce na prutu. Průřez táhla je vytvořen ze dvou párů stěn umístěných kolem střednice. Tlustší stěny šířky 135 mm s tloušťkou 50 mm a výztuha šířky 55 mm s tloušťkou 10 mm. Vznikne tak průřez široký 270 mm a tlustý 110 mm v místě výztuhy. (Obr. 78)



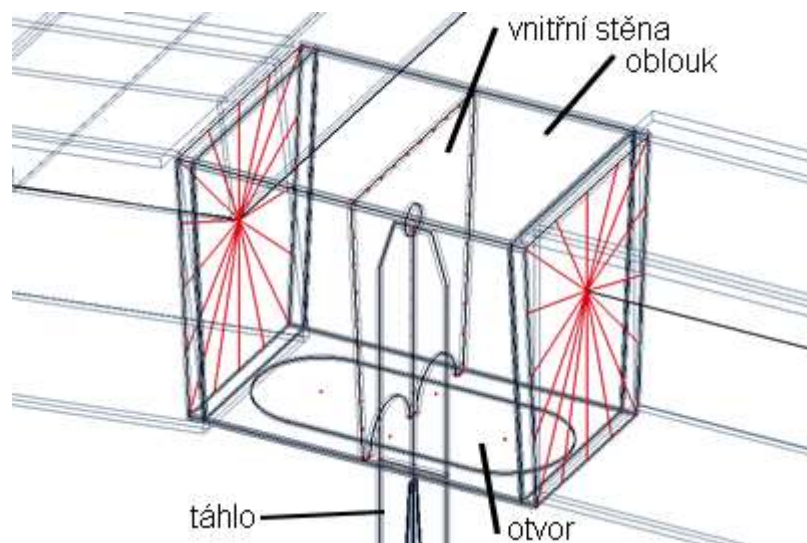
Obr. 78 Deskostěnový model – táhlo a přípoj na hlavní nosník

Na obou koncích pak výztuha plynule končí 50 mm před koncem táhla a délka změny výztuhy je 300 mm.

### 5.4.1.3 Oblouk

Z připojení táhla k oblouku pokračujeme k dokončení deskostěnového modelu. Na konec táhla nasadíme prvek výšky 975 mm se zkosením 200/60 mm. Kolmo na tuto část táhla nasadíme vnitřní výztuhu obloukového nosníku tloušťky 30 mm. Výztuha je vysoká 1086 mm, v dolní části široká 760 mm a v horní části 940 mm. Do výztuhy ještě uděláme dva otvory v dolní části a jeden v horní části u táhla. První dva s poloměrem 150 mm a druhý pak 60 mm.

Poté kolem výztuhy vytvoříme komoru nosníku oblouku. Od osy táhla vytvoříme stěny a horní a dolní pás do vzdálenosti 0,64 m ve směru mostu, kde poté přidáme další výztuhu tloušťky 16 mm. Stěny a dolní pás mají tloušťku 20 mm, horní pak 40 mm. V dolním pásu ještě vytvoříme otvor pro táhlo. Je široký 500 mm a dlouhý 1200 mm. Konce jsou zaobleny obloukem s poloměrem 250 mm. Prvky nosníku ještě protáhneme na vzdálenost 0,7 m od osy táhla, kde použijeme stejné spojení *liniovými tuhými rameny* mezi uzlem prutu a hranami deskostěnového modelu.



Obr. 79 Deskostěnový model – oblouk

## 5.5 Imperfekce

Protože výroba stavebních konstrukcí není nikdy dokonalá, je potřeba počítat s nedokonalostmi konstrukce. Nedokonalosti konstrukce mohou být počáteční deformace, reziduální pnutí od válcování nebo svařování, také excentricity v uložení a ve spojích. Pro výpočet podle Eurokódu stačí zavést ekvivalentní geometrické imperfekce. Měli bychom použít globální imperfekce soustavy a výztužného systému a lokální imperfekce jednotlivých prutů.

Do modelu zavedeme imperfekce následovně:

a) Imperfekce soustavy [15]

Zjistíme počáteční naklonění soustavy. Zadáme je do nelineární kombinace. Výška konstrukce je 12 m, a máme dvě roviny oblouků. Základní hodnota je  $\phi_0=1/200$

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (3)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0,58, \text{ ale } \frac{2}{3} < \alpha_h < 1,0 \quad (4)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{3} \quad (5)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,866 ; m = 2 \text{ (řady sloupů)} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{1}{200} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,866 = 0,0029 \quad (7)$$

b) Imperfekce prutů

Tab. 8 Návrhové hodnoty imperfekcí ve tvaru počátečního prohnutí  $e_0/L$  [15]

Křivka vzpěrné pevnosti	Pružnostní analýza	Plasticitní analýza
	$e_0/L$	
$a_0$	1/350	1/300
$a$	1/300	1/250
$b$	1/250	1/200
$c$	1/200	1/150
$d$	1/150	1/100

L je délka prutu. V našem případě se rovná 9,0 m u táhla 4 a 5.

## 5.6 Studie napětí v závislosti na počáteční imperfekci táhla

Počáteční imperfekce zavedeme od 1/300 do 1/100. Dále je potřeba zjistit, kolik budou jednotlivé počáteční vodorovné posuny na táhlu po 0,5 metru výšky. K tomu využijeme rovnici průhybu pro prostý nosník a rovnici ohybové čáry.

$$w_0 = \frac{5}{384} \cdot \frac{f \cdot L^4}{EI} \quad (8)$$

$$f = \frac{w_0 \cdot 384 \cdot EI}{5 \cdot L^4} \quad (9)$$

$$w(x) = \frac{f \cdot x^4}{24 \cdot EI} - \frac{f \cdot L \cdot x^3}{12 \cdot EI} + \frac{f \cdot L^3 \cdot x}{24 \cdot EI} \quad (10)$$

$$w(x) = \frac{16}{5} \cdot w_0 \cdot \frac{x^4}{L^4} - \frac{32}{5} \cdot w_0 \cdot \frac{x^3}{L^3} + \frac{16}{5} \cdot w_0 \cdot \frac{x}{L} \quad (11)$$

Nejdříve si vyjádříme zatížení z rovnice průhybu prostého nosníku. Poté tuto rovnici dosadíme do rovnice ohybové čáry. Z upravené rovnice ohybové čáry vyjádříme posuny jednotlivých bodů. Jednotlivé vodorovné posuny jsou shrnuty v Tab. 9.

Tab. 9 Počáteční posunutí jednotlivých bodů na táhlu pro všechny hodnoty imperfekcí

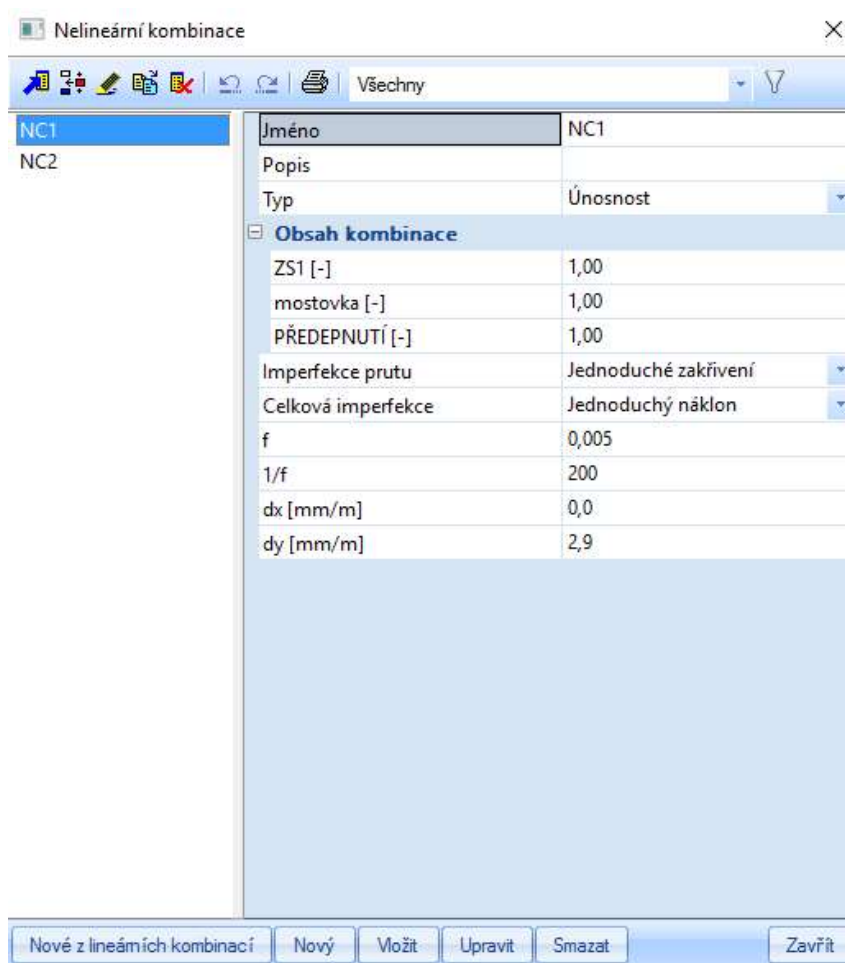
[mm]

e <sub>0</sub> /L	1/100	1/150	1/200	1/250	1/300
w <sub>0</sub>	90	60	45	36	30
0	0	0	0	0	0
0,5	16	11	8	6	5
1	31	21	16	13	10
1,5	46	30	23	18	15
2	58	39	29	23	19
2,5	69	46	35	28	23
3	78	52	39	31	26
3,5	85	56	42	34	28
4	89	59	44	35	30
4,5	90	60	45	36	30
5	89	59	44	35	30
5,5	85	56	42	34	28
6	78	52	39	31	26
6,5	69	46	35	28	23
7	58	39	29	23	19
7,5	46	30	23	18	15
8	31	21	16	13	10
8,5	16	11	8	6	5
9	0	0	0	0	0

### 5.6.1 Nastavení řešiče a zadání imperfekcí

Po zadání počátečních imperfekcí necháme program spustit výpočet. Použitá metoda bude Newton-Raphson při osmi přírůstcích.

Také musíme zadat do nelineárních kombinací imperfekce. Podle počáteční imperfekce doplníme počáteční imperfekce od 1/300 do 1/100. Pak také zadáme imperfekci soustavy 2,9 mm/m. Zatěžovací stav *předepnutí* se nachází jen u ztužení HEA160, HEA 220 a HEA300. Viz (Obr. 80)



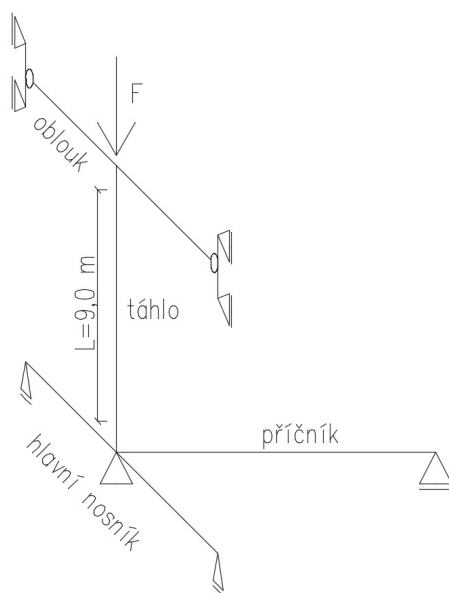
*Obr. 80 Deskostěnový model – nastavení nelineárních kombinací a imperfekcí Scia Engineer*

## 5.7 Únosnost táhla

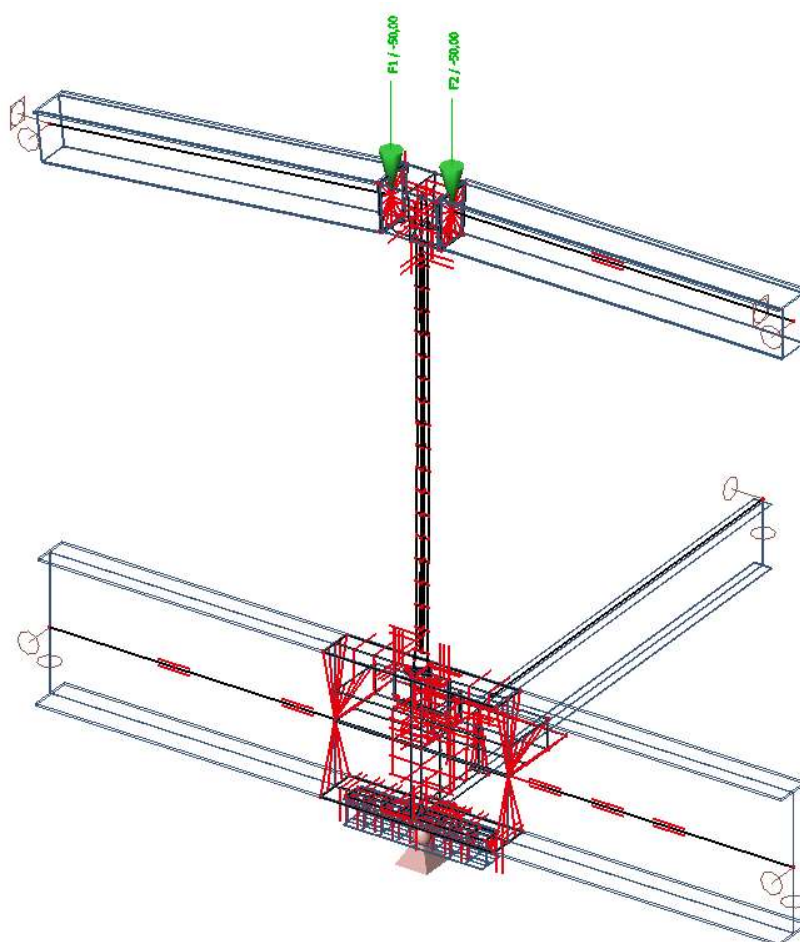
Ještě předtím, než začneme ověřovat jednotlivé varianty ztužení, tak z jednoduchého modelu získaného z modelu celého mostu, určíme průběh napětí a vodorovných deformací při působící síle. Model se skládá z deskostěnového modelu táhla a sousedních prutových prvků.

Statické schéma je vidět na Obr. 81, ukázka z programu Scia pak na Obr. 82. Únosnost byla řešena pro počáteční imperfekci prutu  $e_0/L = 1/100$  až  $1/200$ .



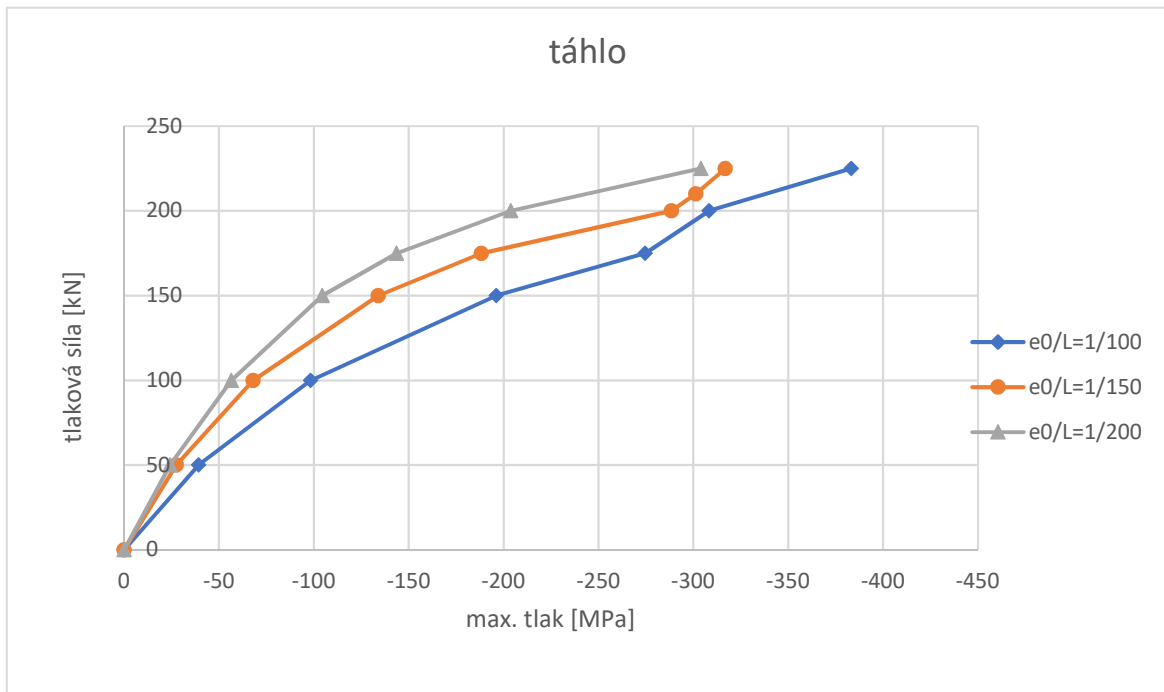


Obr. 81 Deskostěnový model – statické schéma pro výpočet únosnosti táhla



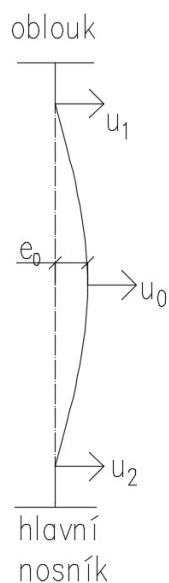
Obr. 82 Deskostěnový model – numerický model pro výpočet únosnosti táhla

System je zatížen dvěma silami 50 kN v jednom zatěžovacím stavu. Tyto síly se nachází v uzlu mezi *tuhými liniovými rameny* a prutovým prvkem v obloukové části modelu. Jednotlivé stupně zatěžování se vyjádřily násobkem zatěžovacího stavu v nelineární kombinaci.



Obr. 83 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – táhlo

V grafu (Obr. 83) vidíme, že čím větší počáteční deformace, tím větší napětí v táhlu.



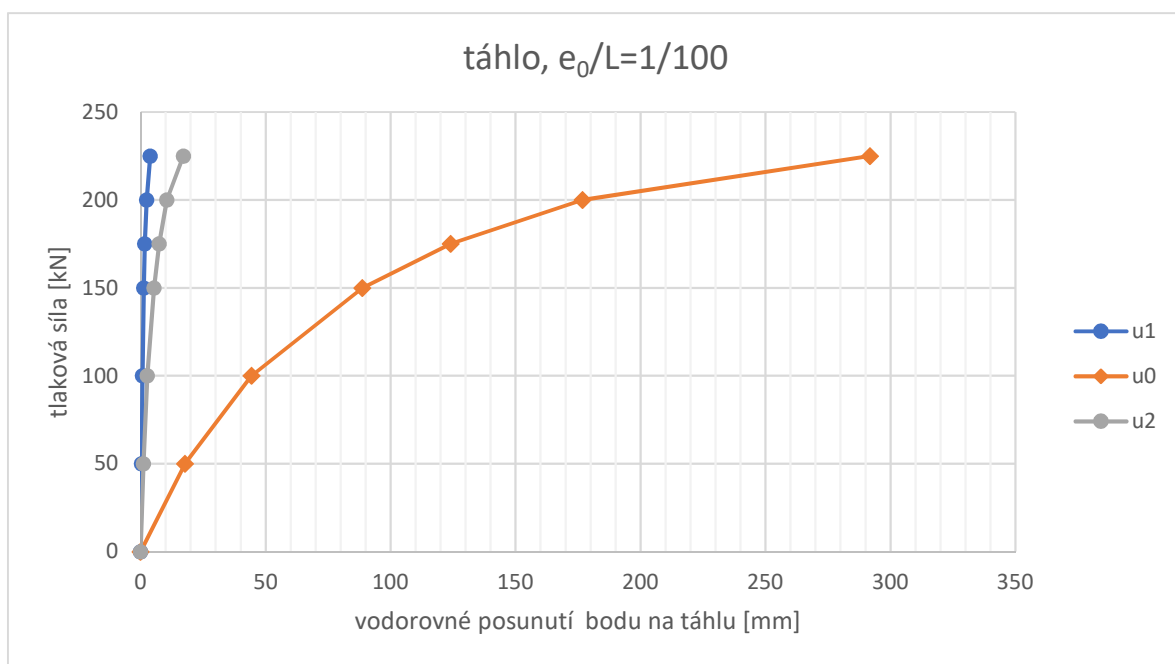
Obr. 84 Deskostěnový model – vyšetřované body na táhlu.

Při zatěžování silou budeme na táhle sledovat tři body.  $U_1$  a  $u_2$  jsou místa připojení táhla na nosníky, bod  $u_0$  je pak v polovině výšky táhla.



Tab. 10 Tabulka –  $e_0/L=1/100$  – táhlo

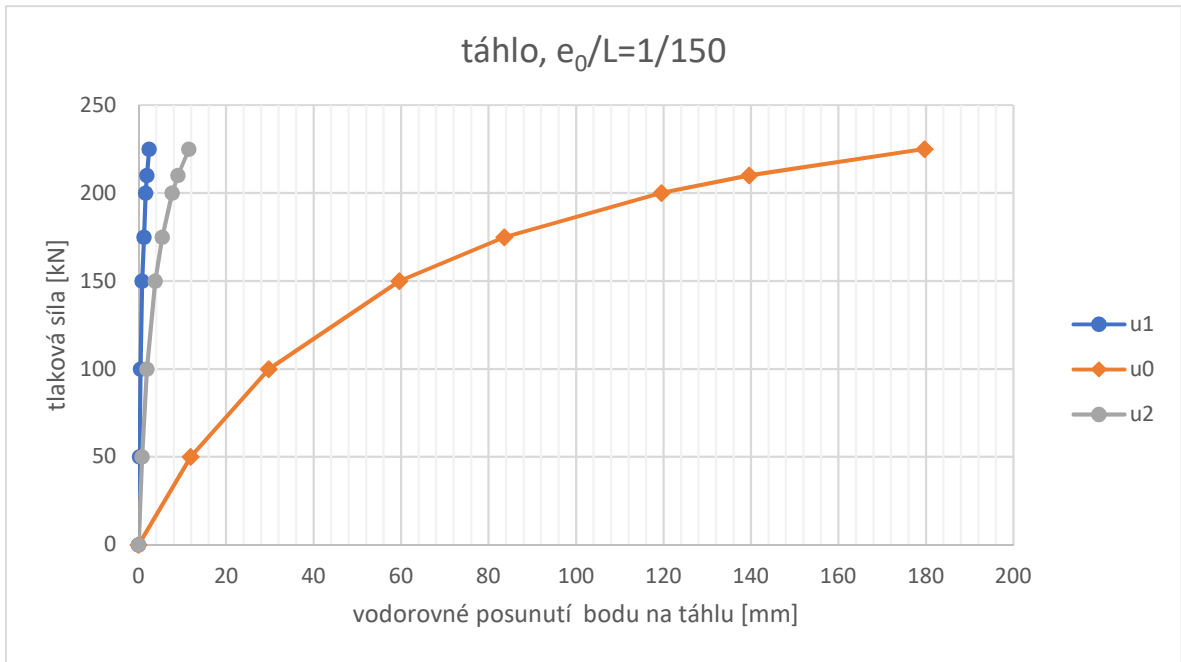
$e_0/L$	1/100						
síla [kN]	0	50	100	150	175	200	225
tlak [MPa]	0	-39,4	-98,3	-196,2	-274,6	-308,4	-383,3
$u_1$ [mm]	0	0,3	0,7	1,3	1,7	2,4	3,8
$u_0$ [mm]	0	17,8	44,4	88,7	124,1	176,8	291,9
$u_2$ [mm]	0	1,1	2,7	5,3	7,4	10,5	17,1



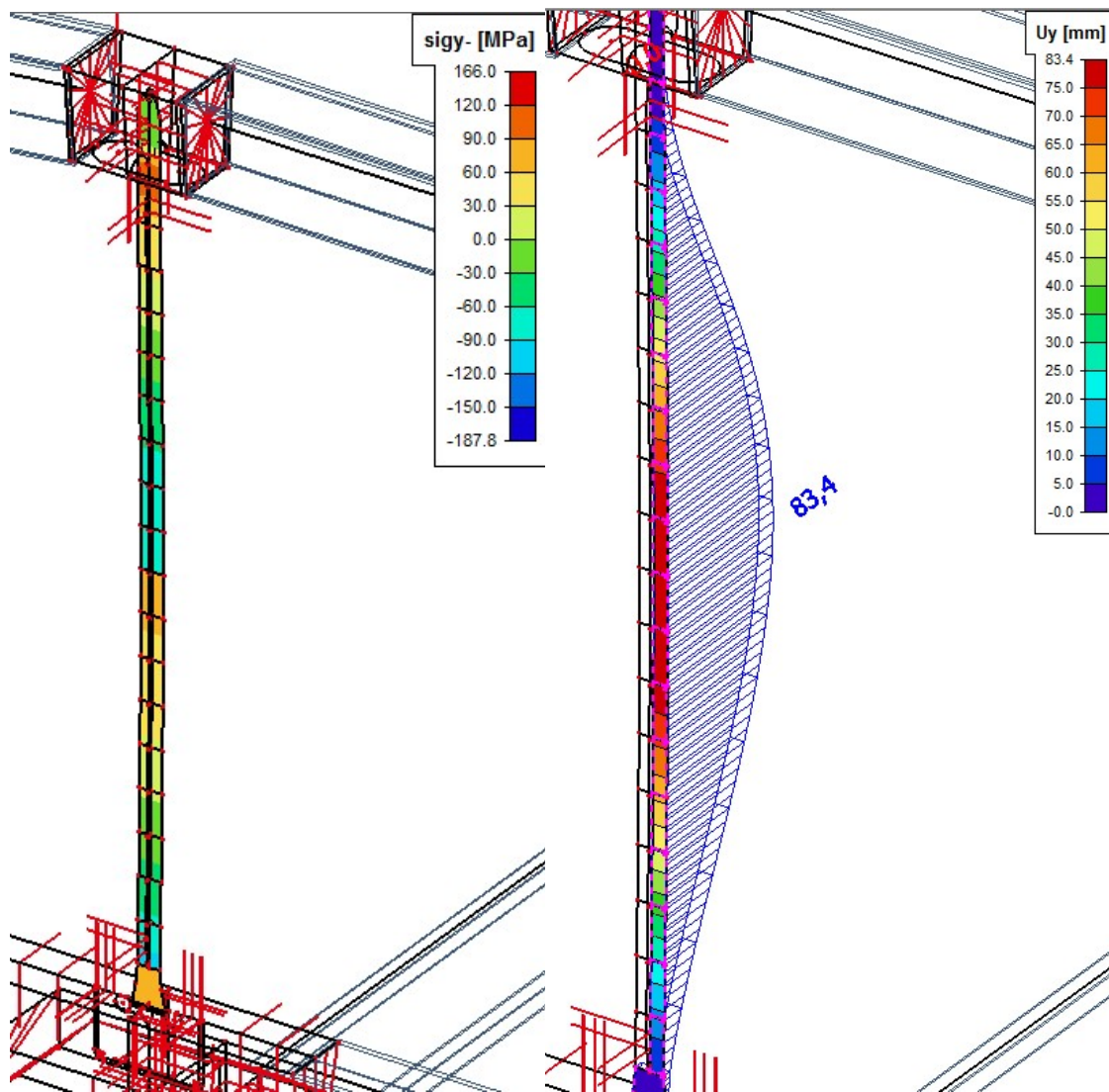
Obr. 85 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/100$  – táhlo

Tab. 11 Tabulka –  $e_0/L=1/150$  – táhlo

$e_0/L$	1/150							
síla [kN]	0	50	100	150	175	200	210	225
tlak [MPa]	0	-27,5	-68,0	-134,0	-188,2	-288,4	-301,2	-316,8
$u_1$ [mm]	0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	1,9	2,4
$u_0$ [mm]	0	11,9	29,8	59,6	83,6	119,6	139,6	179,7
$u_2$ [mm]	0	0,8	1,9	3,8	5,4	7,7	9,0	11,5



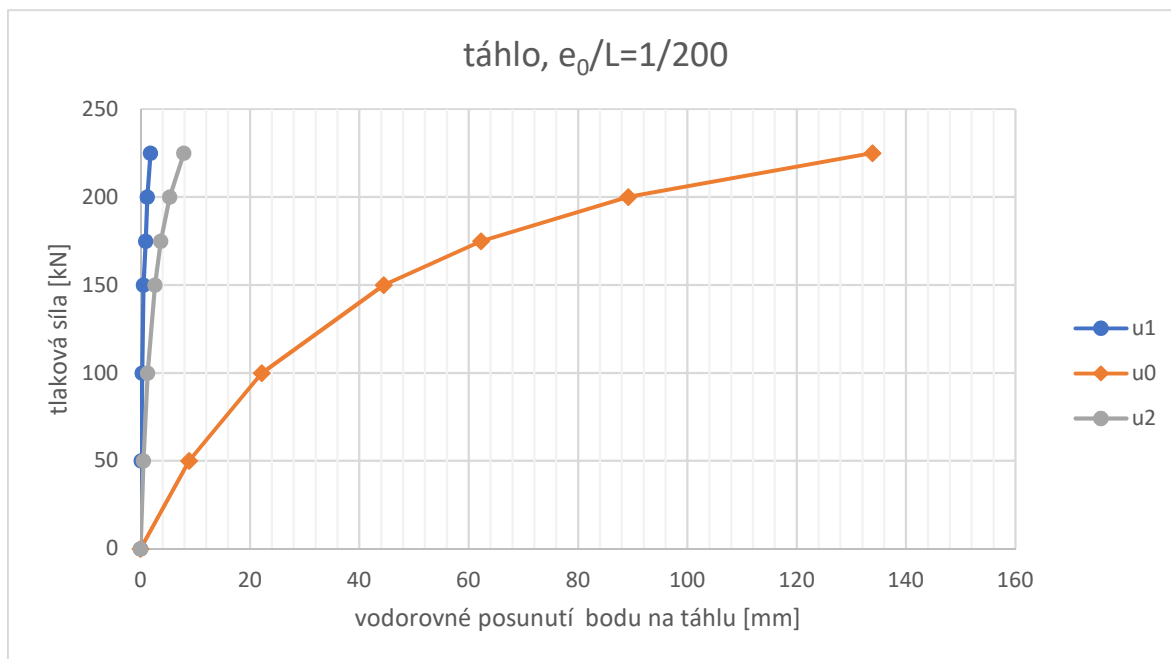
Obr. 86 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/150$  – táhlo



Obr. 87 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu –  $F = 175 \text{ kN}$  –  $e_0/L = 1/150$  –  
táhlo

Tab. 12 Tabulka –  $e_0/L = 1/200$  – táhlo

$e_0/L$	1/200						
síla [kN]	0	50	100	150	175	200	225
tlak [MPa]	0	-24,3	-56,6	-104,4	-143,5	-203,7	-304,0
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	0,5	0,9	1,2	1,8
$u_0$ [mm]	0	8,9	22,2	44,5	62,3	89,2	133,9
$u_2$ [mm]	0	0,5	1,3	2,6	3,7	5,3	7,9



Obr. 88 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/200$  – táhlo

V grafech (Obr. 85, Obr. 86 a Obr. 88) vidíme, že čím větší počáteční deformace tím větší vodorovné posunutí. Dále pak, že horní bod táhla se deformuje méně než dolní bod a že největší deformace nastává uprostřed táhla.

Únosnost zavedeme tak, že maximální dovolený tlak v táhlu omezíme na 250 MPa. Tato hranice odpovídá 70 % meze kluzu táhla, která je 355 MPa. Rezerva 30 % by měla pokrýt nedokonalosti modelu a neočekávané situace během montáže. Nad tuto mez jsou už deformace v polovině táhla příliš velké.

Tab. 13 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – táhlo

$e_0/L$	1/100	1/150	1/200
síla [kN]	167	190	212
$u_1$ [mm]	1,6	1,4	1,5
$u_0$ [mm]	112,8	105,2	110,7
$u_2$ [mm]	6,7	6,8	6,5

## 5.8 Návrhy ztužení oblouku a táhel

Dále porovnáme několik jednoduchých možností ztužení táhel. V každé variantě se použije pouze jedna ztužující metoda. Z výsledků se pak vyberou ty nejúčinnější a nejehospodárnější.

Bude se sledovat vodorovná deformace a napětí v závislosti na počáteční imperfekci prutu.

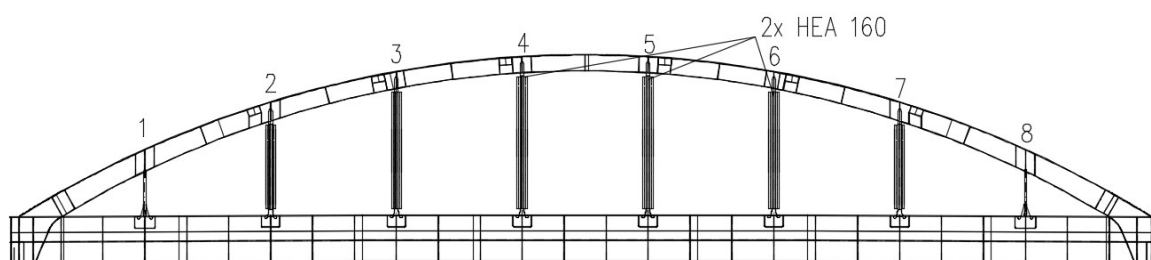
První varianty budou ztužovat jen táhla, a to přidáním nosníků HEA k táhlům. Tato metoda bude použita ve třech velikostech nosníků a to HEA 160, HEA 220 a HEA 300.

Další varianty už ztužují samotný oblouk, a tak přebírají sílu, která by jinak šla do táhel. Vyšetří se varianta se stojkami kolem táhel a varianta se stojkami v rovině ztužení.

### 5.8.1 VJ1 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 160

První možností ztužení táhla je obložením dvěma HEA 160 profily. V našem případě kontakt mezi táhlem a profilem bude zajištěn na maximálně pěti místech. Tento kontakt zprostředkují plech a gumová podložka. Profily se umístí na táhla 2, 3, 4, 5, 6 a 7.

Toto ztužení zvýší ohybovou tuhost táhla. Nevýhodou je, že na konci a na začátku táhla, kde táhlo přechází ve vyztuženou stěnu hlavního nosníku resp. oblouku, je táhlo oslabené a může zde tento plech vybočit.

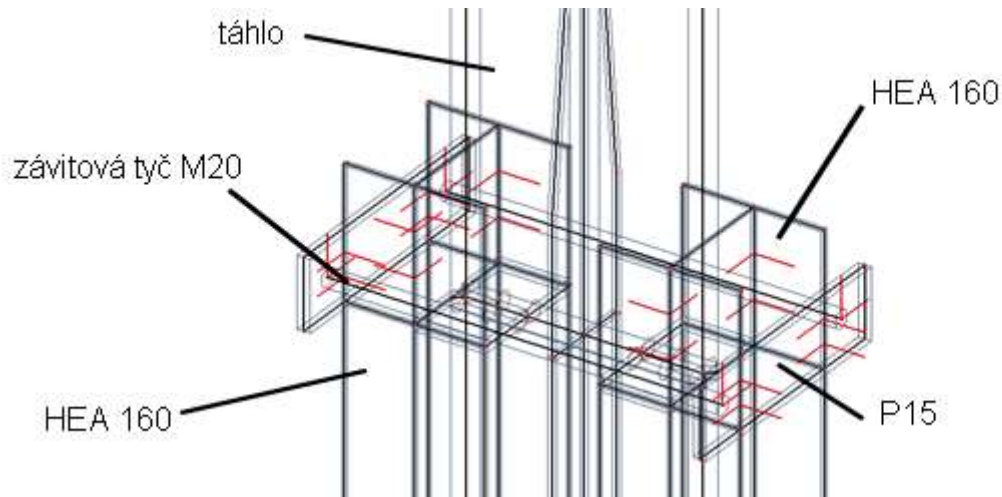


Obr. 89 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 160

Stejně ztužení bylo použito již ve dříve uvedeném mostu ve Veselí nad Lužnicí. Použily se stejné profily, aby se mohlo toto řešení hlouběji prozkoumat.

#### 5.8.1.1 Model

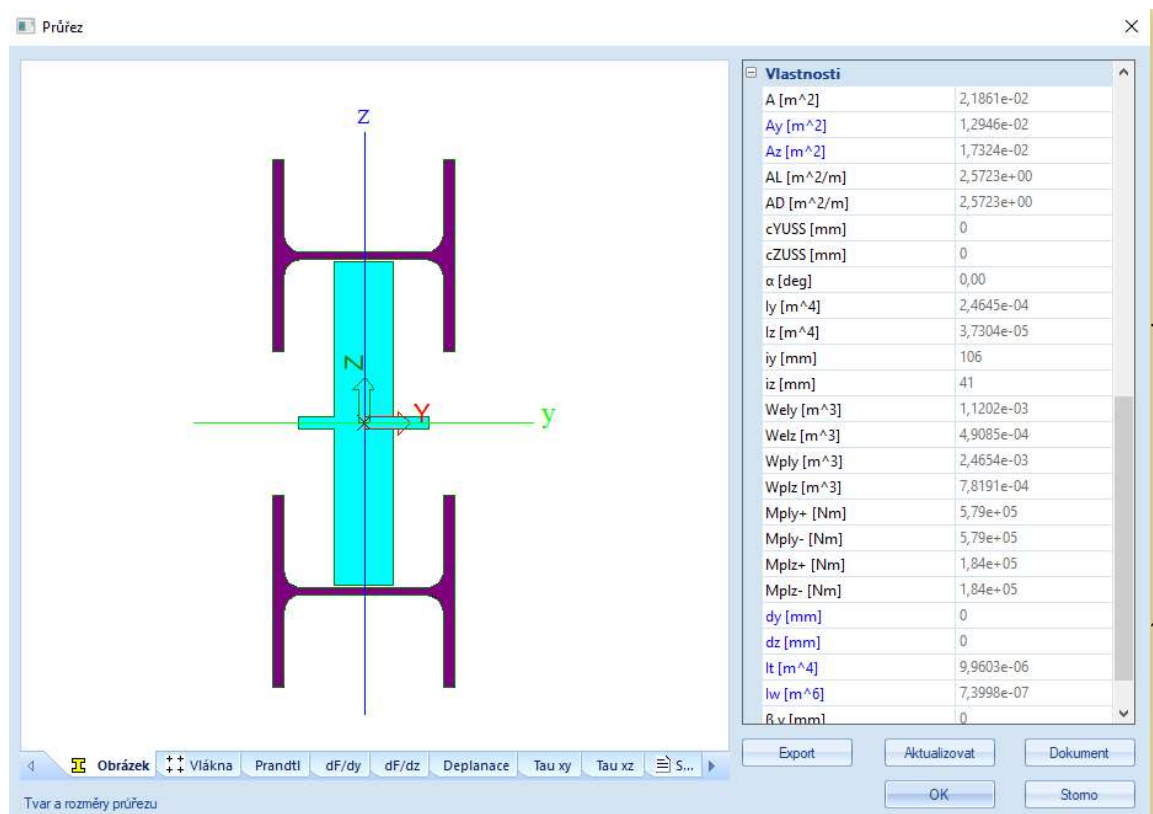
Nosník HEA 160 se připojí na táhlo každé 2 metry, tedy na pěti místech. Kontakt mezi táhlem a ztužením je ve skutečnosti zajištěn gumou a plechem. Bude zde vytvořen tedy kloub na hraně plochy s pružným přenosem. Ve směru stlačení pomyslné gumy se zadá 2000 MPa, ve dvou zbývajících směrech (smyk) se zadá 690 MPa. Vychází se z toho, že guma má modul pružnosti 2000 MPa a poissonovo číslo je 0,45 a tak je modul pružnosti ve smyku 690 MPa. Ke kloubové podpoře je připojen plech tloušťky 15 mm. Plech vyplní prostor mezi táhlem a profilem, u těžiště profilu je pak zkosen 10/10 mm. Dále pak stačí vymodelovat profil HEA 160 vzdálený 145 mm od osy táhla. Výška nosníku HEA 160 je 152 mm, šířka 160 mm, tloušťka stojiny je 6 mm a tloušťka pásnice je 9 mm.



Obr. 90 Deskostěnový model – ztužení HEA 160

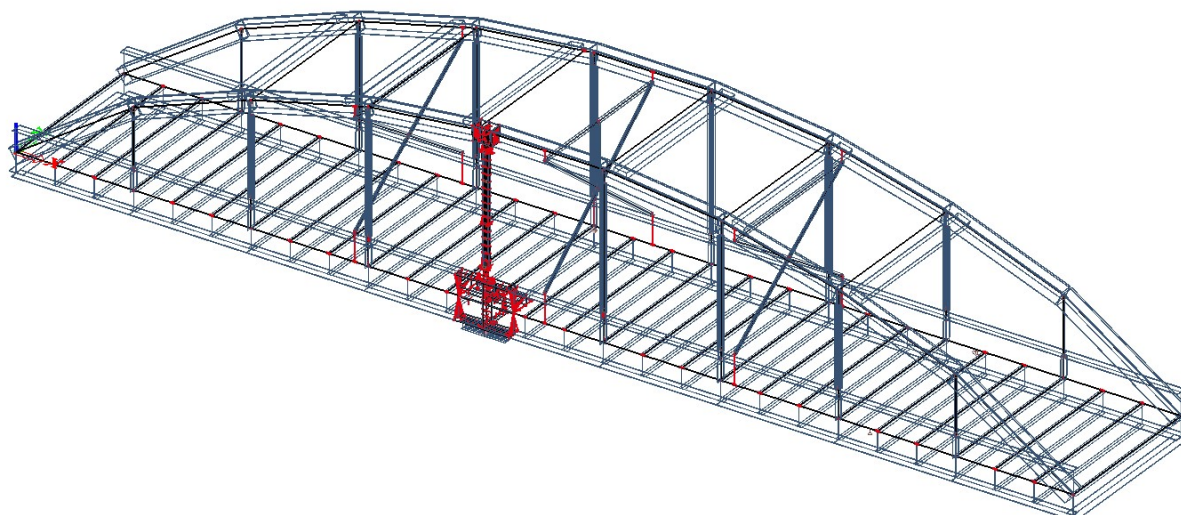
Profily drží na táhlu přepásání a stažení plechem a závitovou tyčí M20. Rozměry plechu jsou 282 x 80 mm. Tloušťka těchto plechů je 15 mm.

Závitovou tyč ještě předepneme zchlazením v zatěžovacím stavu *předepnutí* -30 °C.



Obr. 91 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 160

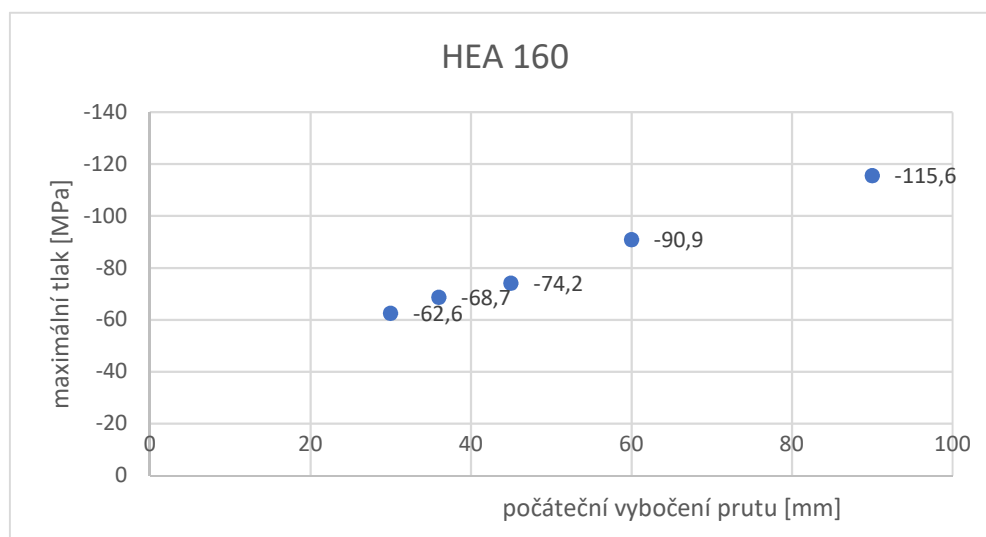
Nakonec se u všech ostatních táhel změří průřez z táhla (Obr. 26) na táhlo obložené nosníky HEA 160 (Obr. 92).



Obr. 92 Deskostěnový model – ztužení HEA 160

### 5.8.1.2 Výsledky

V grafu (Obr. 95) vidíme, že napětí v táhlu roste s počáteční imperfkcí. Výsledky se získaly z modelů ve fázi, kdy se první podpora nachází pod táhlem 4. Největší tlakové napětí 115,6 MPa nastává při počáteční imperfkcí  $e_0/L=1/100$ .



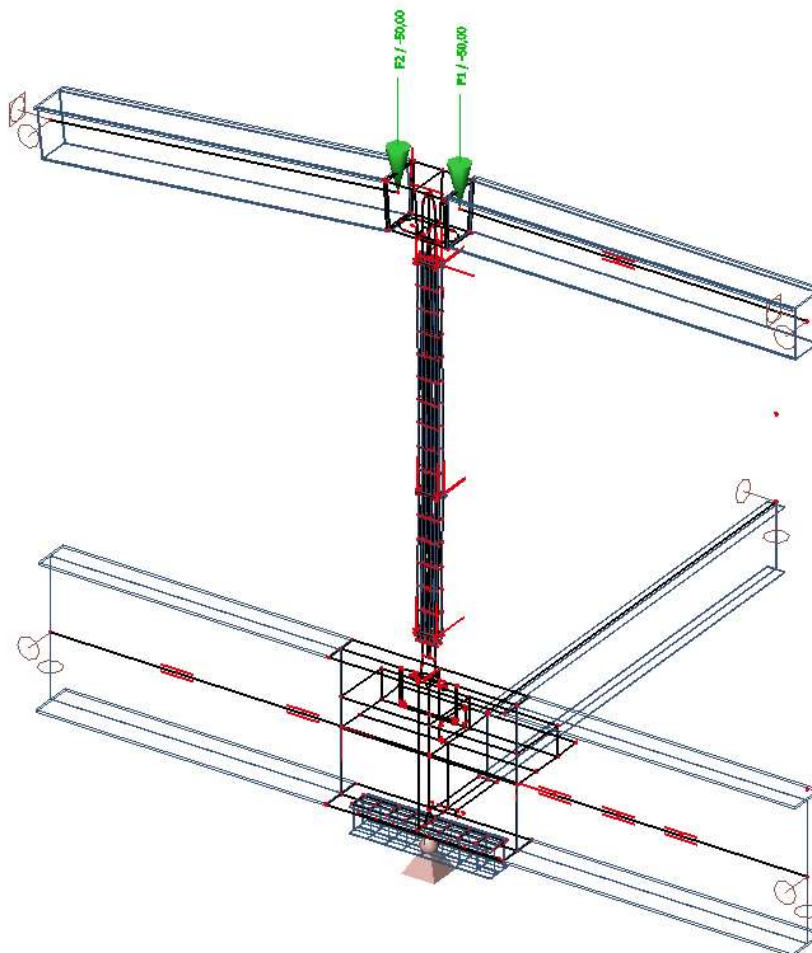
Obr. 93 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení– ztužení HEA 160

### 5.8.1.3 Únosnost

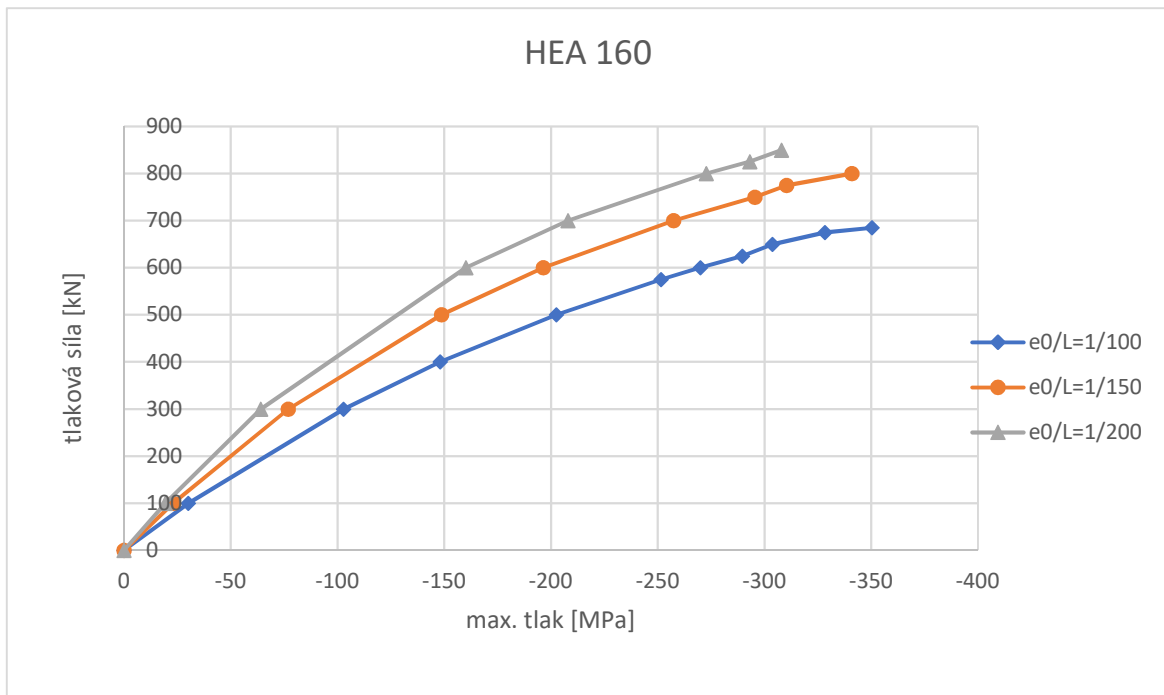
Pro zjištění únosnosti táhla se upravil numerický model tak, že se smazaly nesousední prutové elementy. Zbyly jen deskostěnové prvky a přilehlé pruty. Viz Obr. 94. V horní části



deskostěnového modelu oblouku se nachází dvě síly o síle 50 kN. Pravidelné zvyšování koeficientu tohoto zatěžovacího stavu vytvoří plynulý průběh zatěžování táhla. Z odečtených hodnot maximálního napětí a vodorovného posunutí třech bodů na táhlu získáme hodnoty k vynesení do názorných grafů.



*Obr. 94 Deskostěnový model – únosnost – ztužení HEA 160*

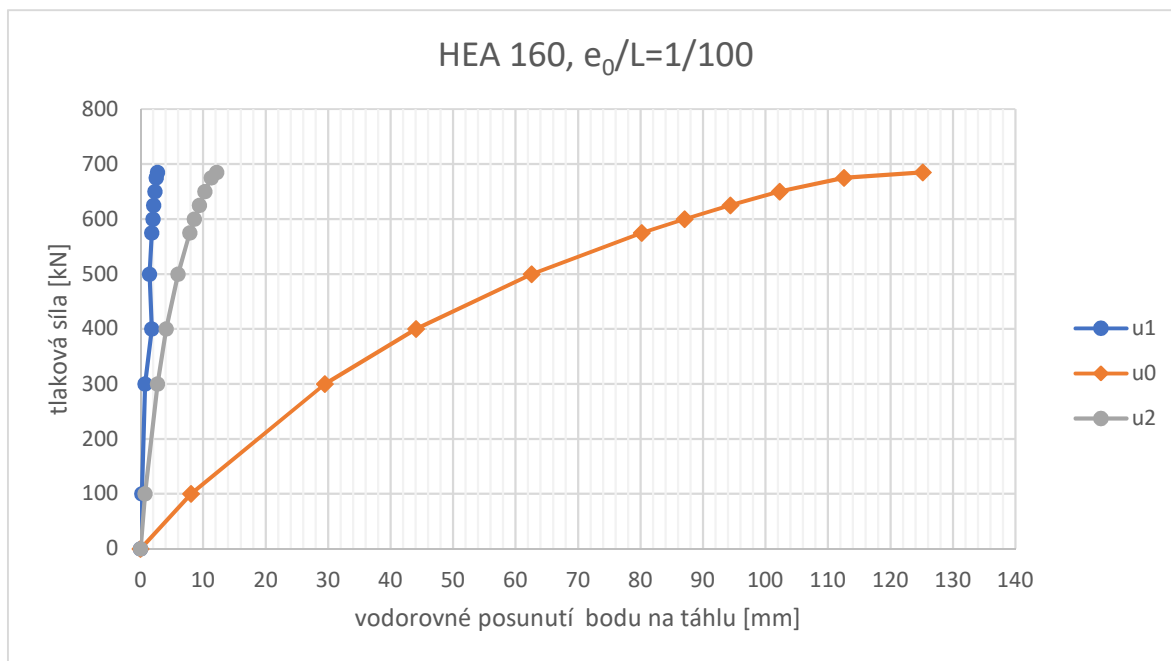


Obr. 95 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – ztužení HEA 160

V grafu (Obr. 95) vidíme průběh tlakového napětí pro tři počáteční imperfekce. Následující grafy a tabulka zobrazují vodorovné posuny na táhlu ztuženém HEA 160.

Tab. 14 Tabulka –  $e_0/L=1/100$  – HEA 160

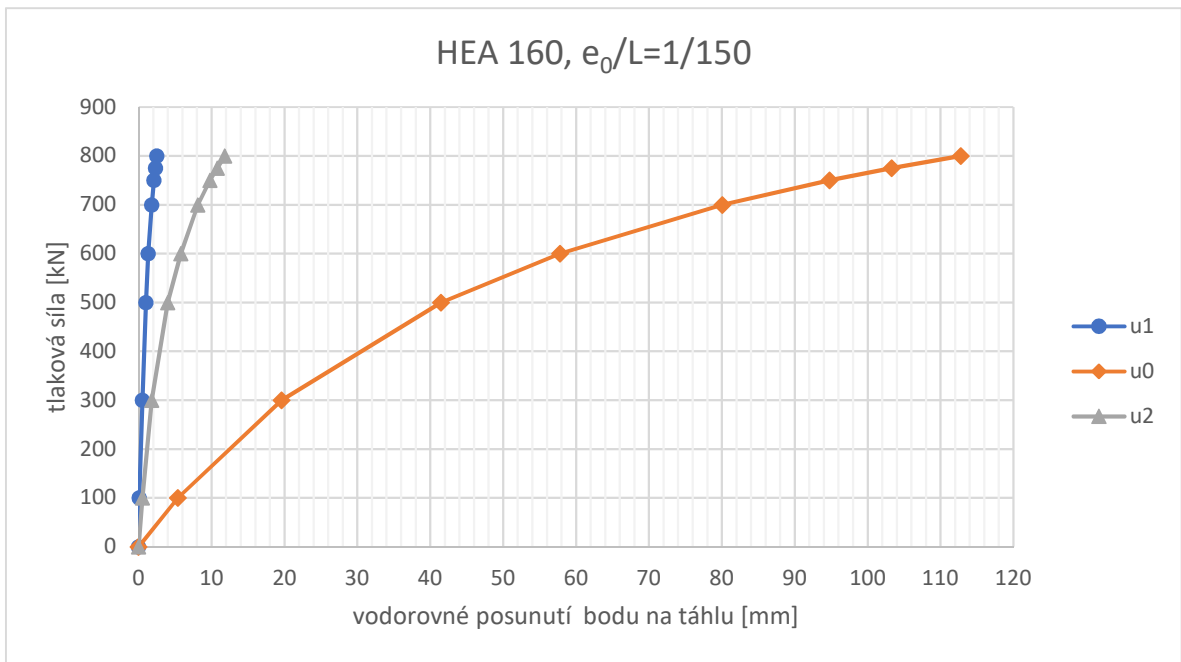
$e_0/L$	1/100										
síla [kN]	0	100	300	400	500	575	600	625	650	675	685
tlak [MPa]	0	-30,2	-102,9	-148,2	-202,5	-251,6	-270,0	-289,7	-303,8	-328,3	-350,4
$u_1$ [mm]	0	0,2	0,7	1,8	1,4	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7
$u_0$ [mm]	0	8,1	29,5	44,1	62,6	80,2	87,1	94,4	102,3	112,6	125,2
$u_2$ [mm]	0	0,7	2,7	4,1	6,0	7,9	8,6	9,4	10,3	11,3	12,2



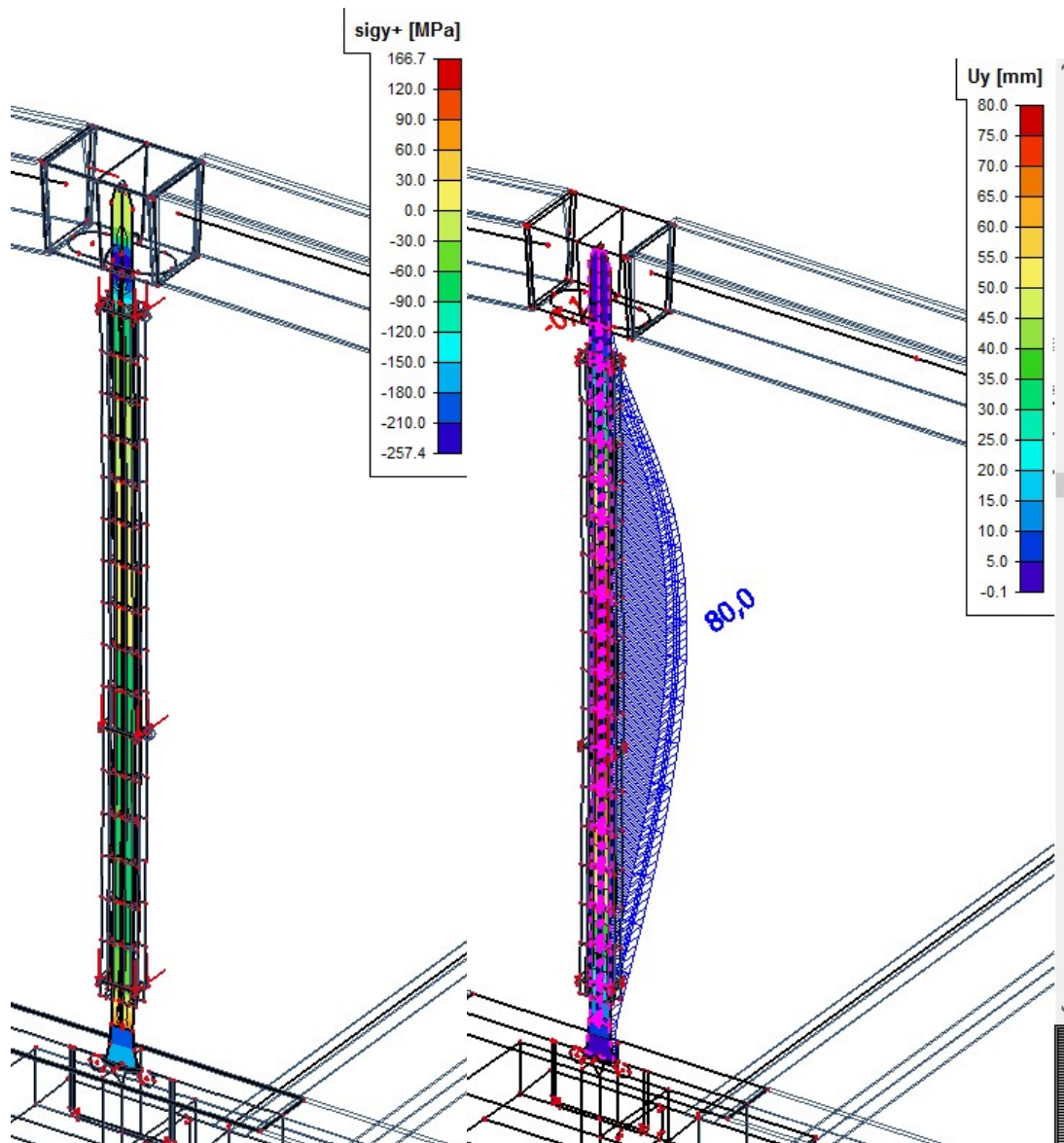
Obr. 96 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/100$ – ztužení  
HEA 160

Tab. 15 Tabulka –  $e_0/L=1/150$ – HEA 160

$e_0/L$	1/150								
síla [kN]	0	100	300	500	600	700	750	775	800
tlak [MPa]	0	-23,0	-77,0	-148,8	-196,4	-257,4	-295,5	-310,4	-341,0
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,5	1,0	1,3	1,8	2,1	2,3	2,5
$u_0$ [mm]	0	5,4	19,6	41,5	57,8	80,1	94,8	103,3	112,8
$u_2$ [mm]	0	0,5	1,8	4,0	5,8	8,1	9,8	10,8	11,8



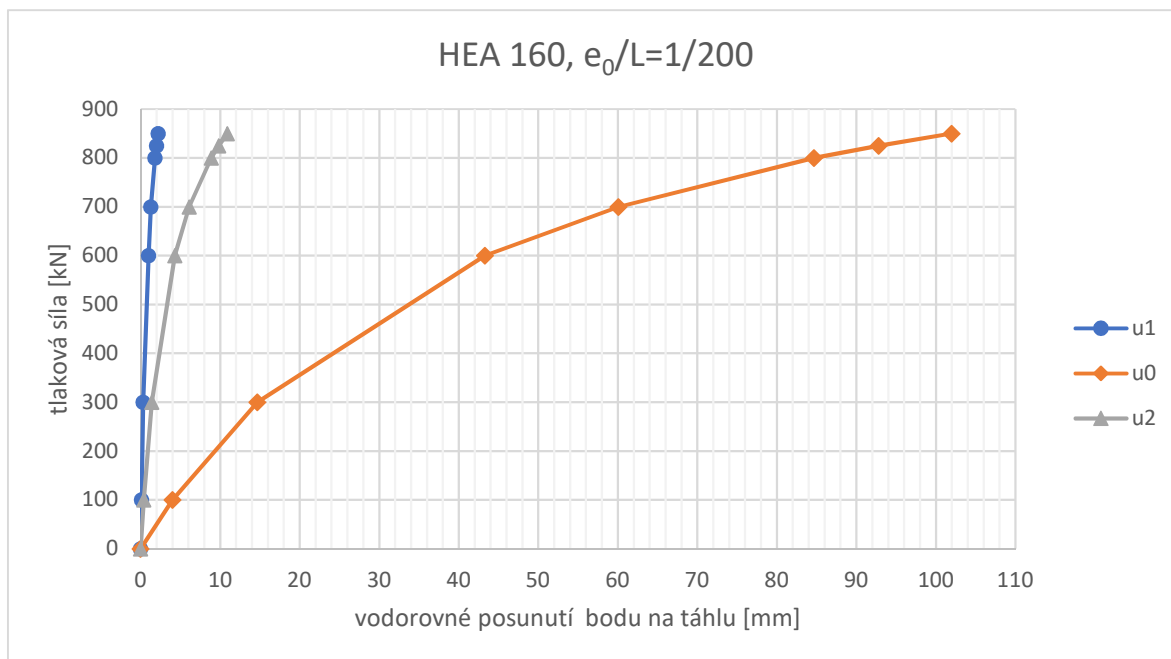
Obr. 97 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/150$  – ztužení  
HEA 160



Obr. 98 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu –  $F = 700 \text{ kN}$  –  $e_0/L = 1/150$  – HEA 160

Tab. 16 Tabulka –  $e_0/L = 1/200$  – HEA 160

$e_0/L$	1/200							
síla [kN]	0	100	300	600	700	800	825	850
tlak [MPa]	0	-19,3	-64,1	-160,1	-208,0	-272,8	-293,1	-308,0
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	1,0	1,3	1,8	2,0	2,2
$u_0$ [mm]	0	4,0	14,7	43,3	60,1	84,7	92,8	102,0
$u_2$ [mm]	0	0,4	1,4	4,3	6,1	8,9	9,8	10,9



Obr. 99 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/200$  – ztužení HEA 160

Nakonec se určí z těchto grafů únosnost táhla ztuženého dvěma nosníky HEA 160 pro délku táhla 9,0 m. Maximální tlakové napětí, které povolíme jako přípustné je 250 MPa. Tato hodnota napětí odpovídá 70 % meze kluzu oceli, ze které je vyrobené táhlo.

Tab. 17 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 160

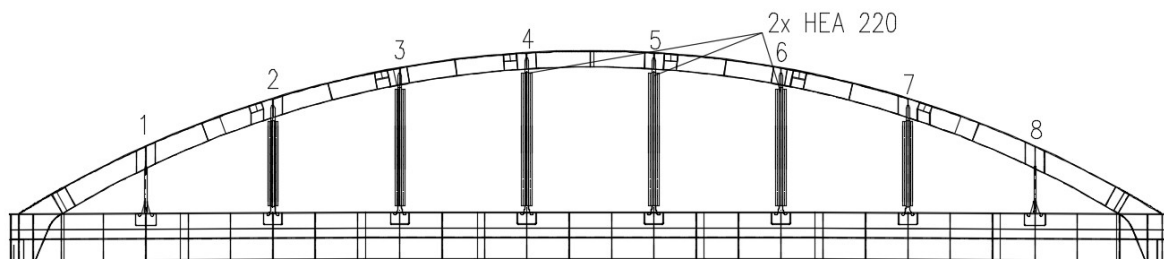
$e_0/L$	1/100	1/150	1/200
síla [kN]	573	688	765
$u_1$ [mm]	1,8	1,7	1,6
$u_0$ [mm]	79,7	77,4	76,1
$u_2$ [mm]	7,8	7,8	7,9

Z Tab. 17 únosnosti nás pro další návrh zajímá únosnost pro počáteční imperfekci  $e_0/L = 1/150$  pro vzpěrnou křivku d. Do této kategorie spadají táhla tohoto mostu. Tato únosnost se rovná 688 kN. Maximální tlakové napětí bylo dosaženo v přípoji mezi táhlem a obloukovým nosníkem. Maximální deformace je pak 77,4 mm v polovině výšky táhla.

### 5.8.2 VJ2 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 220

Další modely se vytvoří pro variantu se ztužením nosníky HEA 220. Potřebujeme zjistit o kolik se zvýší únosnost a tlakové napětí v táhlu při zvýšení průřezu ztužujících nosníků. Ztužující nosníky se nachází na táhlech 2 až 7. Viz Obr. 100.

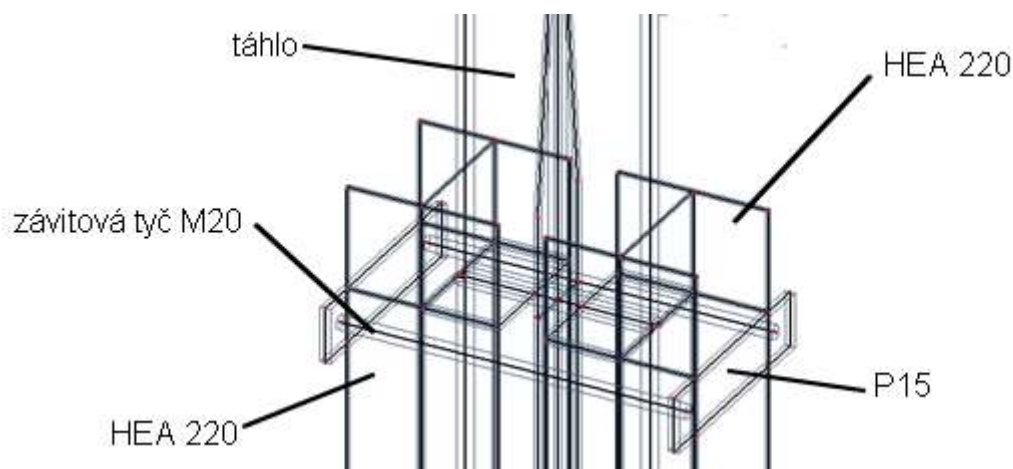




Obr. 100 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 220

### 5.8.2.1 Model

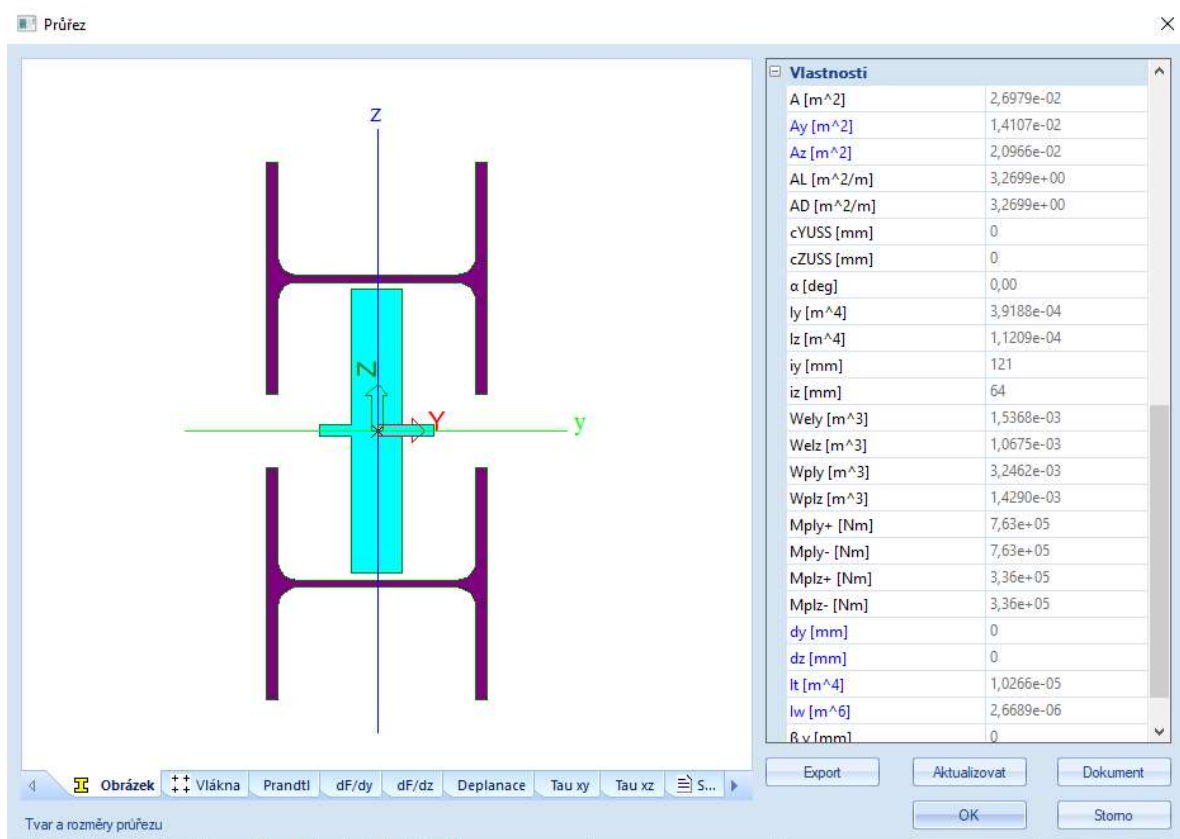
Nosník HEA 220 se připojí na táhlo na pěti místech stejně jako nosník HEA 160 v předchozím případě. V místě kontaktu mezi táhlem a ztužením bude vytvořen kloub na hraně plochy s pružným přenosem. Ve směru stlačení pomyslné gumy se zadá 2000 MPa, ve dvou zbývajících směrech (smyk) se zadá 690 MPa. Ke kloubové podpoře je připojen plech tloušťky 15 mm. Plech vyplní prostor mezi táhlem a profilem, u těžiště profilu je pak zkosen 10/10 mm. Dále stačí vymodelovat profil HEA 220 vzdálený 145 mm od osy táhla. Výška nosníku HEA 220 je 210 mm, šířka 220 mm, tloušťka stojiny je 7 mm a tloušťka pásnice je 11 mm.



Obr. 101 Deskostěnový model – ztužení HEA 220

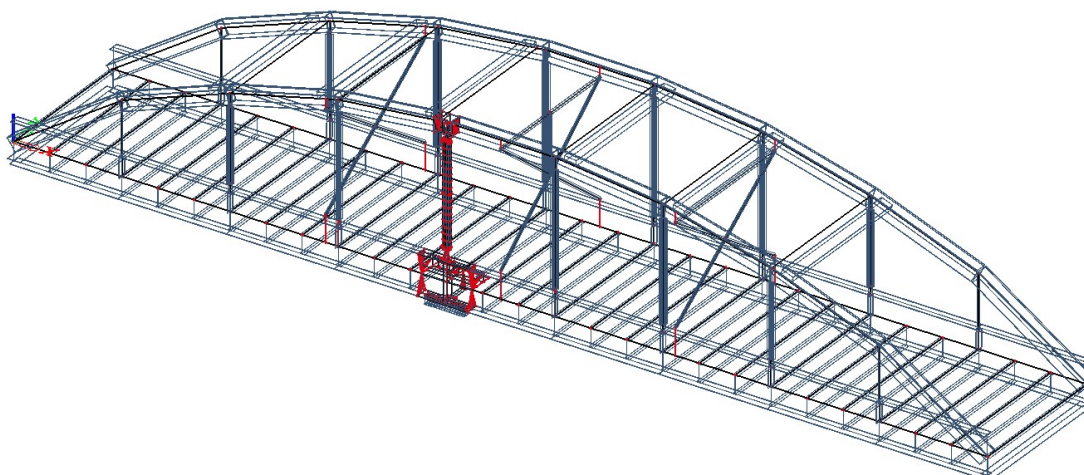
Profily jsou přepásány na táhlu plechem a závitovou tyčí M20. Rozměry plechu jsou 80 x 320 mm. Tloušťka těchto plechů je 15 mm.

Závitovou tyč ještě předepneme zchlazením v zatěžovacím stavu *předepnutí* -30 °C.



Obr. 102 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 220

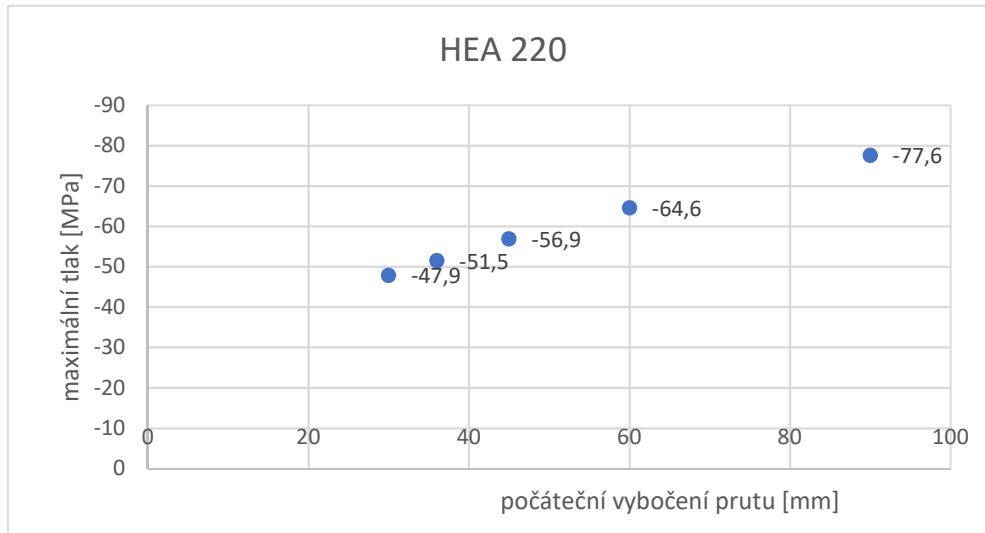
Ostatní prutová táhla v modelu jsou také ztužena. Změníme příčný řez na táhlo ztužené nosníkem HEA 220 (Obr. 102).



Obr. 103 Numerický model – ztužení nosníky HEA 220

### 5.8.2.2 Výsledky

Z modelů s různou počáteční imperfkci od 1/100 až po 1/300 získáme maximální tlakové napětí ve ztuženém táhlu. Maximální tlakové napětí nastává v horním přípoji táhla k oblouku.

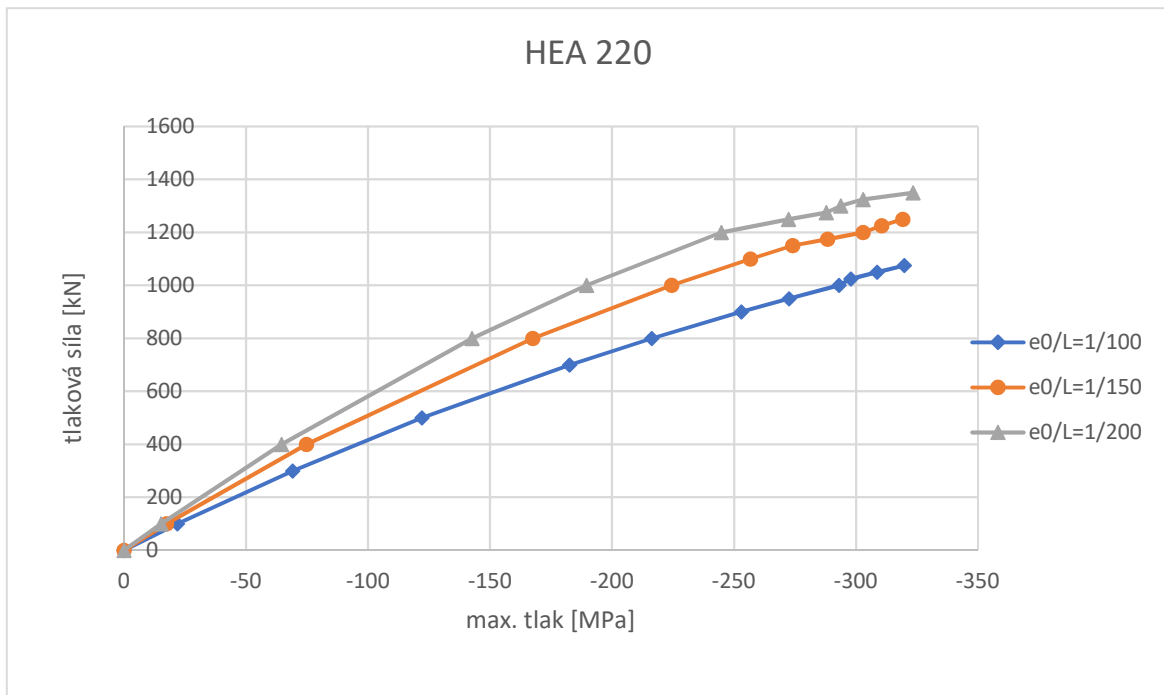


Obr. 104 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení HEA 220

Maximální tlakové napětí v táhlu se rovná 77,5 MPa pro počáteční imperfkci 1/100. Vidíme také, že napětí roste s počáteční imperfkci.

### 5.8.2.3 Únosnost

Dále pak zjistíme únosnost pro jednotlivé počáteční imperfkce na již dříve zmíněném upraveném modelu (Obr. 81). Vychází se z modelu se ztužením nosníky HEA 220.

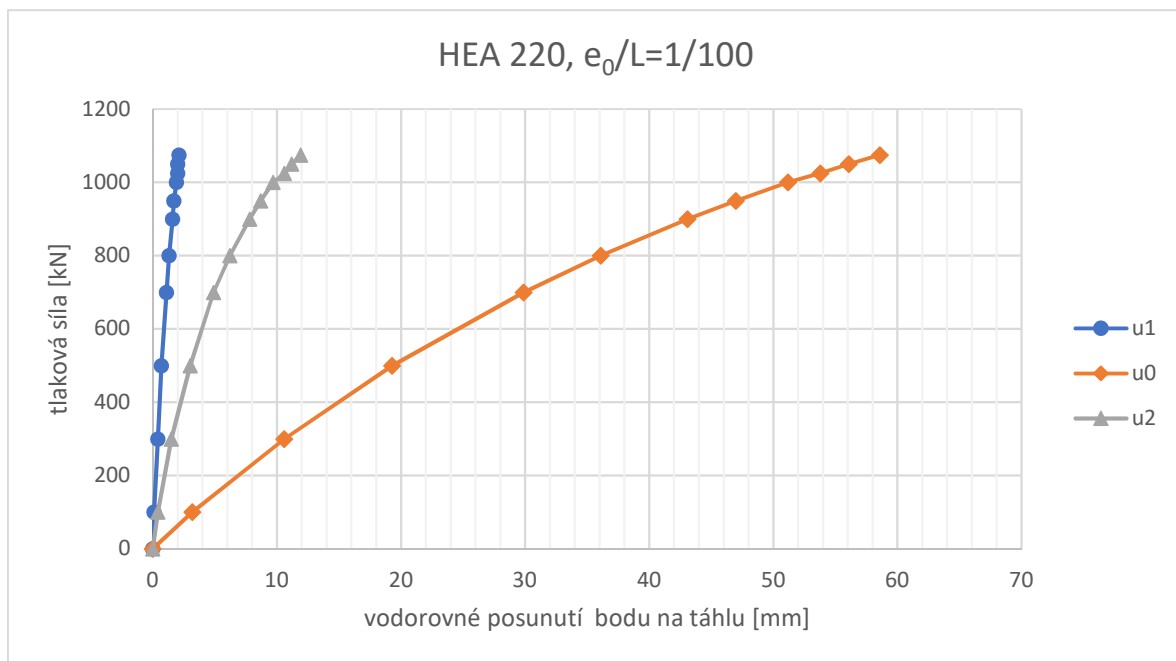


Obr. 105 Graf závislosti síly na tlakovém napětí– ztužení HEA 160

V grafu Obr. 105 vidíme, že tlakové napětí roste nejrychleji pro nejvyšší počáteční imperfekci.

Tab. 18 Tabulka –  $e_0/L=1/100$ – HEA 220

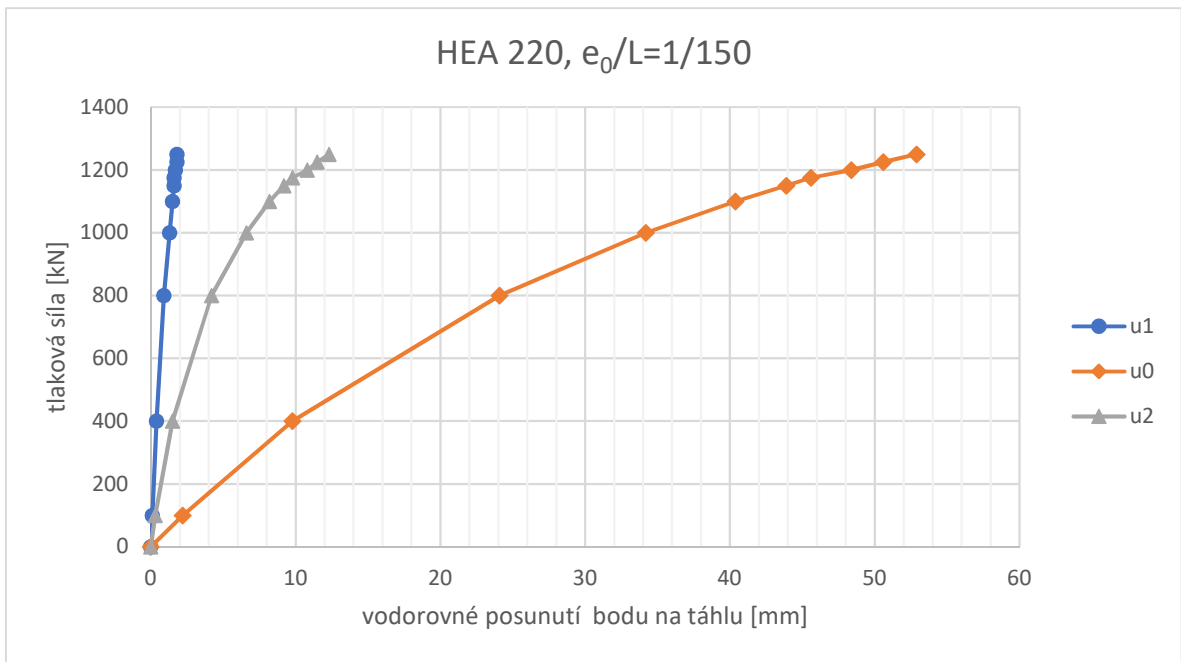
$e_0/L$	1/100											
síla [kN]	0	100	300	500	700	800	900	950	1000	1025	1050	1075
tlak [MPa]	0	-21,9	-69,1	-122,2	-182,6	-216,4	-253,1	-272,6	-293,1	-297,9	-308,7	-319,8
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,4	0,7	1,1	1,3	1,6	1,7	1,9	2,0	2,0	2,1
$u_0$ [mm]	0	3,2	10,6	19,3	29,9	36,1	43,1	47,0	51,2	53,8	56,1	58,6
$u_2$ [mm]	0	0,4	1,5	3,0	4,9	6,2	7,8	8,7	9,7	10,6	11,2	11,9



Obr. 106 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/100$ –  
ztužení HEA 220

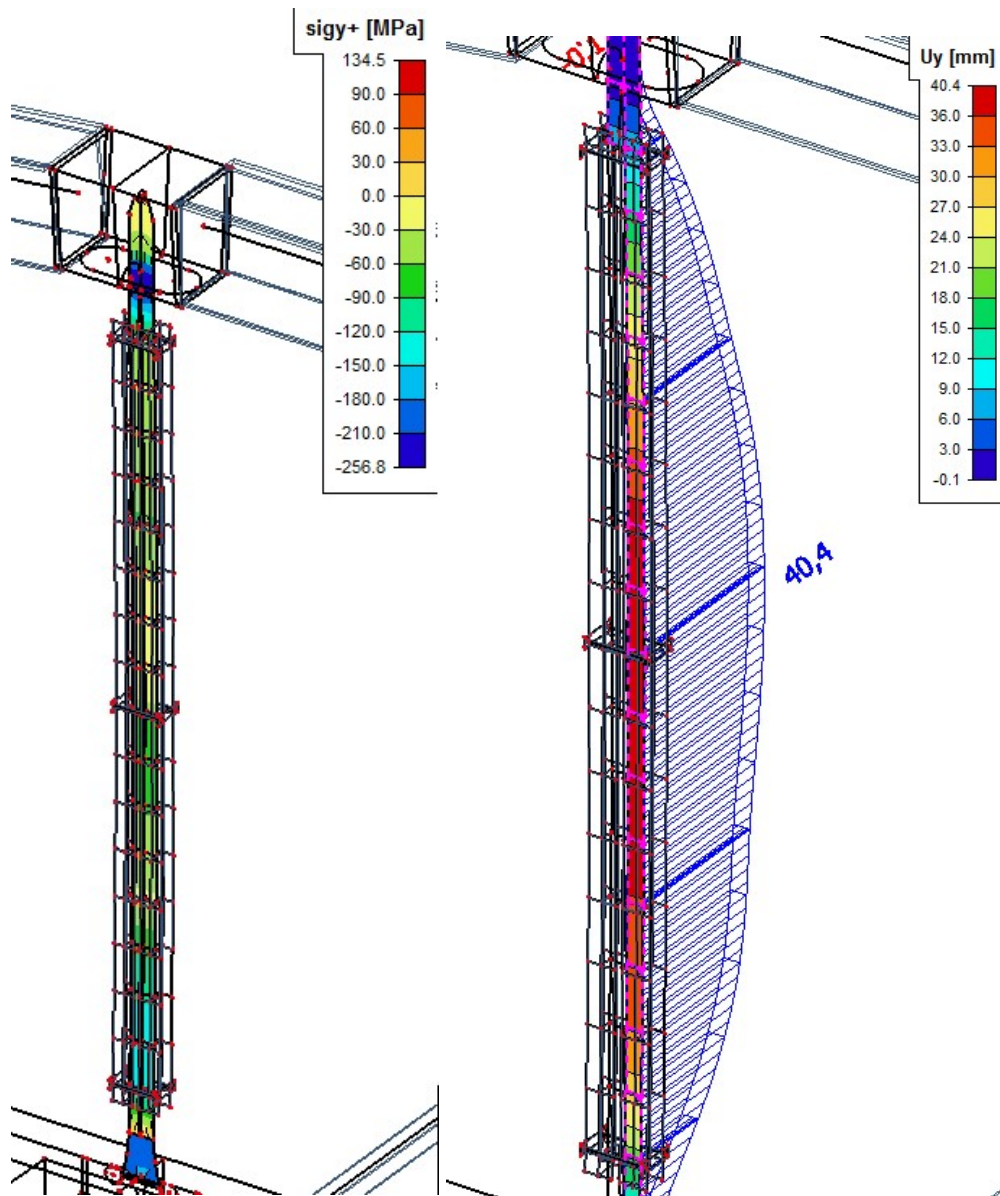
Tab. 19 Tabulka –  $e_0/L=1/150$ – HEA 220

$e_0/L$	1/150										
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1100	1150	1175	1200	1225	1250
tlak [MPa]	0	-17,5	-74,8	-167,5	-224,5	-256,8	-274,1	-288,3	-302,9	-310,5	-319,2
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,4	0,9	1,3	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8
$u_0$ [mm]	0	2,2	9,8	24,1	34,2	40,4	43,9	45,6	48,4	50,6	52,9
$u_2$ [mm]	0	0,3	1,5	4,2	6,6	8,2	9,2	9,8	10,8	11,5	12,3



Obr. 107 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/150$  – ztužení HEA 220

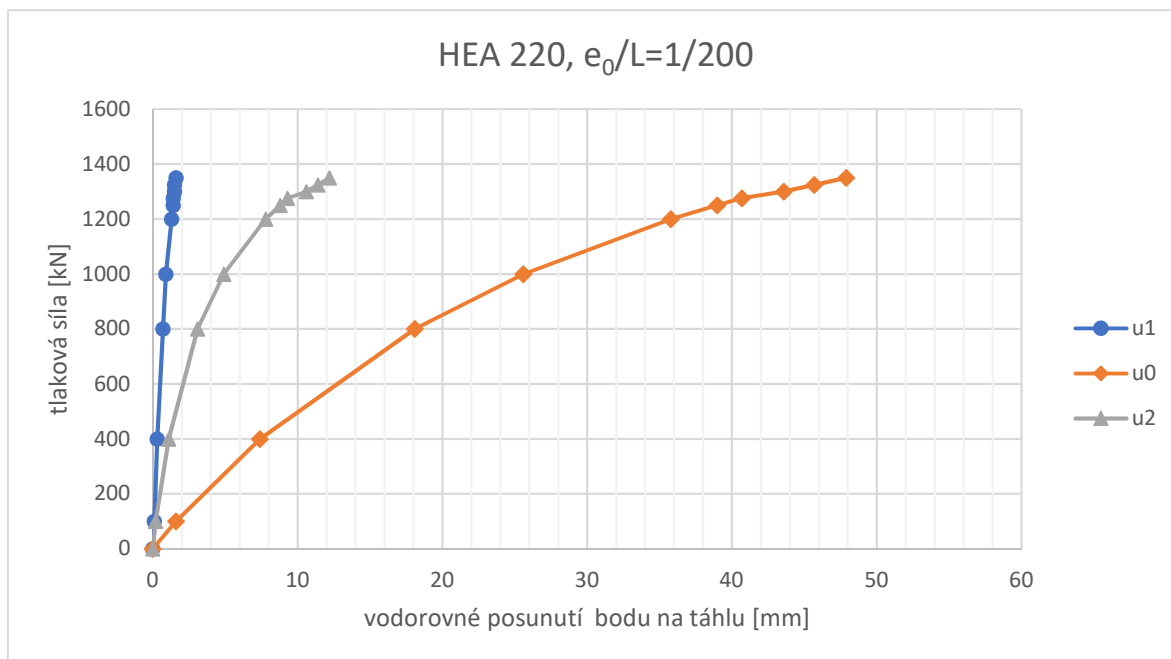




Obr. 108 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu –  $F = 1100 \text{ kN}$  –  $e_0/L = 1/150$  – HEA 220

Tab. 20 Tabulka –  $e_0/L = 1/200$  – HEA 220

$e_0/L$	1/200										
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1200	1250	1275	1300	1325	1350
tlak [MPa]	0	-15,2	-64,6	-142,6	-189,6	-244,8	-272,4	-287,9	-293,7	-302,9	-323,4
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	0,7	0,9	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
$u_0$ [mm]	0	1,6	7,4	18,1	25,6	35,8	39,0	40,7	43,6	45,7	47,9
$u_2$ [mm]	0	0,2	1,1	3,1	4,9	7,8	8,8	9,3	10,6	11,4	12,2



Obr. 109 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/200$  – ztužení HEA 220

Nakonec si vypočítáme interpolací body na grafech, kdy je dosaženo tlakového napětí 250 MPa, které nám ohraničuje únosnost devítimetrového ztuženého táhla. Tlakové napětí 250 MPa odpovídá 70 % meze kluzu oceli, ze kterého je vyrobeno posuzované táhlo.

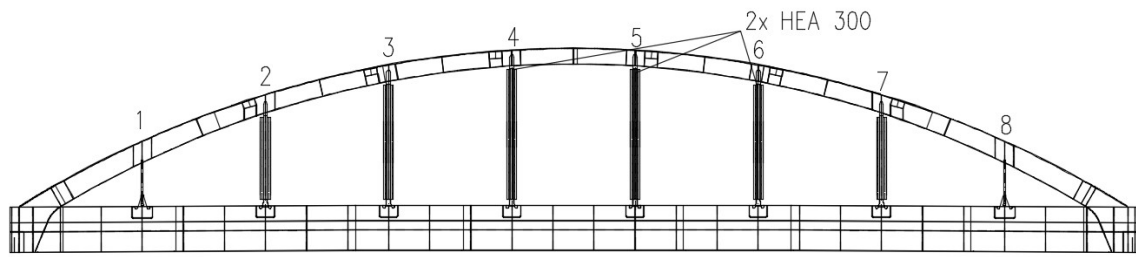
Tab. 21 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 220

$e_0/L$	1/100	1/150	1/200
síla [kN]	892	1079	1209
$u_1$ [mm]	1,6	1,6	1,3
$u_0$ [mm]	42,5	39,1	36,4
$u_2$ [mm]	7,7	7,9	8,0

Únosnost pro vzpěrnou křivku d je 1079 kN pro ztužené táhlo nosníkem HEA 220. Maximální vodorovný posun uprostřed výšky táhla je 39,1 mm.

### 5.8.3 VJ3 – Ztužení táhel obložením nosníky HEA 300

Posledním ze způsobu ztužení táhla je přidání dvou nosníků HEA 300. Toto ztužení ze všech tří by mělo být nejučinnější a tedy nejúčinnější. Ztuženy jsou stejně jako u předchozích variant táhla č. 2 až 7.



Obr. 110 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 300

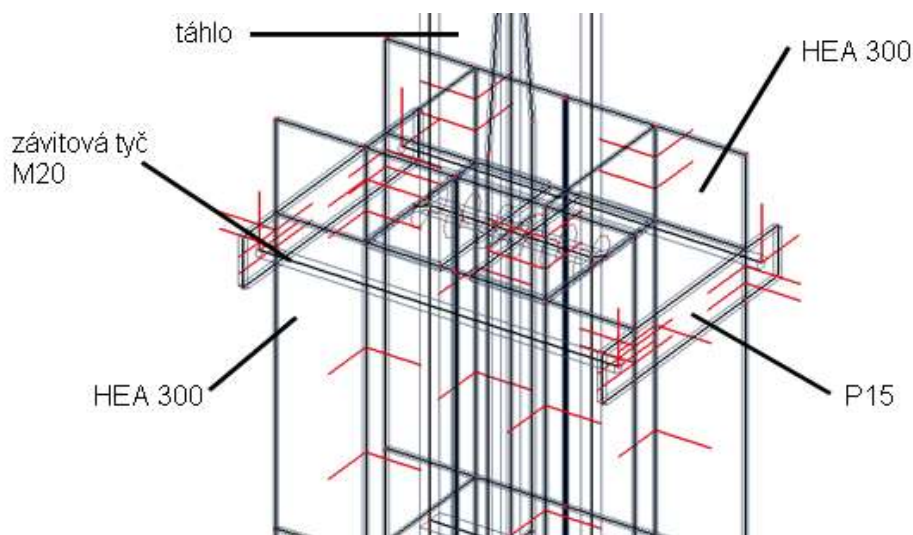
### 5.8.3.1 Model

Nosník HEA 300 se připojí na táhlo každé 2 metry stejně jako u ztužení s HEA 160, tedy na pěti místech. Kontakt se vytvoří stejně jako u ztužení HEA 160. Bude zde vytvořen tedy kloub na hraně plochy s pružným přenosem. Ve směru stlačení pomyslné gummy se zadá 2000 MPa, ve dvou zbývajících směrech (smyk) se zadá 690 MPa. Ke kloubové podpoře je připojen plech tloušťky 15 mm. Plech vyplní prostor mezi táhlem a profilem, u těžiště profilu je pak zkosen 10/10 mm. Dále pak stačí vymodelovat profily HEA300, vzdálený 155 mm od osy táhla.

Výška nosníku HEA 300 je 290 mm, šířka 300, tloušťka stojiny 8,5 mm a tloušťka pásnice je 14,0 mm.

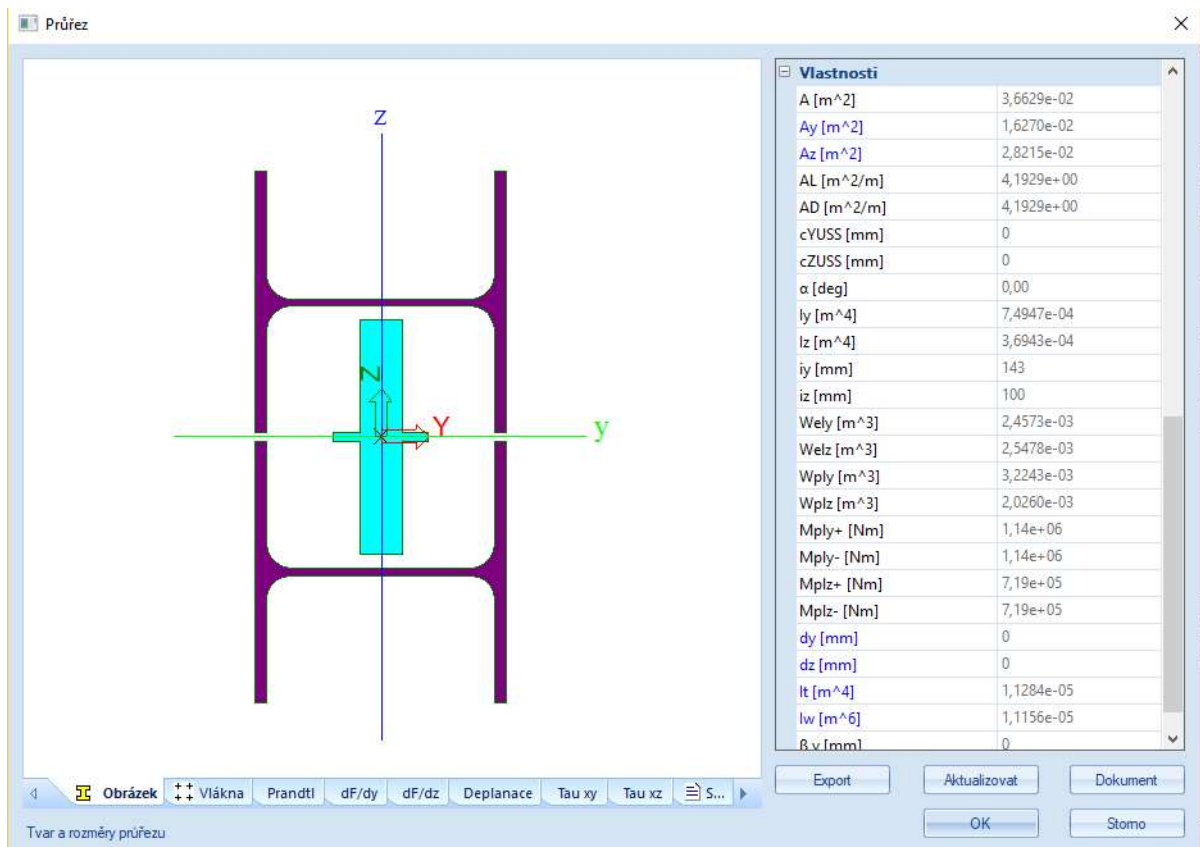
Profily drží na táhlu přepásání a stažení plechem a závitovou tyčí M20. Rozměry plechu jsou 80 x 400 mm. Tloušťka těchto plechů je pak 15 mm.

Závitovou tyč ještě předepneme zchlazením v zatěžovacím stavu *předepnutí* -30 °C.

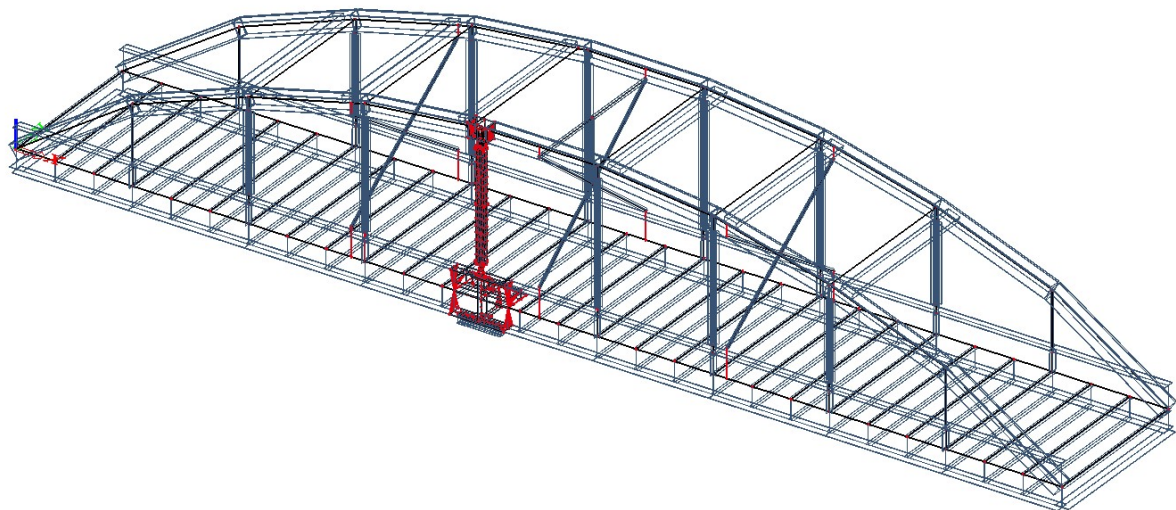


Obr. 111 Deskostěnový model – ztužení HEA 300

Abychom ztužily všechny táhla na modelu, tak nahradíme průřezy prutových prvků dvojicí HEA 300 s osovou vzdáleností 310 mm.



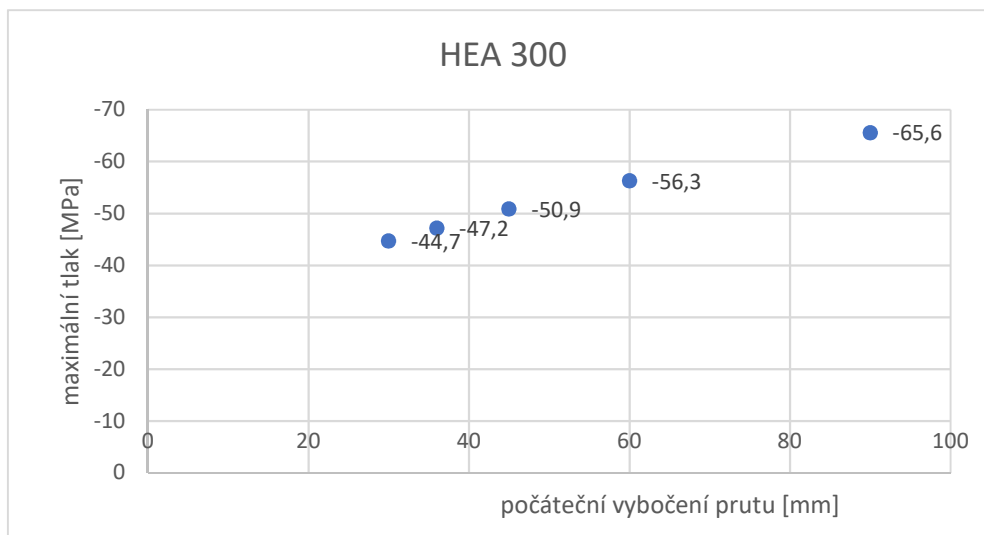
Obr. 112 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 300



Obr. 113 Numerický model – ztužení nosníky HEA 300

### 5.8.3.2 Výsledky

Jako u dvou předchozích ztužení vidíme, že maximální tlakové napětí v táhlu roste s počáteční imperfekcí. Viz (Obr. 114).

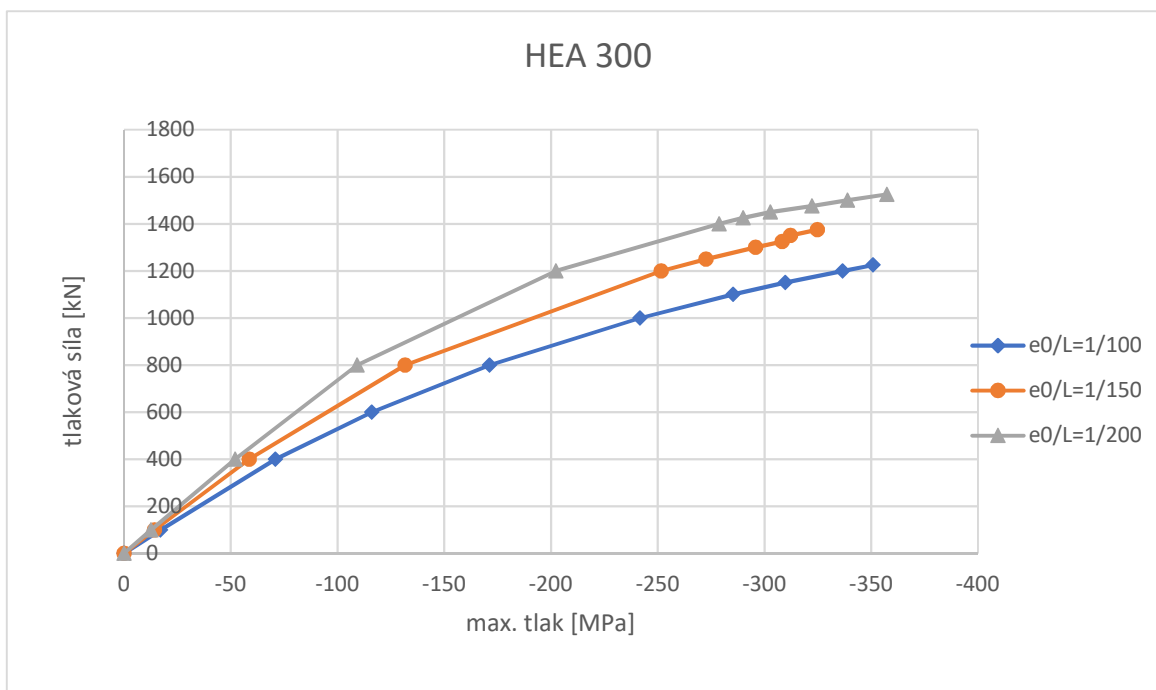


Obr. 114 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení HEA 300

Maximální tlakové napětí je tedy v táhlu 65,6 MPa, při největší počáteční imperfeci táhla 1/100.

### 5.8.3.3 Únosnost

Z třech modelů (1/200 až 1/100) pro maximální napětí v táhlu ve fázi, kdy je podpora VJ1 pod táhlem čtyři, jsme vytvořili modely pro únosnost. Násobky zatěžovacího stavu jsme získali plynulý průběh zatěžování táhla a z něho pak odečetli pro nás důležité hodnoty.



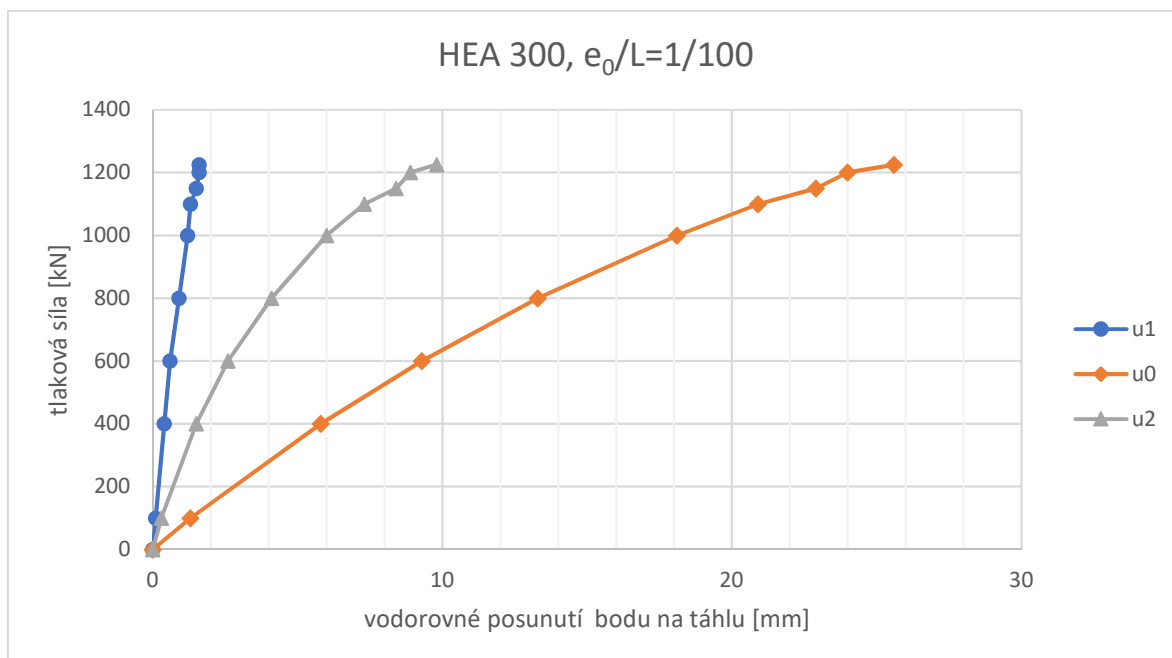
Obr. 115 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – ztužení HEA 300



Při ztužení nosníky HEA 300 bylo dosaženo meze kluzu největší silou ze všech předchozích modelů ztužení.

Tab. 22 Tabulka –  $e_0/L=1/100$ – HEA 300

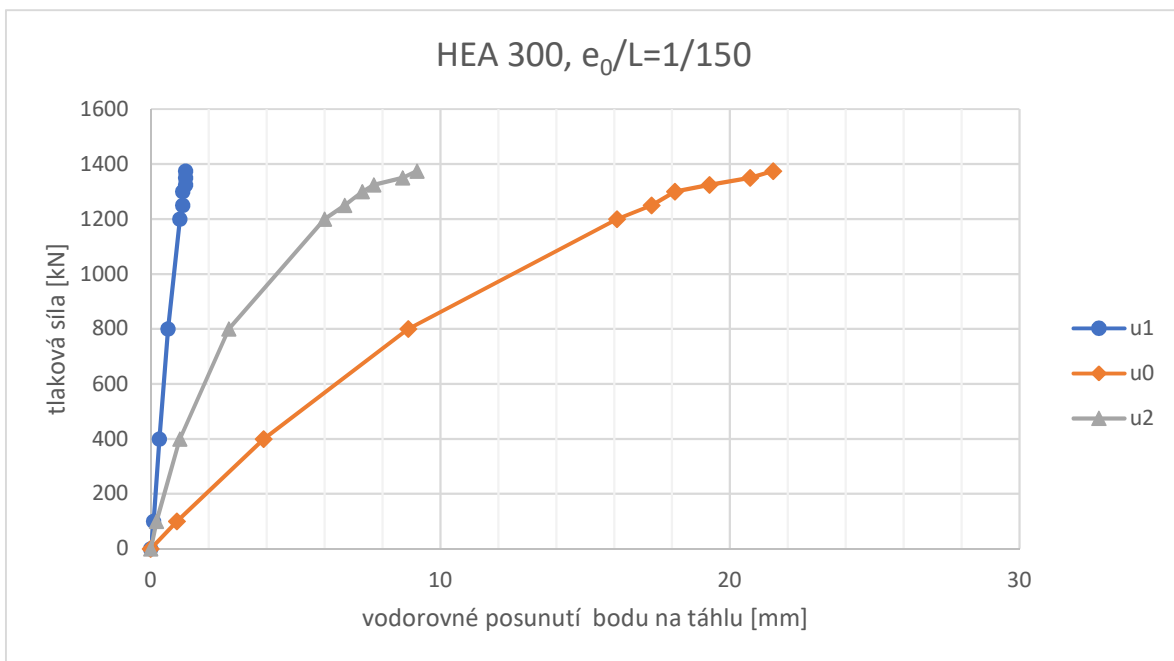
$e_0/L$	1/100									
síla [kN]	0	100	400	600	800	1000	1100	1150	1200	1225
tlak [MPa]	0	-17,1	-71	-116,1	-171,3	-241,7	-285,3	-309,8	-336,6	-350,9
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,4	0,6	0,9	1,2	1,3	1,5	1,6	1,6
$u_0$ [mm]	0	1,3	5,8	9,3	13,3	18,1	20,9	22,9	24	25,6
$u_2$ [mm]	0	0,3	1,5	2,6	4,1	6	7,3	8,4	8,9	9,8



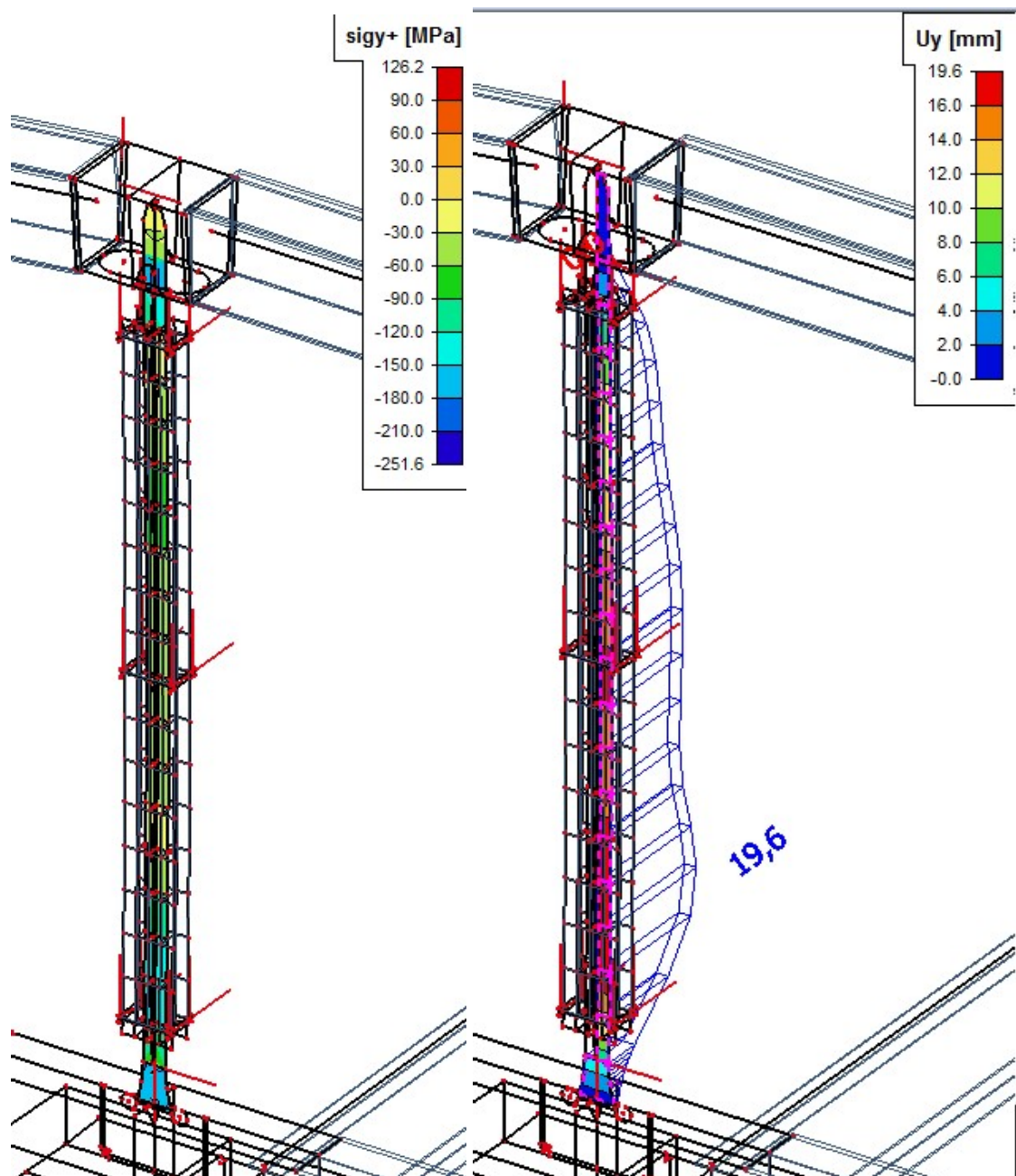
Obr. 116 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/100$ – ztužení HEA 300

Tab. 23 Tabulka –  $e_0/L=1/150$ – HEA 300

$e_0/L$	1/150									
síla [kN]	0	100	400	800	1200	1250	1300	1325	1350	1375
tlak [MPa]	0	-14,2	-58,7	-131,6	-251,6	-272,6	-295,8	-308,3	-312,1	-324,8
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	0,6	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
$u_0$ [mm]	0	0,9	3,9	8,9	16,1	17,3	18,1	19,3	20,7	21,5
$u_2$ [mm]	0	0,2	1	2,7	6	6,7	7,3	7,7	8,7	9,2



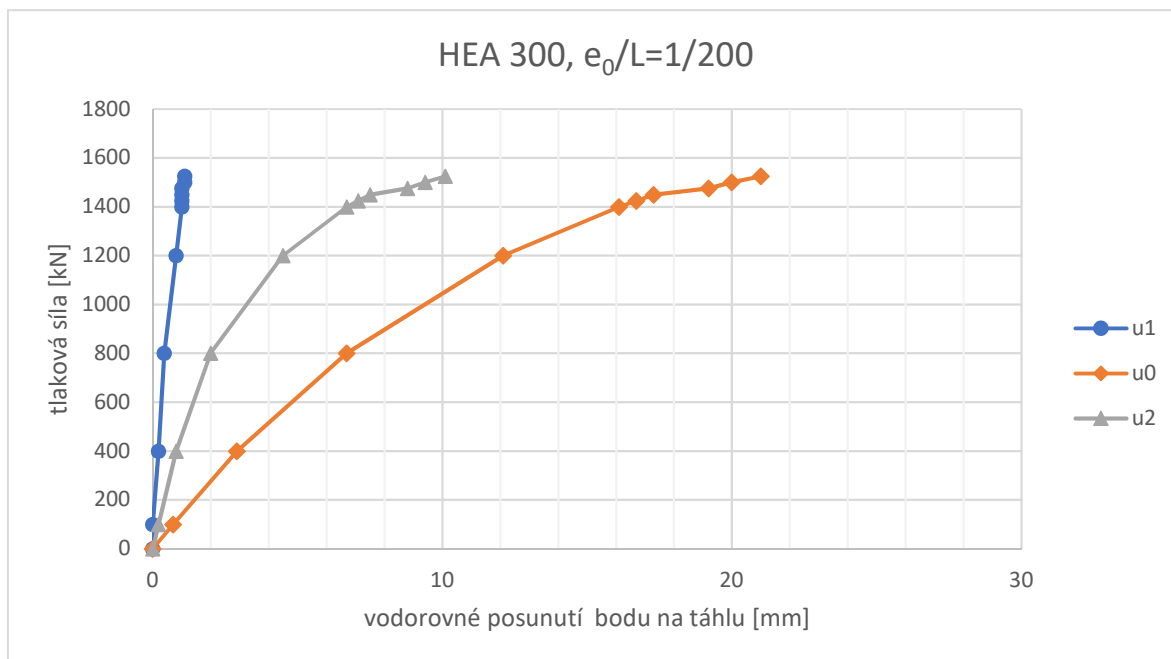
Obr. 117 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/150$  – ztužení HEA 300



Obr. 118 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu –  $F = 1200 \text{ kN}$  –  
 $e_0/L = 1/150$  – HEA 300

Tab. 24 Tabulka –  $e_0/L = 1/200$  – táhlo

$e_0/L$	1/200						
síla [kN]	0	50	100	150	175	200	225
tlak [MPa]	0	-24,3	-56,6	-104,4	-143,5	-203,7	-304,0
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	0,5	0,9	1,2	1,8
$u_0$ [mm]	0	8,9	22,2	44,5	62,3	89,2	133,9
$u_2$ [mm]	0	0,5	1,3	2,6	3,7	5,3	7,9



Obr. 119 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu –  $e_0/L=1/200$  – ztužení HEA 300

Nakonec zjistíme stav konstrukce, kdy je dosaženo maximálního napětí v tlaku 250 MPa. V těchto stavech zjistíme tlakovou sílu a vodorovné posuny bodů na táhlu.

Tab. 25 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 300

$e_0/L$	1/100	1/150	1/200
síla [kN]	1019	1195	1325
$u_1$ [mm]	1,2	1	1
$u_0$ [mm]	18,6	16,3	14,6
$u_2$ [mm]	6,2	6	5,9

Maximální únosnost pro vzpěrnou křivku d, které odpovídají táhla, je 1195 kN.

#### 5.8.4 Shrnutí výsledků ze zesílení HEA 160, HEA 220 a HEA 300

Po všech třech zesíleních nosníky HEA je dobré shrnout všechny důležité hodnoty do jedné tabulky. Vidíme, že očekávané trendy se naplnily. Maximální vodorovná posunutí vznikají při ztužení nosníky HEA 160. Zároveň je největší únosnost dosažena při nejtužším ztužení. Únosnost táhla ztuženého nosníkem HEA 300 je vyšší o 35,5 % než nosníkem HEA 160 pro vzpěrnou křivku d.

Tab. 26 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – shrnutí

nosník HEA	160	220	300	160	220	300	160	220	300
$e_0/L$	1/100			1/150			1/200		
síla [kN]	573	892	1019	688	1079	1195	765	1209	1325
$u_1$ [mm]	1,8	1,6	1,2	1,7	1,6	1	1,6	1,3	1
$u_0$ [mm]	79,7	42,5	18,6	77,4	39,1	16,3	76,1	36,4	14,6
$u_2$ [mm]	7,8	7,7	6,2	7,8	7,9	6	7,9	8	5,9

Únosnost jednotlivých ztužení se nám budou hodit později při návrhu dvou variant, ve kterých se budeme snažit navrhnout hospodárné ztužení kombinací všech jednoduchých variant.

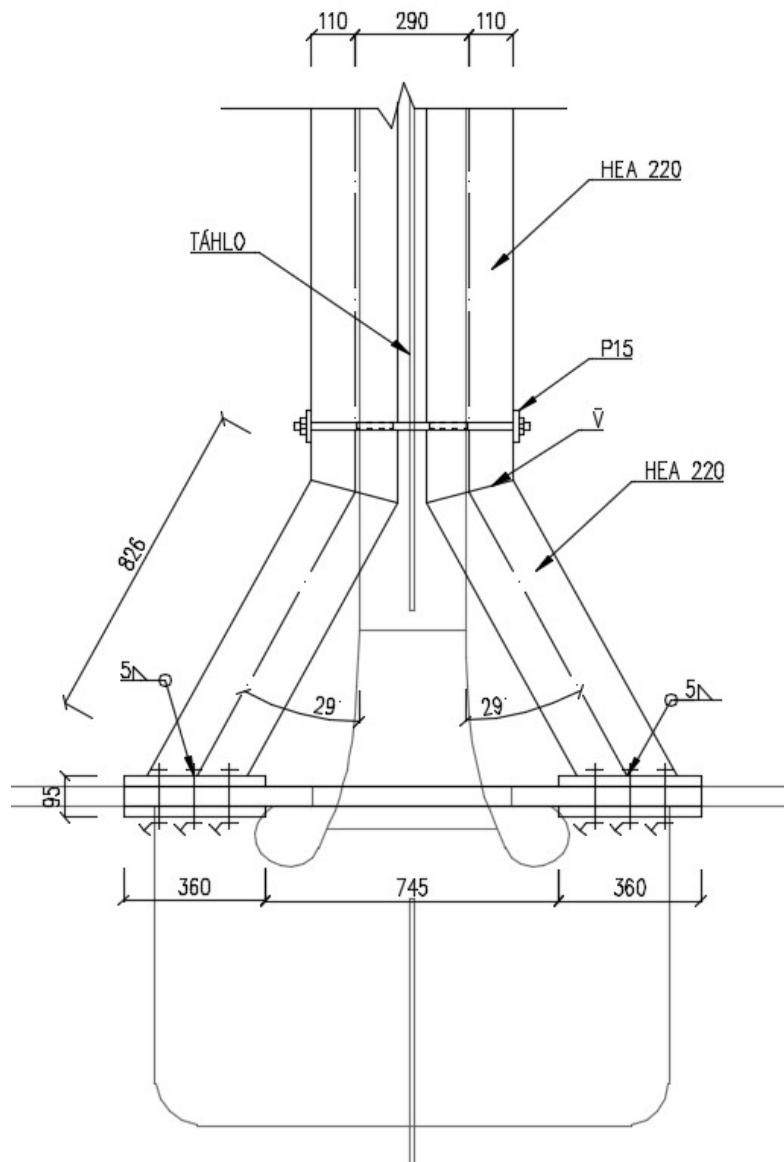
Kdybychom chtěli toto ztužení ještě zlepšit, tak se nabízí propojení nosníků HEA s hlavním nosníkem. Vznikaly by mnohem menší vodorovné deformace a plech mezi táhlem a hlavním nosníkem by byl méně namáhán během výsunu.

Proto bych ještě zkusil vypočítat únosnost u takto ztuženého táhla s nosníky HEA 220.

### 5.8.5 VJ2.1 – Upravení varianty ztužení táhel nosníky HEA 220

U ztužení nosníky HEA vidíme, že vodorovné posunutí  $u_2$  je větší než posunutí  $u_1$ . Posunutí  $u_2$  se blíží hodnotě 10 mm. Tlakové napětí v táhlu nedosahuje meze kluzu, ale zkusíme navrhnout řešení, které by toto vodorovné posunutí snížilo.

Upravíme ztužení HEA 220 tak, že v dolní části navaříme ukloněný nosník HEA 220. K němu navaříme čelní desku, která bude položena a připevněna na horní pásnici hlavního nosníku třecím spojem. Viz Obr. 120.

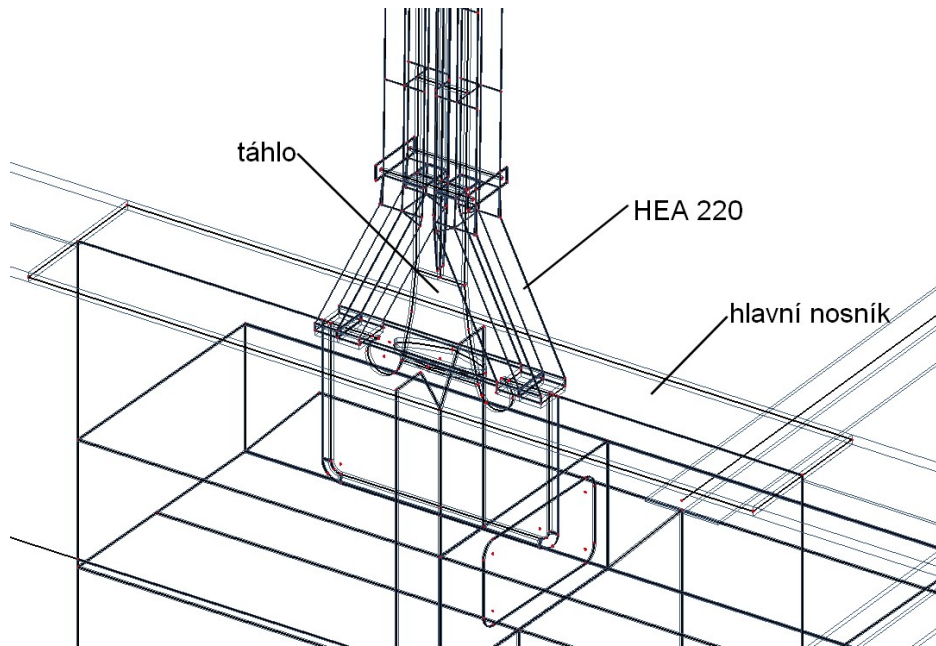


Obr. 120 Schéma upravení HEA 220 - pohled

#### 5.8.5.1 Model

Model se vytvoří z modelů únosnosti pro HEA 220 s počáteční imperfkcí 1/200 až 1/100. Vymodeluje dva šikmé nosníky HEA 220, které se připojí k horní stojně hlavního nosníku nad koncem zesílení pro táhlo. Připojení k hlavnímu nosníku je posuvné ve směru hlavního nosníku. Viz Obr. 121.



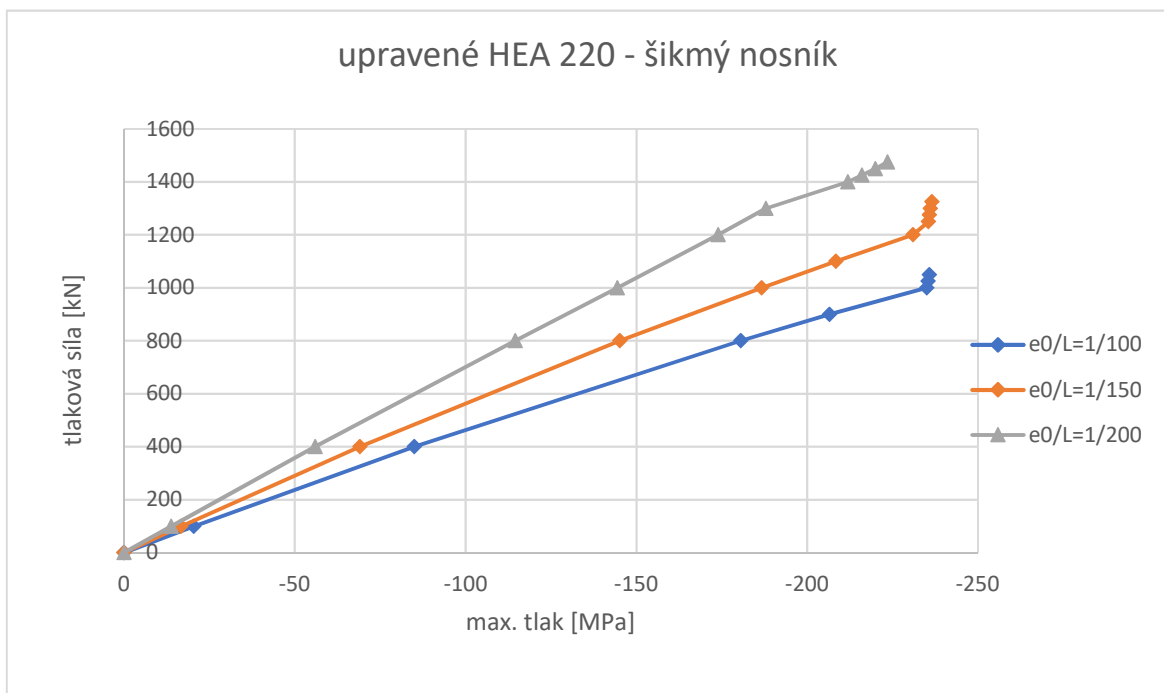


Obr. 121 Numerický model upravené HEA 220

#### 5.8.5.2 Výsledky

První posoudíme maximální napětí v šikmých přidaných nosnících HEA, svarové připojení na plech a třecí spoje mezi těmito plechy.

Maximální hlavní tlakové napětí v těchto nosnících je dosaženo při vyšší síle, než je dříve stanovená únosnost, ale deformace jsou už značné, nebude se únosnost zvyšovat. Viz Obr. 122



Obr. 122 Graf závislosti síly na maximálním tlaku ve ztužení – upravené HEA 220

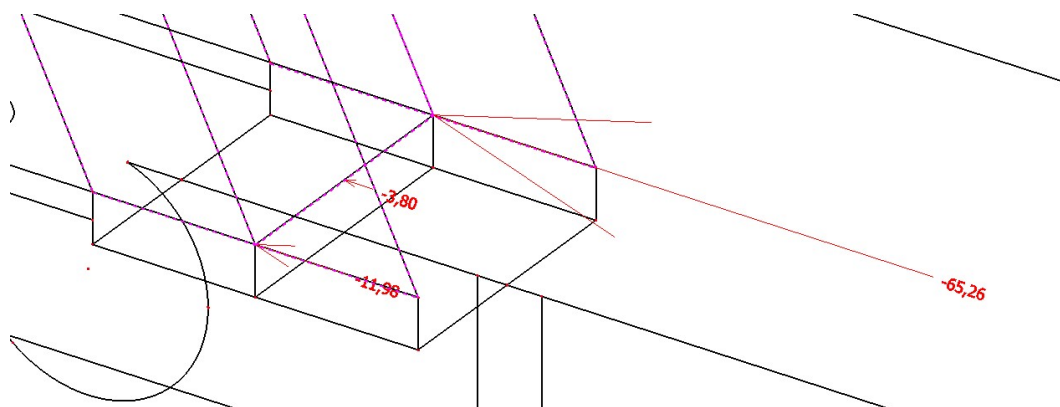
Obr. 123 Tabulka pro graf závislosti síly na maximálním tlaku ve ztužení –upravené HEA

220

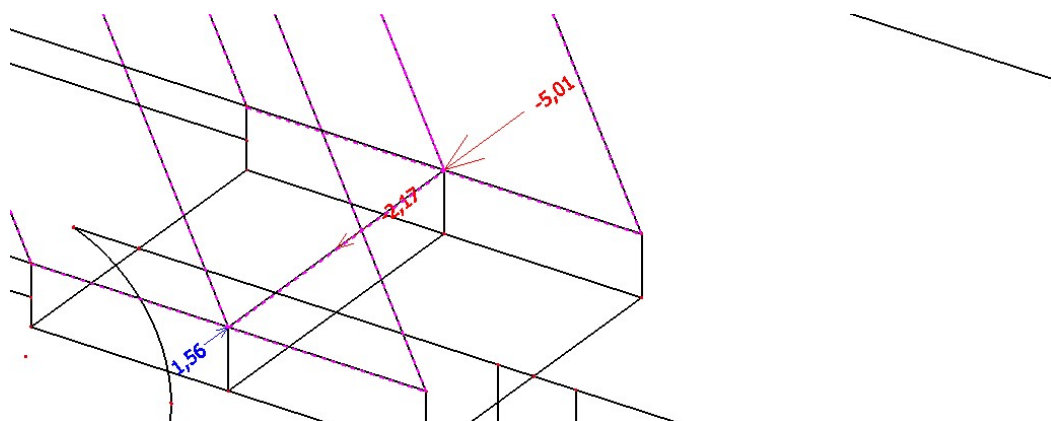
$e_0/L$	1/100											
síla [kN]	0	100	400	800	900	1000	1025	1050	1075			
tlak [MPa]	0	-20,4	-85,0	-180,6	-206,5	-235,0	-235,4	-235,8	-236,4			
$e_0/L$	1/150											
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1100	1200	1250	1275	1300	1325	
tlak [MPa]	0	-16,7	-69,1	-145,2	-186,7	-208,4	-231,0	-235,5	-235,8	-236,1	-236,5	
$e_0/L$	1/200											
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1200	1300	1400	1425	1450	1475	
tlak [MPa]	0	-13,8	-56,0	-114,5	-144,4	-173,9	-187,9	-211,9	-216,0	-219,9	-223,5	

Posoudíme ještě svarový spoj nosníku HEA na plech a třecí spoj u prvku, který spojuje dolní část ztužení.

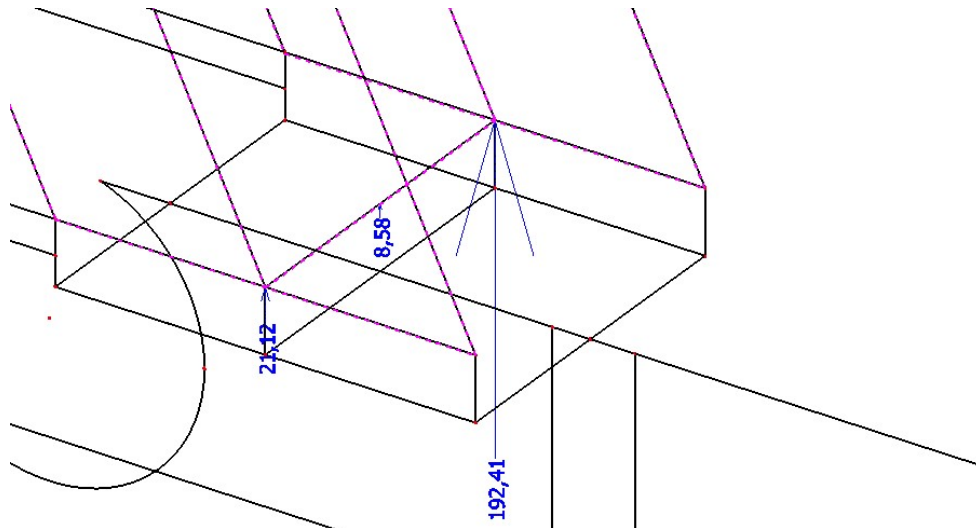
Zatížíme model silou 1080 kN (únosnost ztužení HEA 220 pro  $e_0/L=1/150$ ) a v příčném řezu získáme návrhové síly a momenty.



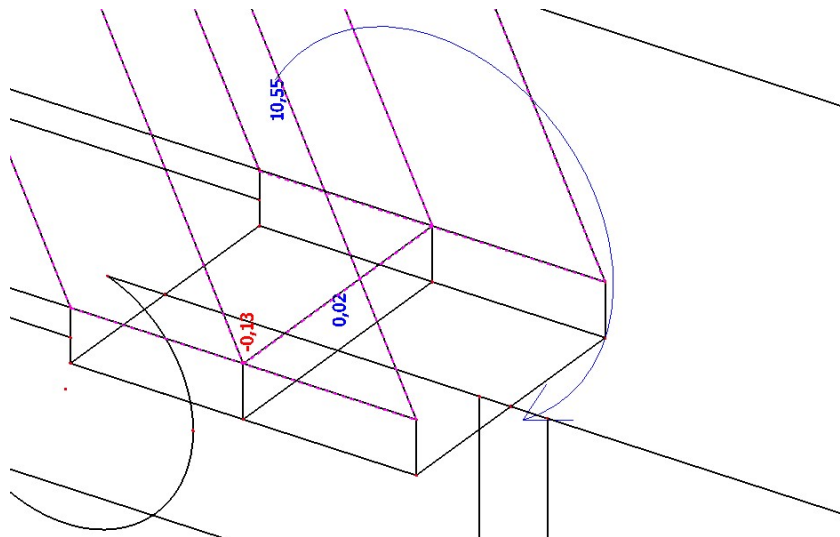
Obr. 124  $F_x$  [kN] – hrana nosníku HEA 220



Obr. 125  $F_y$  [kN] – hrana nosníku HEA 220



Obr. 126  $F_z$  [kN] – hrana nosniku HEA 220



Obr. 127  $M_y$  [kNm] – hrana nosniku HEA 220

Z výsledků vidíme že je nejvíce namáhaná pásnice. Pokud vyhoví ona, vyhoví celý průřez. Ostatní momenty jsou minimální a lze je tedy zanedbat. Síla ve směru x se rovná 65,26 kN (Obr. 124), ve směru y 5,01 kN (Obr. 125) a ve směru z 192,41 kN (Obr. 126). Moment kolem osy y je 10,55 kNm (Obr. 127). Posoudíme svary na pásnici. [16]

Tloušťka svaru je 5 mm. Délka svaru na pásnici je 244 mm. Sílu ve směru y zanedbáme.

$$F_x = 65,26 \text{ kN}; F_z = 192,41 \text{ kN}; M_y = 10,55 \text{ kNm}$$

$$f_u = 360 \text{ MPa}; \beta_w = 0,8; \gamma_{M2} = 1,25$$

$$\sqrt{[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \text{ a } \sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (12)$$

$$L_1 = 244 - 2 \cdot a = 244 - 2 \cdot 5 = 234 \text{ mm (vnější)} \quad (13)$$

$$L_2 = 244 - 2 \cdot 2 \cdot a - t_w = 244 - 2 \cdot 2 \cdot 5 - 7 = 217 \text{ mm (vnitřní)} \quad (14)$$

$$A = a \cdot (L_1 + L_2) = 5 \cdot (234 + 217) = 2255 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

Smykové napětí rovnoběžné se svarem

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_x}{A} = \frac{65,26 \cdot 10^3}{2255} = 28,94 \text{ MPa} \quad (16)$$

Napětí od síly  $F_z$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\frac{F_z}{\sqrt{2}}}{A} = \frac{\frac{192,41 \cdot 10^3}{\sqrt{2}}}{2255} = 60,33 \text{ MPa} \quad (17)$$

Napětí od  $M_y$

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot a L_1^3 = \frac{1}{6} \cdot 5 \cdot 234^3 = 10,68 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_y = \frac{2 \cdot I_y}{L_1} = \frac{2 \cdot 10,68 \cdot 10^6}{234} = 91,28 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad (19)$$

$$\sigma_M = \frac{M_y}{W_y} = \frac{10,55 \cdot 10^6}{91,28 \cdot 10^3} = 115,58 \text{ MPa} \quad (20)$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{2}} = \frac{115,58}{\sqrt{2}} = 81,73 \text{ MPa} \quad (21)$$

Celkem napětí

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 60,33 + 81,73 = 142,06 \text{ MPa} \quad (22)$$

Posouzení

$$\sqrt{[142,06^2 + 3(142,06^2 + 28,94^2)]} = 288,51 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa} \quad (23)$$

VYHOVUJE

$$142,06 \leq 259,2 \text{ MPa} = 0,9 \cdot \frac{360}{1,25} \text{ VYHOVUJE} \quad (24)$$

Nyní navrhne třecí spoj. Jako návrhovou sílu použijeme sumu všech sil ve směru x. Návrhová síla se rovná 81,04 kN. Síla se přenáší na dva plechy a každý plech je připevněn třemi šrouby. Návrhová síla na jeden šroub se pak rovná 13,51 kN.

Šrouby jsou zde vysokopevnostní M16 10.9. Třecí plochy jsou dvě a součinitel tření je 0,4 (tryskaný povrch s alkalicko – zinkovým silikátovým nátěrem s tloušťkou 50–80  $\mu\text{m}$ ). Otvor má rozměry 18/22 a je tedy protáhlý ve směru působení síly. Třída spoje je C (třecí spoj bez prokluzu při MSÚ). [16]

$$F_{Ed} = 13,51 \text{ kN}; n = 2; \mu = 0,4; k_s = 0,76$$

$$f_{ub} = 1000 \text{ MPa}; A_s = 157 \text{ mm}^2; \gamma_{M3} = 1,25$$

Předpínací síla

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,7 \cdot 1000 \cdot 157 = 109,9 \text{ kN} \quad (25)$$

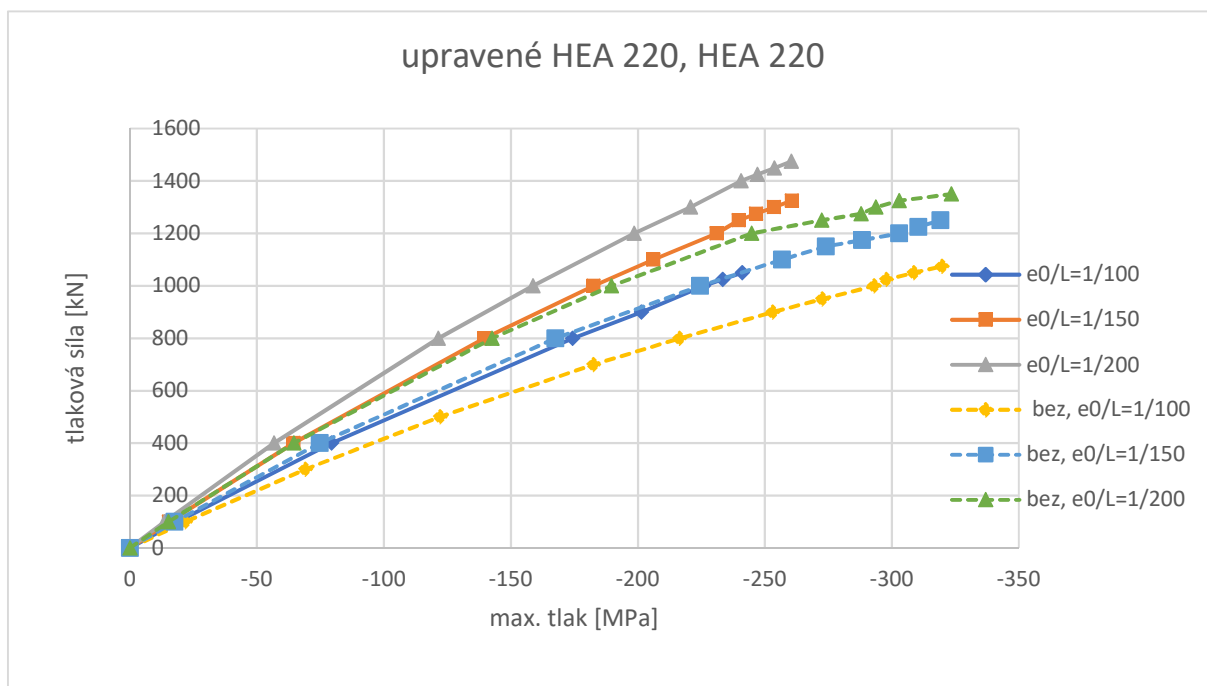
Únosnost jedno předpjatého šroubu

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,c} = \frac{0,76 \cdot 2 \cdot 0,4}{1,25} \cdot 109,9 = 53,46 \text{ kN} \geq 13,51 \text{ kN} \quad (26)$$

$$= F_{Ed} \text{ VYHOVUJE}$$

Posoudili jsme kritické průřezy modelu a můžeme tedy zkoumat chování táhel.

Na grafu (Obr. 128) vidíme maximální tlakové napětí v táhlu bez úpravy (čárkovaně) nebo s úpravou (plně). Pro všechny tři počáteční imperfekce se pro stejné napětí tlaková síla zvýšila.



Obr. 128 Graf závislosti síly na maximální tlaku v táhlu – upravené HEA 220 a původní ztužení HEA 220

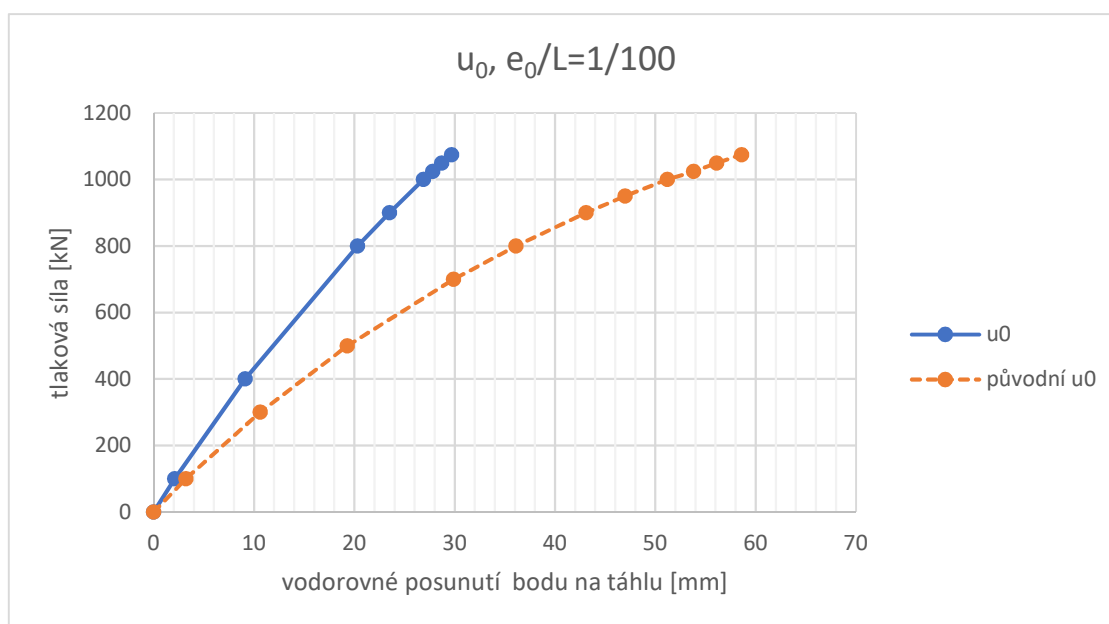
Ještě je třeba porovnat vodorovné posunutí bodů táhla. S jednoduchým obložením nosníky HEA porovnáme jen vodorovná posunutí  $u_0$  a  $u_2$ . Na  $u_1$  nemá úprava vliv.

V tabulkách Tab. 27 až Tab. 29 máme výsledky z modelů únosnosti s upraveným ztužením. Z postupně zatěžovaného modelu byly odečteny maximální hodnoty tlaku v táhlu a pak vodorovné posunutí v bodech táhla stejně jako v předchozích případech.

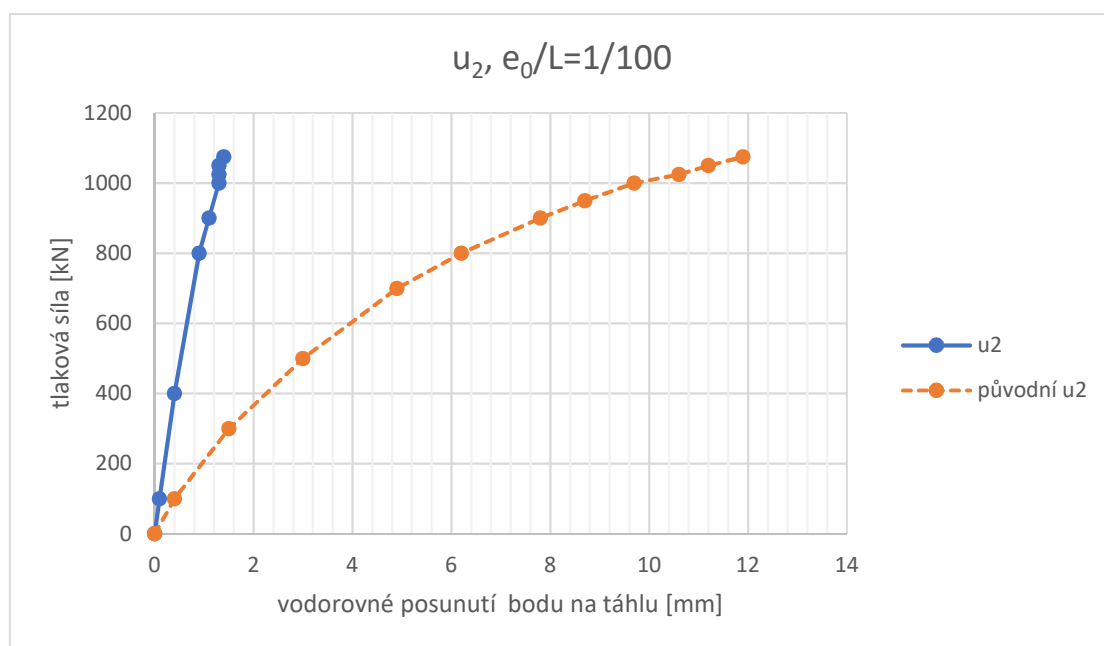
V grafech Obr. 129 až Obr. 135 jsou zobrazeny průběhy posunutí vodorovných bodů  $u_0$  a  $u_2$  v upraveném modelu a v původním modelu (čárkovaně).

Tab. 27 Tabulka  $e_0/L=100$  – upravené HEA 220

$e_0/L$	1/100								
síla [kN]	0	100	400	800	900	1000	1025	1050	1075
tlak [MPa]	0	-18,7	-79,4	-174,4	-201,5	-225,9	-233,4	-241,1	-248,9
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,3	0,8	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3
$u_0$ [mm]	0	2,1	9,1	20,3	23,5	26,9	27,8	28,7	29,7
$u_2$ [mm]	0	0,1	0,4	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4



Obr. 129 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_0$  –  $e_0/L=1/100$

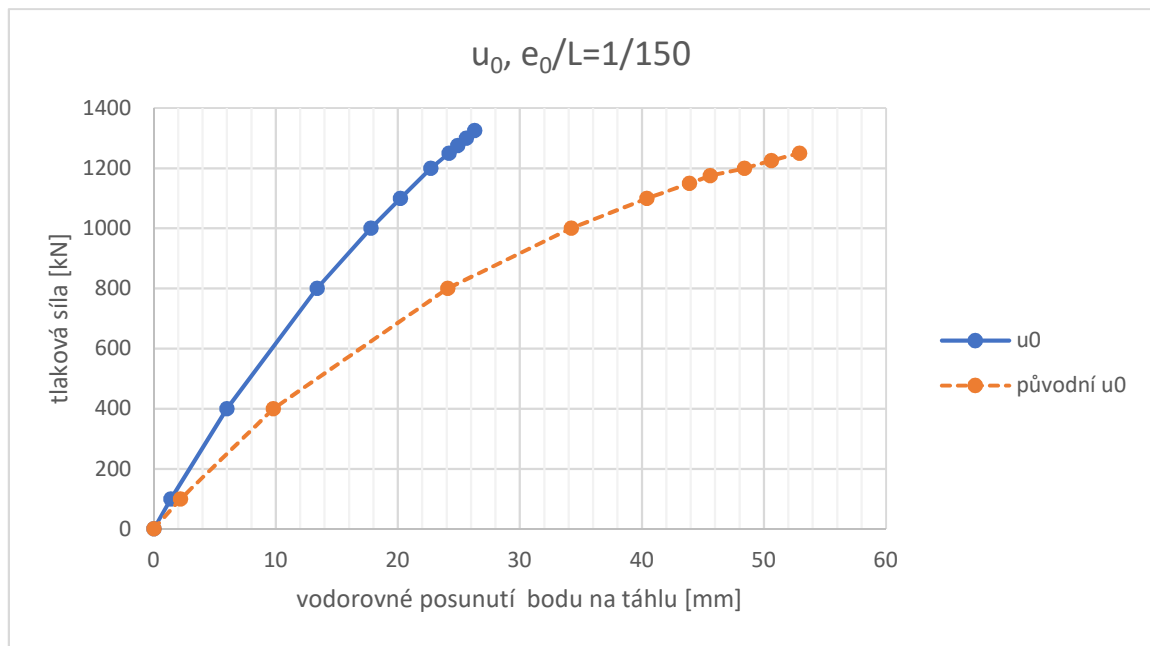


Obr. 130 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_2$  –  $e_0/L=1/100$

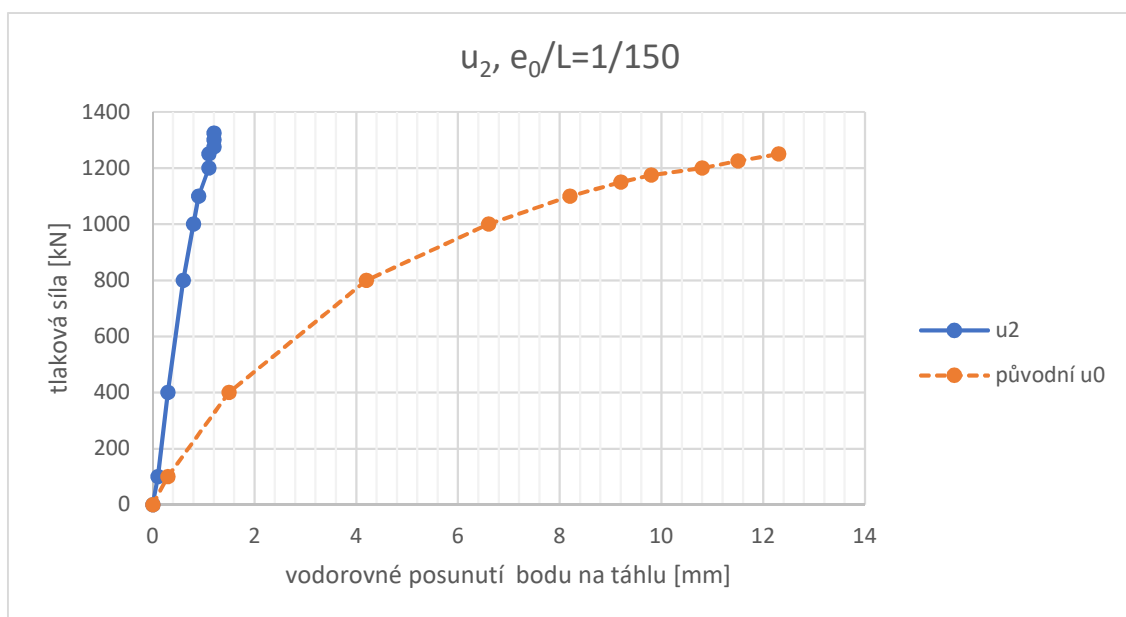


Tab. 28 Tabulka  $e_0/L=1/150$  –upravené HEA 220

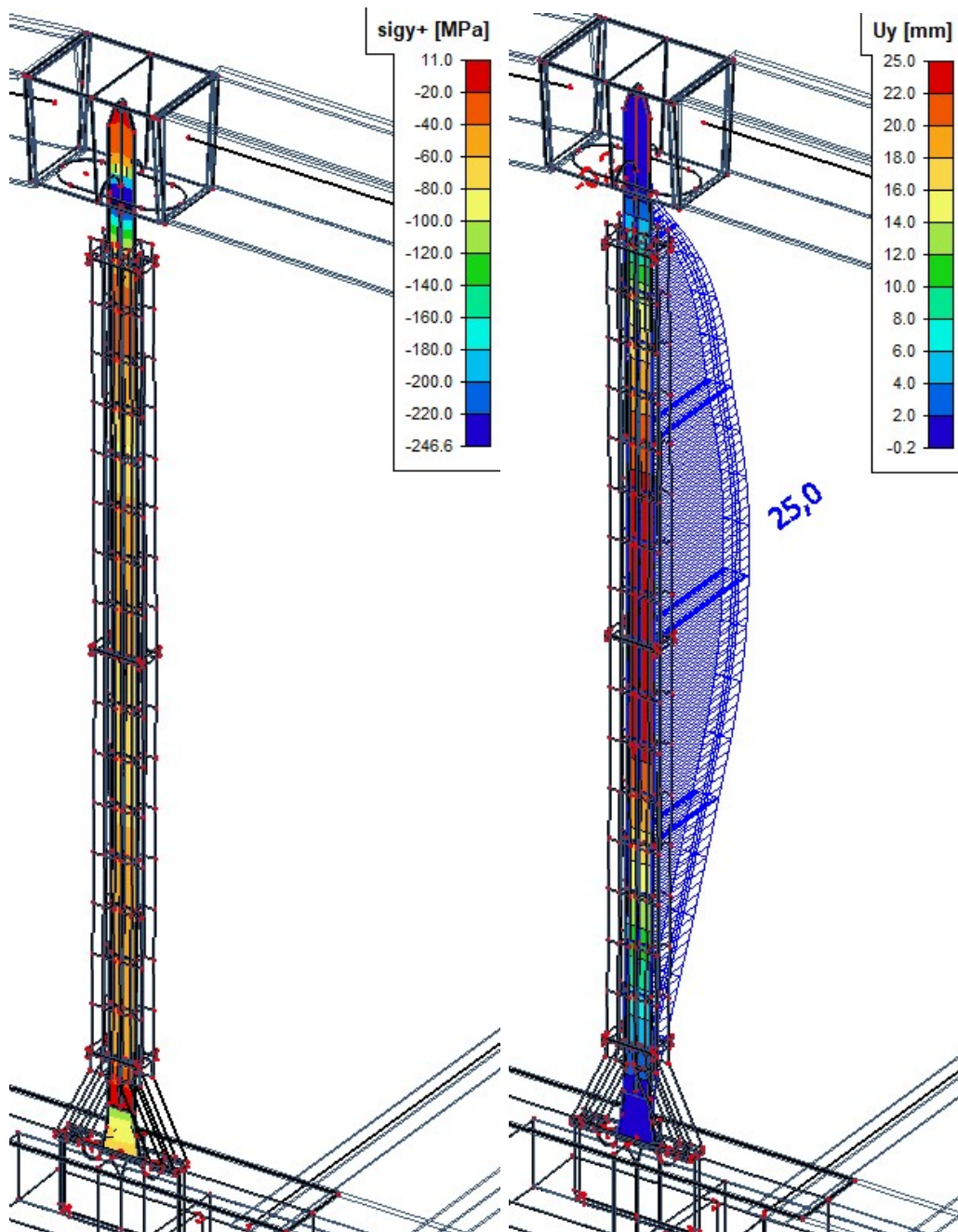
$e_0/L$	1/150										
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1100	1200	1250	1275	1300	1325
tlak [MPa]	0	-15,4	-64,5	-139,5	-182,6	-206,1	-231,1	-239,7	-246,6	-253,6	-260,7
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,2	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2
$u_0$ [mm]	0	1,4	6,0	13,4	17,8	20,2	22,7	24,2	24,9	25,6	26,3
$u_2$ [mm]	0	0,1	0,3	0,6	0,8	0,9	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2



Obr. 131 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_0 - e_0/L=1/150$



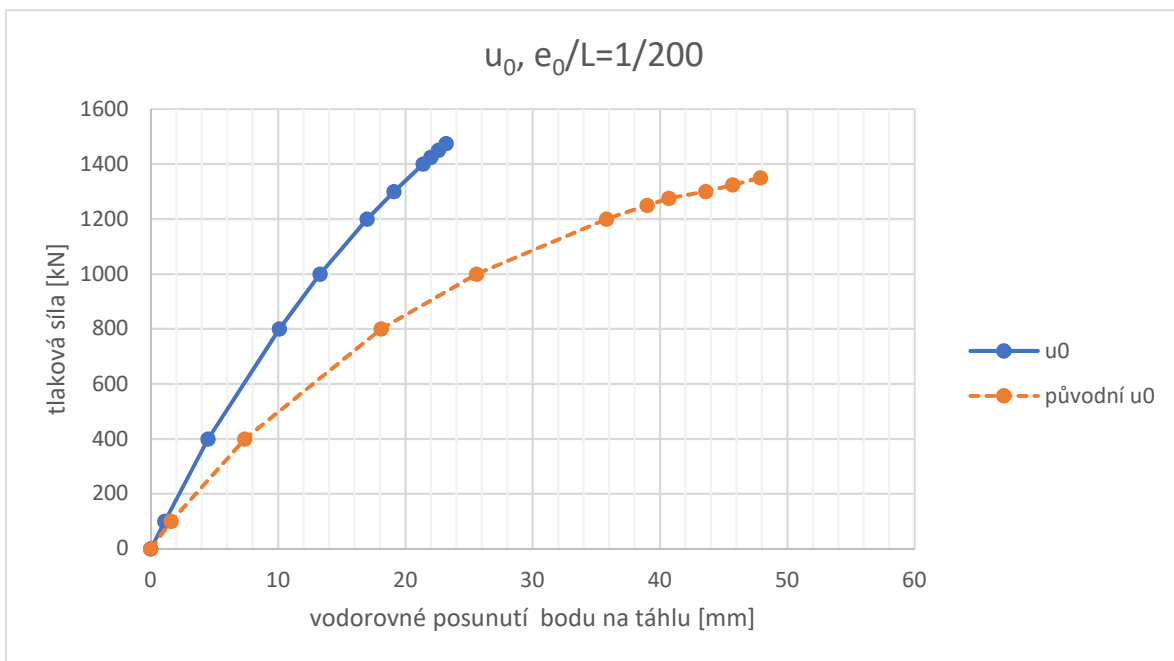
Obr. 132 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_2 - e_0/L=1/150$



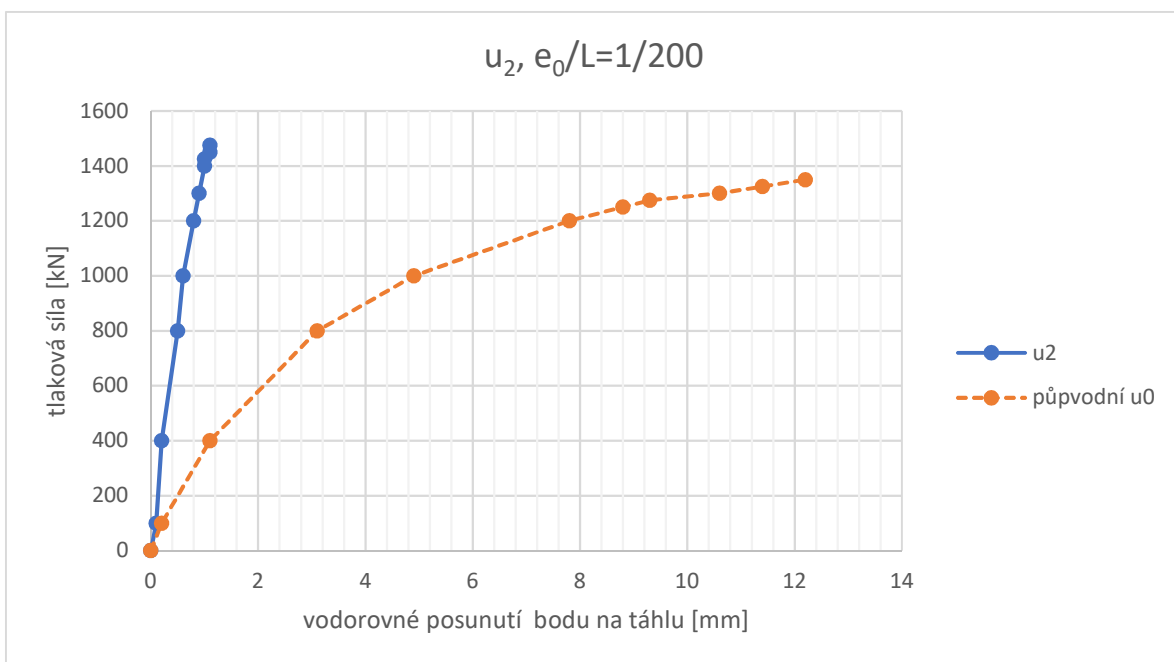
Obr. 133 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu –  $F = 1275 \text{ kN}$  –  $e_0/L = 1/150$  –  
upravené HEA 220

Tab. 29 Tabulka  $e_0/L = 1/200$  – upravené HEA 220

$e_0/L$	1/200											
síla [kN]	0	100	400	800	1000	1200	1300	1400	1425	1450,0	1475	
tlak [MPa]	0	-13,6	-56,8	-121,4	-158,7	-198,5	-220,7	-240,7	-247,1	-253,7	-260,4	
$u_1$ [mm]	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	
$u_0$ [mm]	0	1,1	4,5	10,1	13,3	17,0	19,1	21,4	22,0	22,6	23,2	
$u_2$ [mm]	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	



Obr. 134 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_0 - e_0/L=1/200$



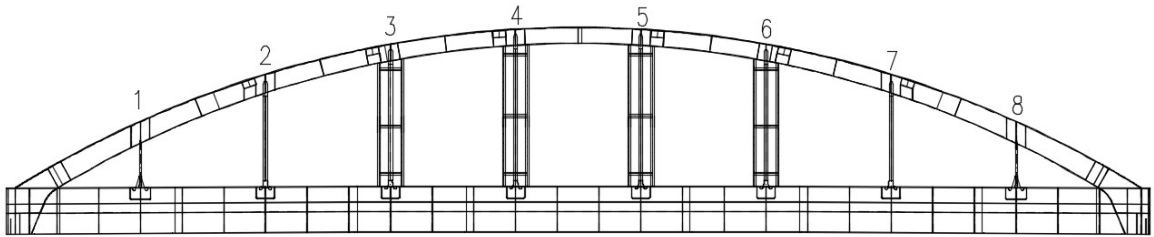
Obr. 135 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu  $u_2 - e_0/L=1/200$

Upravení ztužení nosníky HEA 220 zmenšilo vodorovné posuny uprostřed výšky táhla tak i v dolním bodě táhla. Takže přidání těchto nosníků splnilo svůj účel. Zmenšení u bodu  $u_0$  je přibližně 50 %. U dolního bodu připojení táhla kleslo vodorovné posunutí o 90 %. Táhlo je tedy více ochráněné proti trvalým deformacím ve spodní části táhla.

Přehledný výkres upraveného ztužení HEA 220 je přiložen jako příloha číslo 8.

### 5.8.6 VJ4 – Ztužení táhel přidáním stojek k táhlům

Další variantou je přidání prvků, které budou tužší než táhla a převezmou více zatížení. Jako stojky se použijí uzavřené profily čtvercového průřezu se stranou 300 mm a s tloušťkou stěny 16 mm. Stojky se umístí ve vzdálenosti 0,7 metru od osy táhla na obě strany ve směru hlavního nosníku. Stojky se spojí nosníky s průřezem U200. Umístí se tři páry na každé ztužení. Ztužení se umístí také na táhla 2, 3, 4, 5, 6 a 7.

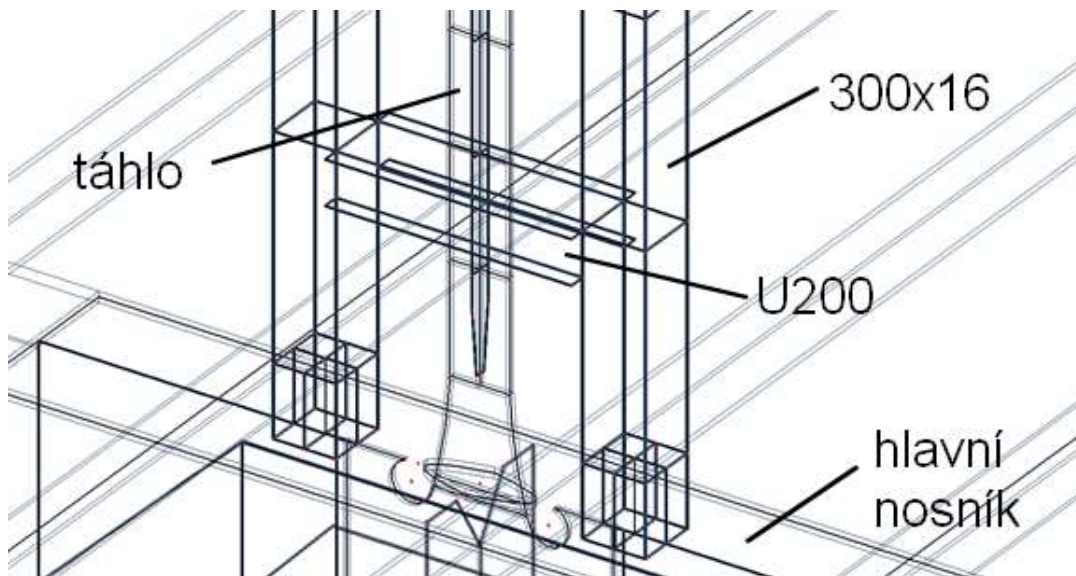


*Obr. 136 Ztužení táhel přidáním stojek k táhlům*

Toto ztužení bylo použito také na mostu ve Veselí nad Lužnicí.

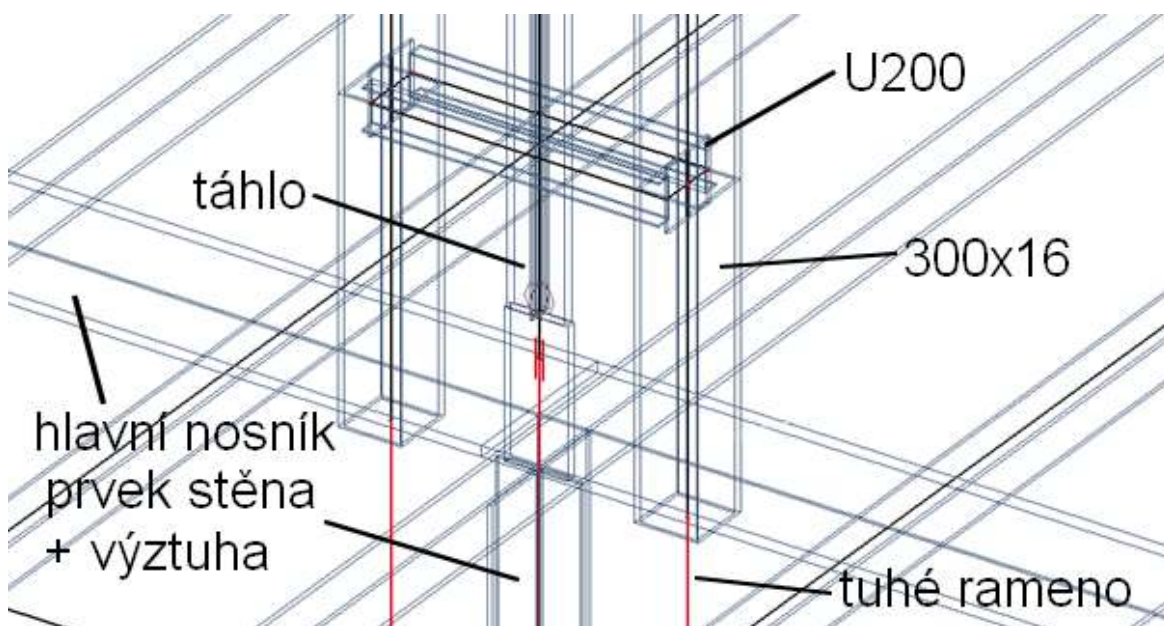
#### 5.8.6.1 Model

Ztužení táhel stojkami nechá táhlo volné a bude se opírat o horní pásnici hlavního nosníku a dolní pás oblouku. Osu stojky umístíme 0,7 m od osy táhla na obě strany. Vytvoříme zde takovou roznášecí mříž z deskostěnových prvků. Vytvoříme z plošných prvků čtvercový průřez se stranou 300 mm a tloušťkou 16 mm. Mřížka bude udělána tak, že se přidají plošné prvky na spojnicí středů protilehlých stran. Výška mřížky je 325 mm. Poté už můžeme stojky vztyčit až k oblouku, kde vytvoříme stejnou mříž. Poté ještě přidáme nosníky U200 z plošných prvků. Výška nosníku je 200 mm, šířka 75 mm a tloušťka pásnic 11,5 mm a stojiny 8,5 mm.



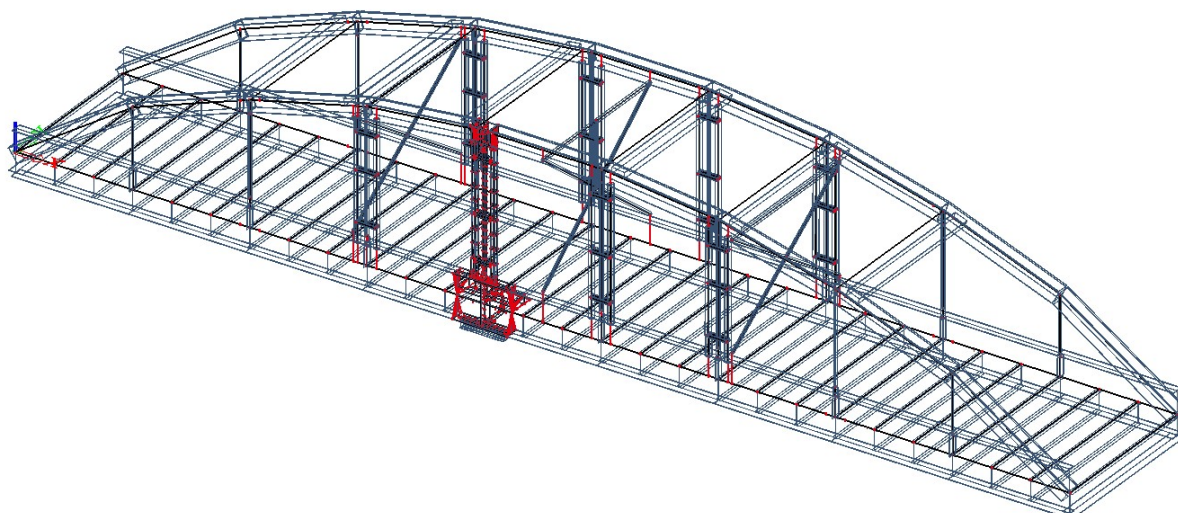
Obr. 137 Deskostěnový model – ztužení táhel stojkami

Dále vytvoříme podobnou konstrukci kolem táhel na prutové části konstrukce. V místě, kde je hlavní nosník, se prvky připojí ke střednici hlavního nosníku *tuhými rameny*. To samé i u oblouku. Poté se ještě vytvoří konstrukce, která drží u sebe obě stojky (Obr. 141), a to z profilu U200 (Obr. 140), který je připojen jen přes prvek stěny stojky.



Obr. 138 Prutová část deskostěnového modelu – ztužení táhel stojkami





Obr. 139 Numerický model – ztužení stojkami u táhel

Průřez

Vlastnosti	
A [m <sup>2</sup> ]	3,2200e-03
Ay [m <sup>2</sup> ]	1,6758e-03
Az [m <sup>2</sup> ]	1,6900e-03
AL [m <sup>2</sup> /m]	6,6000e-01
AD [m <sup>2</sup> /m]	6,6027e-01
cYUSS [mm]	20
cZUSS [mm]	100
α [deg]	0,00
Iy [m <sup>4</sup> ]	1,9100e-05
Iz [m <sup>4</sup> ]	1,4800e-06
Iy [mm]	77
Iz [mm]	21
Wely [m <sup>3</sup> ]	1,9100e-04
Welz [m <sup>3</sup> ]	2,7000e-05
Wply [m <sup>3</sup> ]	2,3175e-04
Wplz [m <sup>3</sup> ]	5,1874e-05
Mply+ [Nm]	5,35e+04
Mply- [Nm]	5,35e+04
Mplz+ [Nm]	1,22e+04
Mplz- [Nm]	1,22e+04
dy [mm]	-44
dz [mm]	0
It [m <sup>4</sup> ]	1,1900e-07
Iw [m <sup>6</sup> ]	1,0500e-08
B.v [mm]	0

Obrázek    Vlákna    Výšečové souřadnice    Smyk y    Smyk z    Osově čáry    Počít...

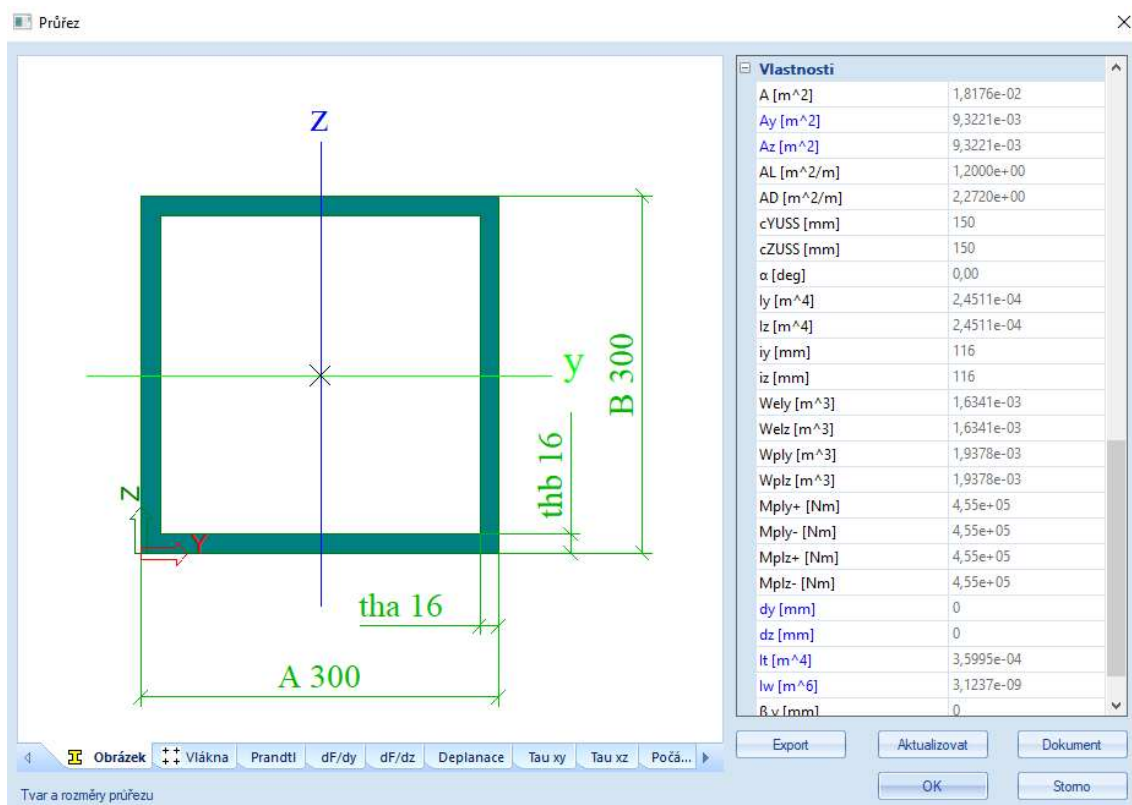
Tvar a rozměry průřezu

Export    Aktualizovat    Dokument

OK    Storno

Obr. 140 Průřez U200 – ztužení stojkami u táhel

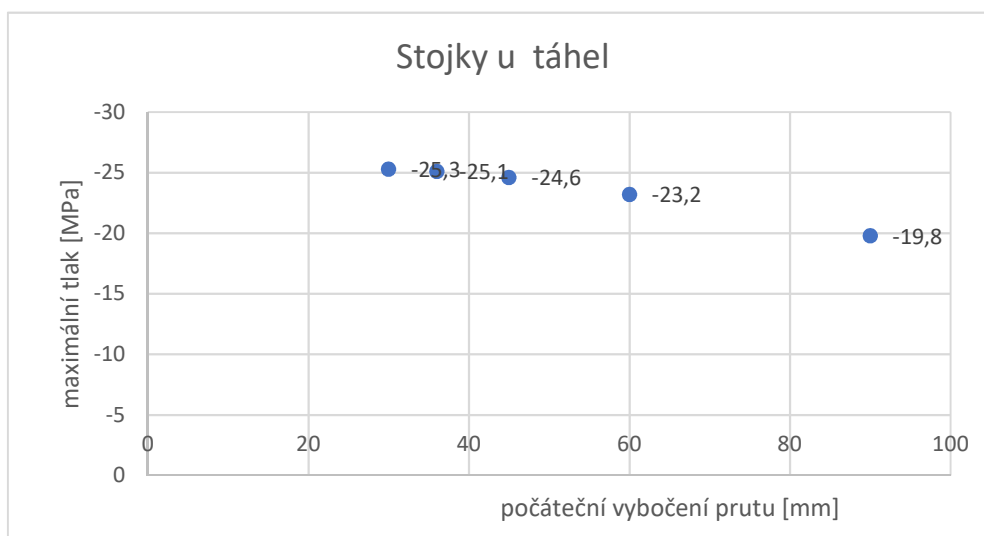




Obr. 141 Průřez 300x16 – ztužení stojkami u táhel

### 5.8.6.2 Výsledky

Stejně jak u ztužení HEA zjistíme maximální tlak v táhlu ve fázi, kdy je podpora pod táhlem 4. Vidíme, že napětí klesá s rostoucí počáteční imperfekcí. Je to nejspíš způsobeno tím, že konstrukce kolem přebírá víc zatížení, protože je tužší.

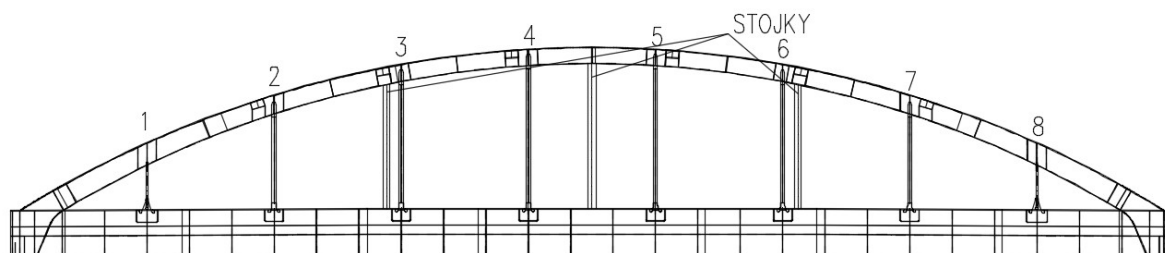


Obr. 142 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení stojkami

Maximální tlak nastává při počáteční imperfekci 30 mm.

### 5.8.7 VJ5 – Ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení

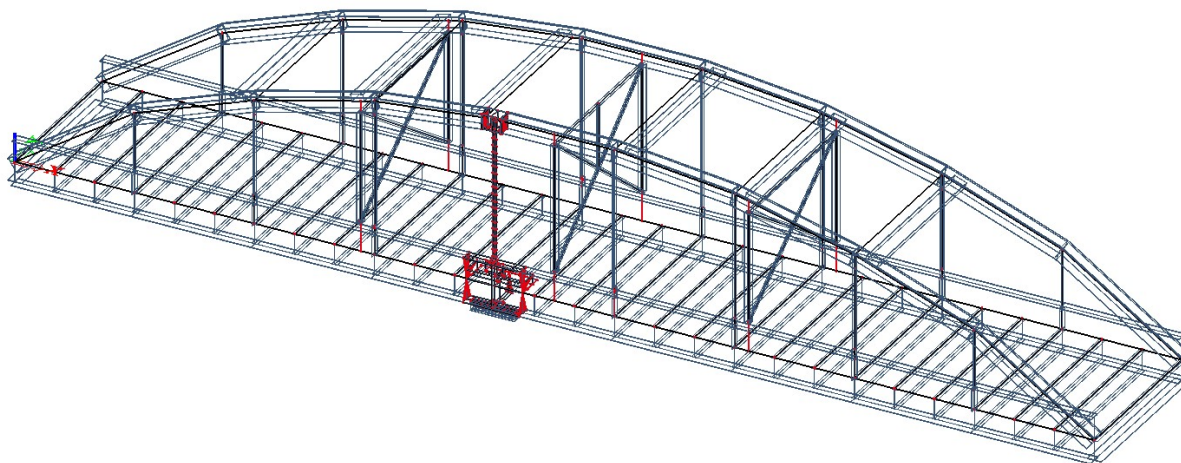
Další možností je přidání stojek do roviny příčného ztužení. Tyto stojky převezmou sílu, která by jinak šla do táhla, a zabrání tak přetížení. Toto ztužení také pomůže příčnému ztužení, které udělá tužší.



Obr. 143 Schéma – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení

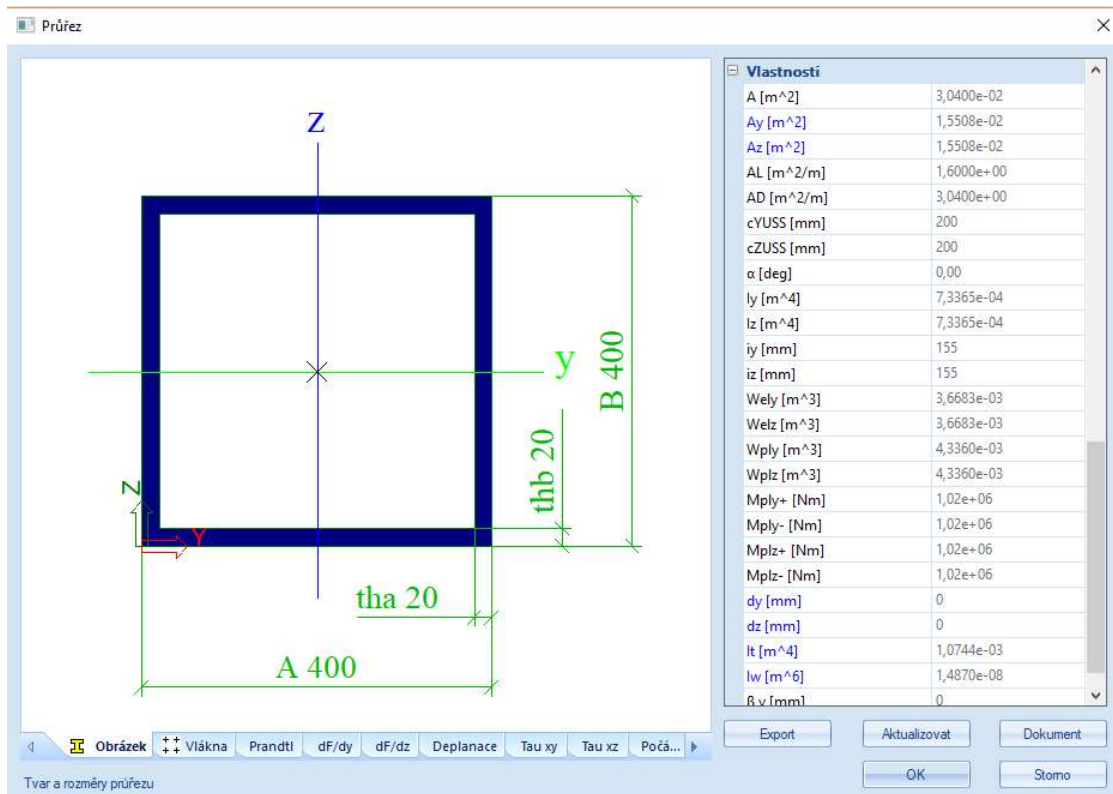
#### 5.8.7.1 Model

Vytvoření modelu bylo v tomto případě jednoduché. Stačilo přidat prutové prvky už k existujícím uzlům na příčném ztužení.

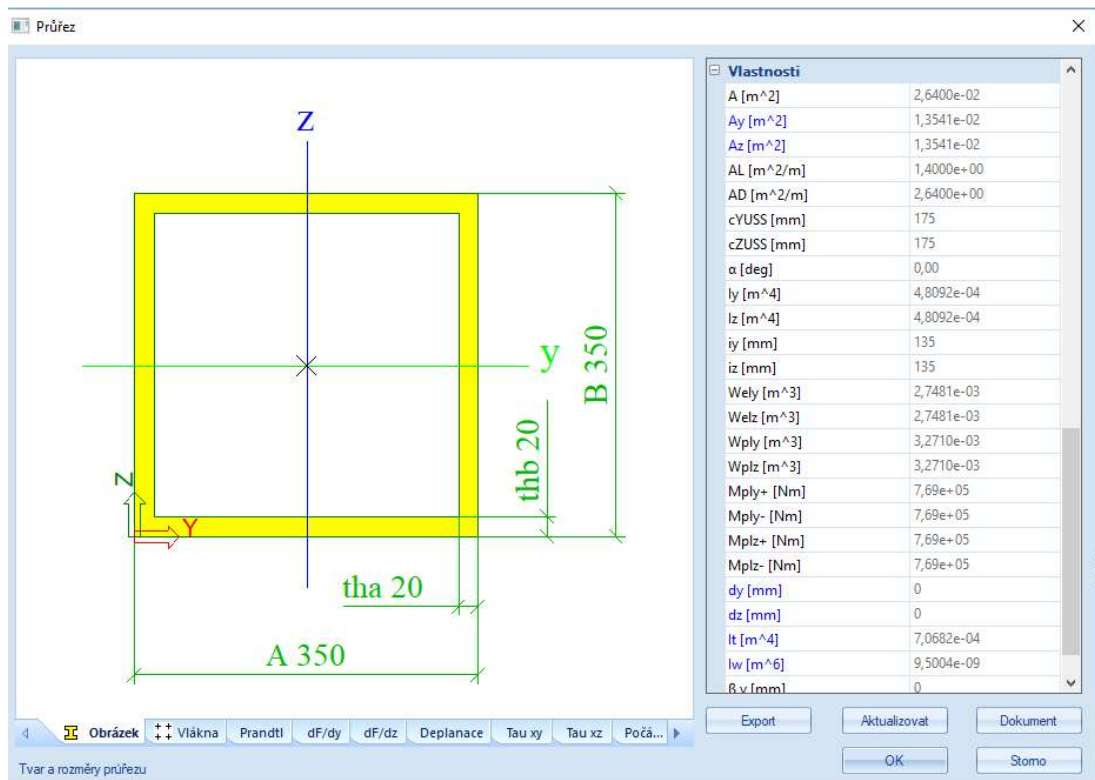


Obr. 144 Numerický model – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení

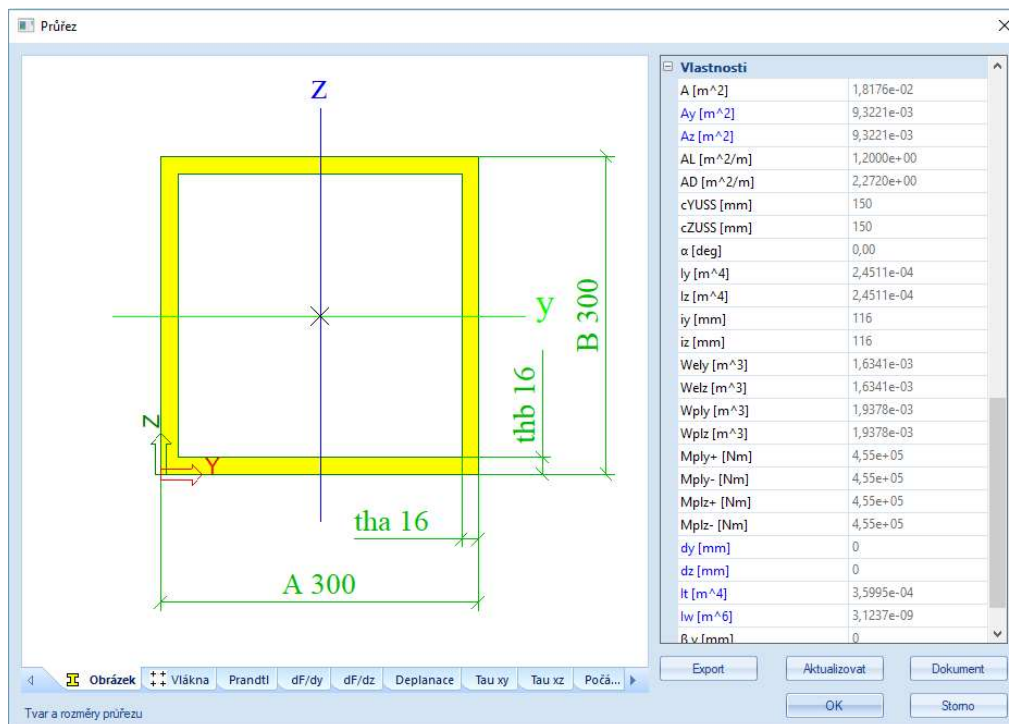
Zkusily se prvky se třemi různými čtvercovými uzavřenými průřezy a to 400x20 (Obr. 145), 350x20 (Obr. 146) a 300x16 (Obr. 147). Třída oceli stojek je S235. Toto stačilo provést na všech velikostech počátečních imperfekcí na deskostěnové části numerického modelu. Z těchto modelů se poté získaly výsledky maximálního tlakového napětí na táhle 4.



Obr. 145 Numerický model – příčný řez 400x20 – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení



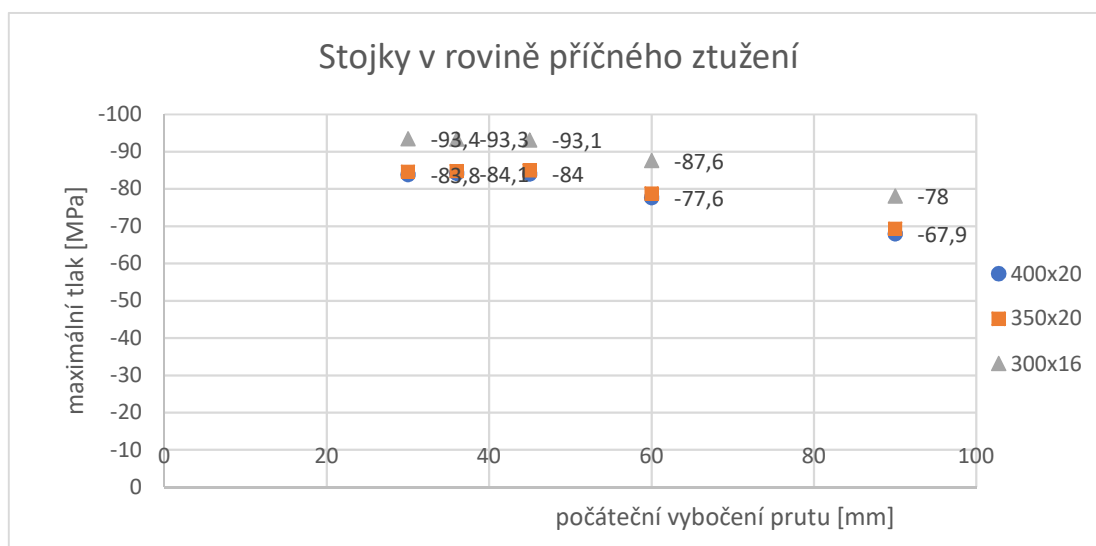
Obr. 146 Numerický model – příčný řez 350x20 – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení



Obr. 147 Numerický model – příčný řez 300x16 – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení

### 5.8.7.2 Výsledky

Z výsledků je patrné, že menší počáteční imperfekce dělá táhlo tužší, a tak si bere i větší část zatížení. Zároveň však platí, že stojky v rovinách příčného ztužení přenášejí většinu zatížení.



Obr. 148 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení stojkami v rovině příčného ztužení

V grafu (Obr. 148) vidíme, že rozdíl v maximálním tlaku v táhlu u průřezu 400x20 a 350x20 se moc neliší, rozdíl nastává až u průřezu stojky 300x16.

### 5.8.8 Shrnutí výsledků

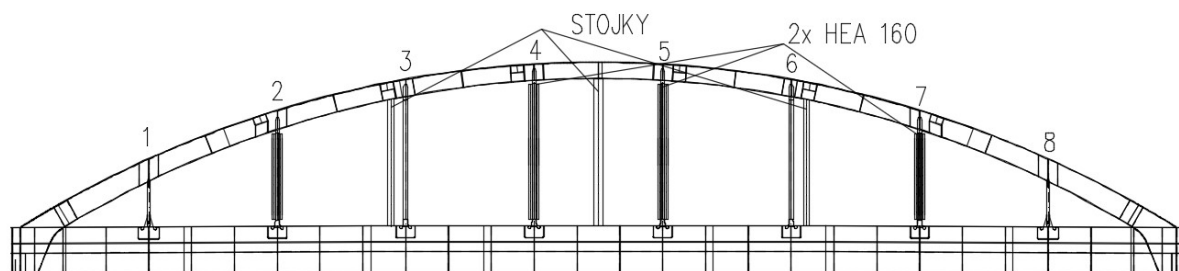
Při porovnání výsledků vidíme, že je rozdíl mezi zesilováním táhla (ztužení nosníky HEA) a zesílením oblouku (stojky u táhel nebo stojky v rovině příčného ztužení). Při ztužení táhla je výsledné napětí v táhlu citlivé na počáteční imperfekci. Naopak u ztužení stojkami se změna napětí v táhlu při různé počáteční imperfekci moc neprojevila. Získané výsledky použijeme ke komplexnějšímu a hospodárnějšímu návrhu dvou variant ztužení oblouku a táhel. Výsledná sestava se bude snažit využít výhody jednotlivých variant.

## 5.9 Kombinace variant

Nyní navrhujeme dvě efektivní varianty za pomoci předchozích odzkoušených prvků. Nejdříve získáme maximální tlakové normálové síly z Tab. 6. Poté zkusíme k jednotlivým táhlům přidělit odpovídající ztužení. Obě varianty se ještě porovnají s variantou, při které se použije systém PIŽMO.

### 5.9.1 VS1 – Varianta 1

Varianta 1 používá ke ztužení oblouku stojky v rovině příčného ztužení. Dále pak ztužuje táhla 2, 4, 5 a 7 obložením nosníky HEA 160. Takže sestavíme prutové modely ve fázi, kdy je první podpora pod stojkou uprostřed rozpětí a v místě táhla 6.



Obr. 149 Schéma – varianta 1

Vnitřní síly použijeme z Tab. 6, kde jsme zjistili největší tlakové normálové síly v táhlech během výsunu. Tyto hodnoty vynásobíme koeficientem zatížení pro vlastní tíhu 1,35 a porovnáme s únosností prvků ztužených nosníky HEA. Únosnost je stanovena pro táhlo výšky 9,0 m, takže u kratších táhel se bude jednat o konzervativnější návrh.

Tab. 30 Tabulka návrhových vnitřních sil pro táhla

		Normálová síla v táhlu $i$ [kN]							
		1	2	3	4	5	6	7	8
MINIMUM z fází		-143	-334,73	-380,58	-502,29	-490,08	-369,12	-448,83	-208,65
$N_{Ed}$	*1,35	-193,05	-451,89	-513,78	-678,09	-661,61	-498,31	-605,92	-281,68

Navrhne tedy prvky ztužení HEA na návrhové síly.

Tab. 31 Tabulka navržených ztužení táhel

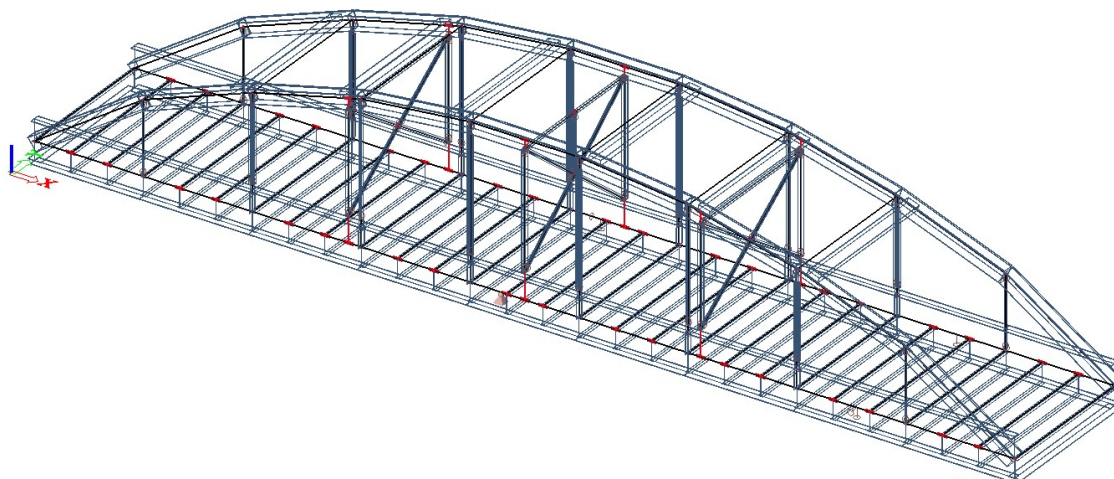
	$N_{Ed}$ [kN]	ztužení	únosnost [kN]	využití	
2	-451,89	HEA 160	-688	65,68 %	VYHOVUJE
3	-513,78	Stojka v příčném		-	
4	-678,09	HEA 160	-688	98,56 %	VYHOVUJE
5	-661,61	HEA 160	-688	96,16 %	VYHOVUJE
6	-498,31	Stojka v příčném		-	
7	-605,92	HEA 160	-688	88,07 %	VYHOVUJE

Pak nám už jen zbývá ověřit stojky uprostřed rozpětí a u táhla 6.

#### 5.9.1.1 Model

Již sestavený prutový model, který se skládá z příčného ztužení, stojek v příčném ztužení a táhly obloženými nosníky HEA 160, umístíme do dvou poloh během výsunu konstrukce. První by měla vyvolat maximální normálovou sílu ve stojce uprostřed rozpětí a druhá maximální tlak ve stojce u táhla 6.

Pro maximální tlak ve stojce uprostřed rozpětí by měla nastat rozhodující fáze při zavěšení na jeřáb, tedy na kótě vysunutí 35,74 m.

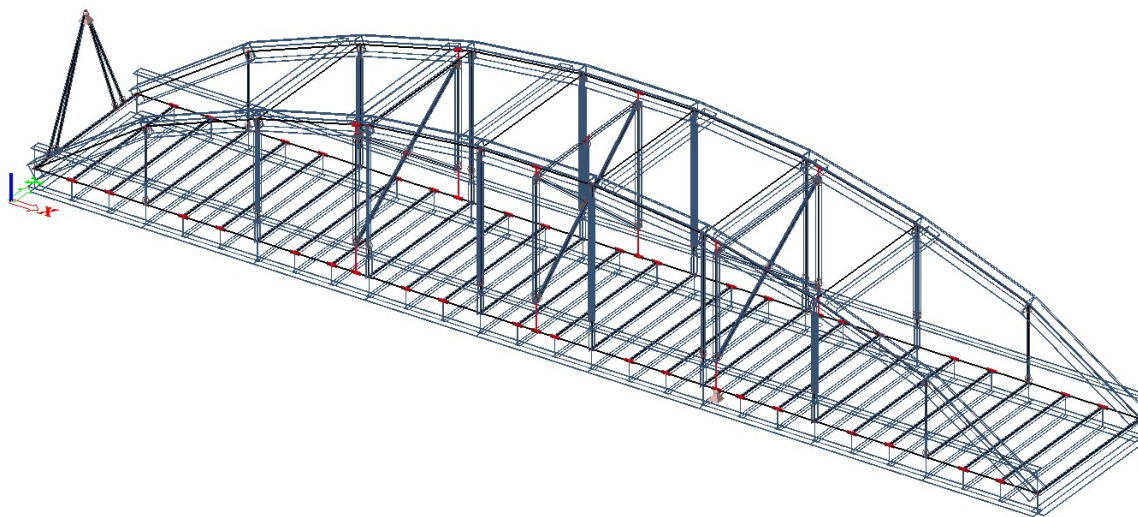




*Obr. 150 Numerický model – 35,74 m*

V druhém případě nám pak poslouží stav, kdy je už konstrukce zavěšená na jeřábu a zároveň je podpora VJ1 v rovině příčného ztužení, tedy 1,0 m od táhla 6. Most se nachází na kótě 51,48 m.

Kombinace se skládá ze dvou zatěžovacích stavů – vlastní tíha a tíha mostovky přenásobená součinitelem zatížení 1,35.

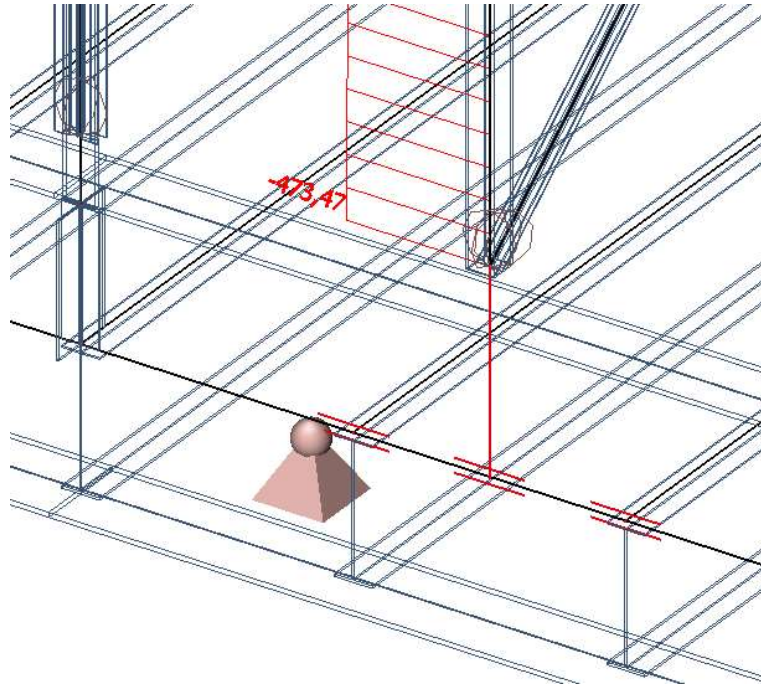


*Obr. 151 Numerický model – 51,48 m*

Provedený výpočet vnitřních sil bude lineární.

#### 5.9.1.2 Výsledky

Z modelů získáme normálové vnitřní síly ve stojkách.



Obr. 152 Numerický model – 35,74 m – normálová síla [kN] ve stojce uprostřed rozpětí  
 Návrhová vnitřní síla vyšla -473,47 kN (Obr. 152). Nyní je potřeba vypočítat vzpěrnou únosnost stojky s průřezem 300x16. Třída průřezu je 1. [15]

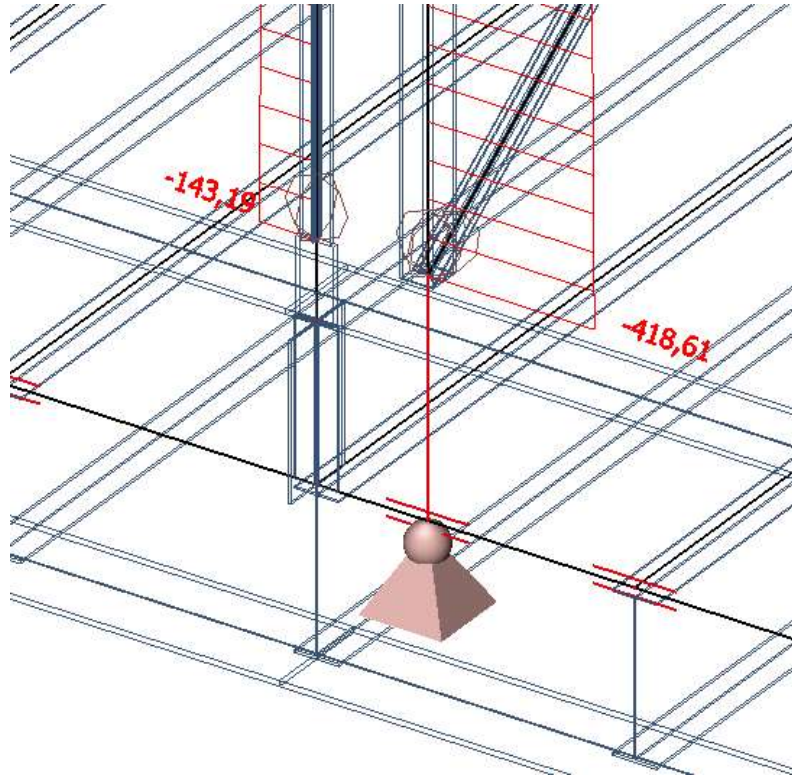
$$L_{cr} = 9,0 \text{ m}; i_y = 116 \text{ mm}; A = 18\,176 \text{ mm}^2; f_y = 235 \text{ MPa } \varepsilon = 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{X \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} \quad (27)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ kde } \lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (28)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{9000}{116} \frac{1}{93,9} = 0,826 \Rightarrow (\text{křivka } b) X = 0,708 \quad (29)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,708 \cdot 18\,176 \cdot 235}{1} = 3024 \text{ kN} > N_{Ed} = 473,47 \text{ kN VYHOVUJE} \quad (30)$$



Obr. 153 Numerický model – 51,48 m – normálová síla [kN] ve stojce vedle táhla 6

Dále posoudíme stojku u táhla 6. Návrhová normálová síla vyšla -418,61 kN (Obr. 153).  
 Spočteme vzpěrnou únosnost i tohoto táhla. Třída průřezu je 1. [15]

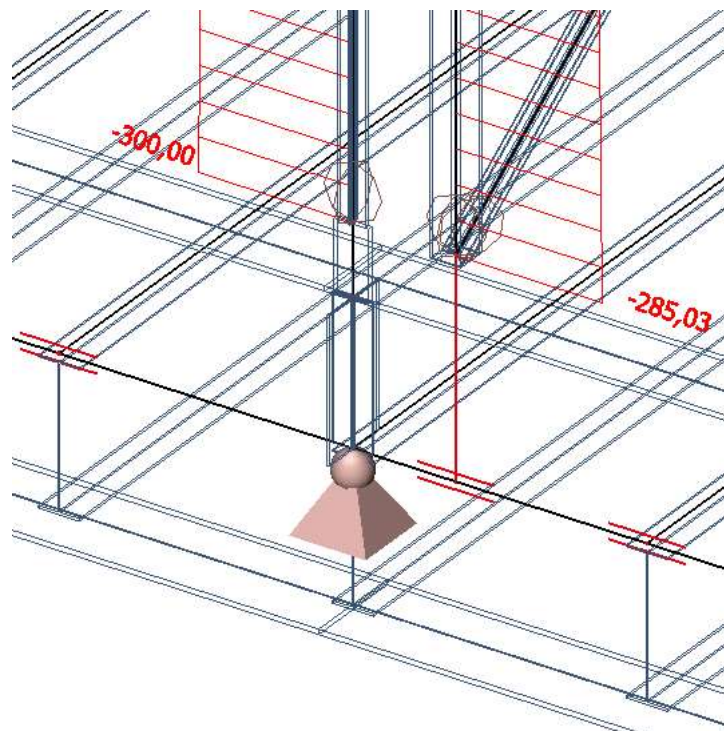
$$L_{cr} = 7,913 \text{ m}; i_y = 116 \text{ mm}; A = 18\,176 \text{ mm}^2; f_y = 235 \text{ MPa } \varepsilon = 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{X \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} \quad (31)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ kde } \lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (32)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{7\,913}{116} \frac{1}{93,9} = 0,726 \Rightarrow (\text{křivka } b) X = 0,768 \quad (33)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,768 \cdot 18\,176 \cdot 235}{1} = 3\,280 \text{ kN} > N_{Ed} = 418,61 \text{ kN VYHOVUJE} \quad (34)$$



Obr. 154 Numerický model – 50,48 m – normálová síla v táhlu 6

Nakonec ještě zkontrolujeme sílu v táhlu 6. Podpory posuneme pod táhla na kótu výsunu 50,48 m a vypočteme vnitřní síly (Obr. 154). Vidíme, že normálová síla je větší než vypočtená únosnost táhla v kap. 5.7. Proto umístíme ztužení HEA 160 i na táhlo 6.

$$688,0 \text{ kN (HEA 160 – křivka d)} > N_{Ed} = 300,0 \text{ kN VYHOVUJE} \quad (35)$$

### 5.9.1.3 Seznam prvků

Všechny použité prvky ztužující konstrukce zaneseme do tabulky a podle délky a plochy průřezu určíme celkovou hmotnost ztužující konstrukce. Abychom započítali i výztuhy a připojení použijeme objemovou tíhu oceli  $8000 \text{ kg/m}^3$ . Celkovou hmotnost pak vynásobíme cenou 65 Kč/kg. V této ceně je započítána cena za materiál, výrobu a návrh konstrukce

Tab. 32 Seznam prvků pro variantu 1

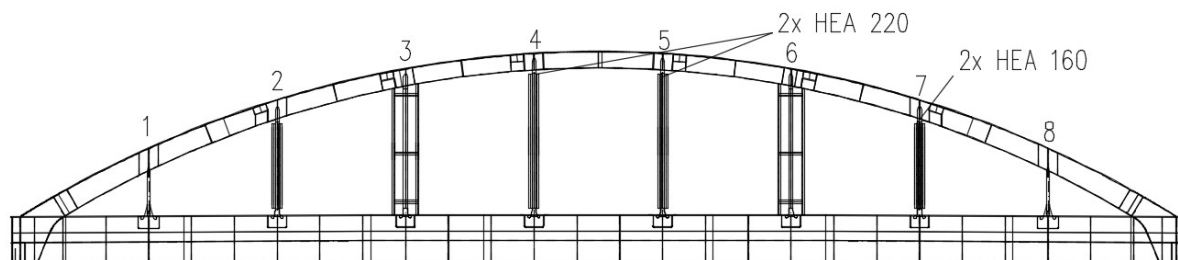
prvek	počet ks	A [mm <sup>2</sup> ]	L [m]	V [m <sup>3</sup> ]	jednotková hmotnost [t]	hmotnost [t]
HEA 160 2,7	8	3880	5,103	0,0198	0,158	1,267
HEA 160 6	4	3880	7,295	0,0283	0,226	0,906
HEA 160 4,5	8	3880	8,3	0,0322	0,258	2,061
300x16	2	18176	9,2	0,1672	1,338	2,676
300x16	4	18176	7,913	0,1438	1,151	4,602
CELKEM						11,512

Příčné ztužení					* 65 Kč/kg	748 276,19 Kč
prvek	počet ks	A [mm <sup>2</sup> ]	L [m]	V [m <sup>3</sup> ]	jednotková hmotnost [t]	hmotnost [t]
L120x12	4	5526	14,224	0,0786	0,629	2,515
L120x12	2	5526	14,978	0,0828	0,662	1,324
200x15	3	11100	11,82	0,1312	1,050	3,149
L120x12	1	5526	4,6	0,0254	0,203	0,203
CELKEM						7,192
					* 65 Kč/kg	467 464,27 Kč
CELKEM						18,704
					* 65 Kč/kg	1 215 740,46 Kč

Celkové náklady na ztužující konstrukci včetně příčného ztužení je 1 215 740,46 Kč.

### 5.9.2 VS2 – Varianta 2

Druhá varianta se skládá ze ztužení táhel nosníky HEA 160 a HEA 220. Nosníky HEA 160 ztuží táhla 2 a 7, nosníky HEA 220 pak 4 a 5. Pro ztužení oblouku se použije ztužení stojkami 260x16 u táhla 3 a 6. Tyto stojky jsou propojeny dvěma nosníky s průřezem U200 kolem táhla na koncích a uprostřed výšky stojky.



Obr. 155 Schéma – varianta 2

Stejně jako v tabulce (Tab. 30) použijeme tyto návrhové hodnoty vnitřních sil.

Tab. 33 Tabulka navržených ztužení táhel

	N <sub>Ed</sub> [kN]	ztužení	únosnost [kN]	využití	
2	-451,89	HEA 160	-688	65,68 %	VYHOVUJE
3	-513,78	Stojky u táhla		-	
4	-678,09	HEA 220	-1079	62,84 %	VYHOVUJE
5	-661,61	HEA 220	-1079	61,32 %	VYHOVUJE
6	-498,31	Stojky u táhla		-	

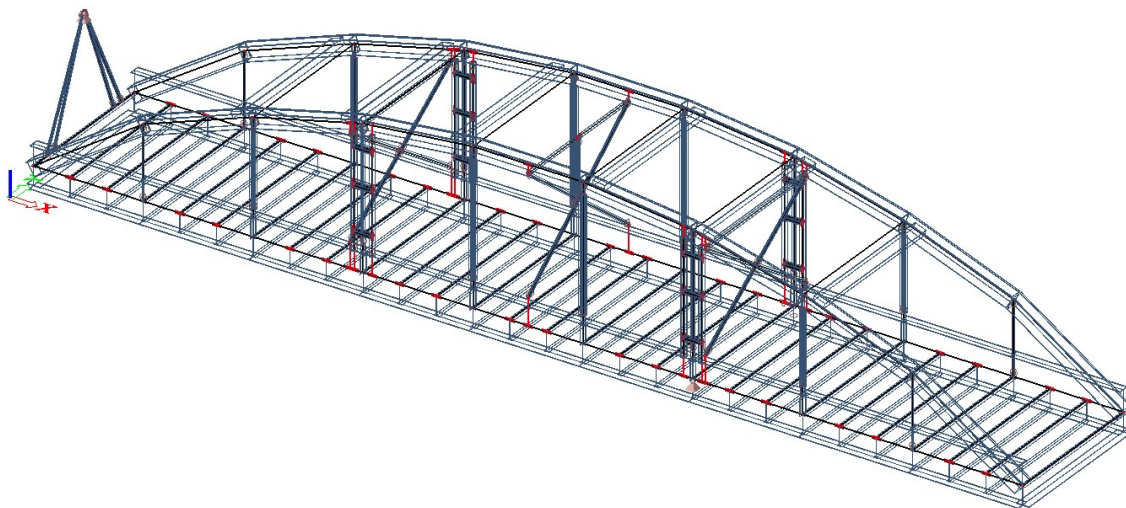


7	-605,92	HEA 160	-688	88,07 %	VYHOVUJE
---	---------	---------	------	---------	----------

Poté nám už stačí jen ověřit ztužení oblouku u táhel 3 a 6.

#### 5.9.2.1 Model

Model bude prutový. Použijeme model, při které je výsun na kótě 50,48 m.



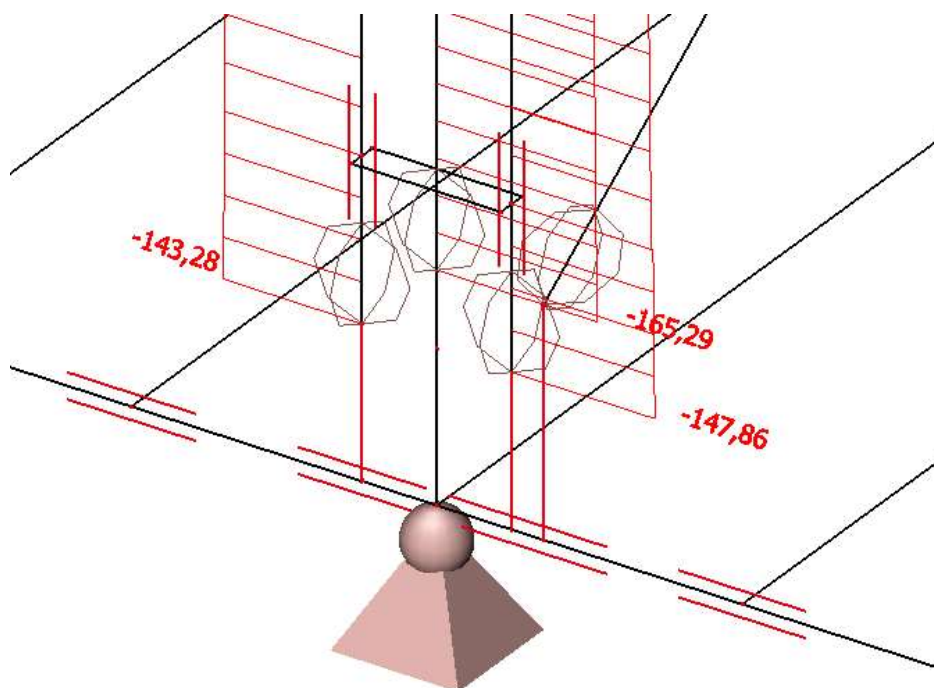
*Obr. 156 Numerický model – 50,48 m*

Provedený výpočet vnitřních sil bude lineární.

V kombinaci se nachází zatěžovací stavy – vlastní tíha a tíha mostovky přenásobené součinitelem stálého zatížení 1,35.



### 5.9.2.2 Výsledky



Obr. 157 Numerický model – 50,48 m – normálová síla v táhle a stojkách

Vnitřní síly na táhle a stojkách použijeme pro posouzení stojek a táhla. Normálová síla ve stojkách je téměř stejná, a tak posoudíme na vzpěr jen delší stojku ( $L=8,036$  m). [15] Poté ještě porovnáme sílu v táhle s dříve vypočtenou únosností táhla viz kap. 5.7.

$$L_{cr} = 8,036 \text{ m}; i_y = 100 \text{ mm}; A = 15\,616 \text{ mm}^2; f_y = 235 \text{ MPa } \varepsilon = 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{X \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}} \quad (36)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ kde } \lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (37)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{8\,036}{100} \frac{1}{93,9} = 0,856 \Rightarrow (\text{křivka } b) X = 0,689 \quad (38)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,689 \cdot 15\,616 \cdot 235}{1} = 2\,528 \text{ kN} > N_{Ed} = 143,28 \text{ kN VYHOVUJE} \quad (39)$$

Vidíme, že vzpěrná únosnost je větší než návrhová síla.

$$190,0 \text{ kN (táhlo – křivka } d) > N_{Ed} = 165,29 \text{ kN VYHOVUJE} \quad (40)$$

Síla v táhle taky nepřekročila návrhovou únosnost táhla.

### 5.9.2.3 Seznam prvků

Stejně jako u první varianty potřebujeme vědět, kolik tun oceli je potřeba k výrobě této ztužující konstrukce. Abychom započítali i výztuhy a připojení použijeme objemovou tíhu oceli 8000 kg/m<sup>3</sup>. Zjištěnou hmotnost ztužující konstrukce také vynásobíme cenou 65 Kč/kg.

Tab. 34 Seznam prvků pro variantu 2

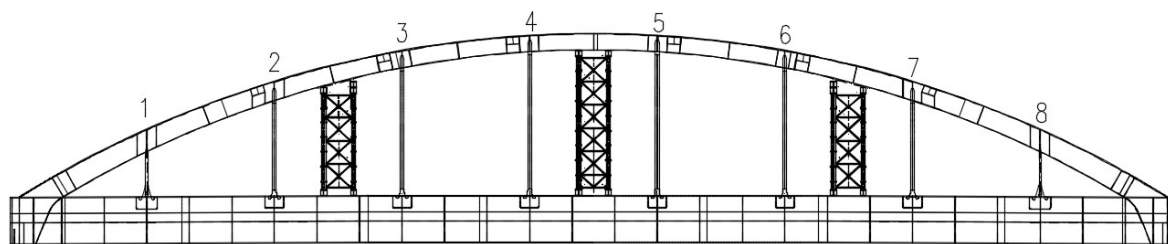
prvek	počet ks	A [mm <sup>2</sup> ]	L [m]	V [m <sup>3</sup> ]	jednotková hmotnost [t]	hmotnost [t]
HEA 160 2,7	8	3880	5,103	0,0198	0,158	1,267
HEA 220 4,5	8	6430	8,3	0,0534	0,427	3,416
260x16	4	15616	9,036	0,1411	1,129	4,515
260x16	4	15616	8,784	0,1372	1,097	4,389
U200	24	3220	1,4	0,0045	0,036	0,866
CELKEM						14,453
* 65 Kč/kg						939 457,79 Kč
Příčné ztužení						
prvek	počet ks	A [mm <sup>2</sup> ]	L [m]	V [m <sup>3</sup> ]	jednotková hmotnost [t]	hmotnost [t]
L120x12	4	5526	14,224	0,0786	0,629	2,515
L120x12	2	5526	14,978	0,0828	0,662	1,324
200x15	3	11100	11,82	0,1312	1,050	3,149
L120x12	1	5526	4,6	0,0254	0,203	0,203
CELKEM						7,192
* 65 Kč/kg						467 464,27 Kč
CELKEM						21,645
* 65 Kč/kg						1 406 922,06 Kč

Celkové náklady na ztužující konstrukci včetně příčného ztužení je 1 406 922,06 Kč.

### 5.9.3 VS3 – Referenční varianta PIŽMO

Přidáme ještě jednu variantu, ta však bude pouze k porovnání a nebude se nijak posuzovat. Potřebujeme vědět, kolik kg konstrukce PIŽMO by bylo potřeba pro ztužení mostu během výsunu. Při ceně 20 Kč/kg zjistíme rozdíl v nákladech na pořízení ztužující konstrukce.

Věž ze systému PIŽMO umístíme mezi táhla 2 a 3, 4 a 5, 6 a 7. Umístění věži PIŽMO je vidět na Obr. 158.



Obr. 158 Schéma – PIŽMO

Sestavíme seznam prvků PIŽMO. Hmotnosti jednotlivých prvků získáme z dokumentu ministerstva dopravy ČR. [17]

Tab. 35 Seznam prvků pro PIŽMO

označení součásti	název součásti	počet ks	jednotková hmotnost [kg]	hmotnost [t]
S3	sloupek 1,0 m	168	84,80	14,246
S4	sloupek 0,6 m	16	65,40	1,046
Z1	čtvercové ztužidlo	88	50,10	4,409
Z3	trojúhelníkové ztužidlo	40	35,30	1,412
Z4	přímé ztužidlo	8	23,30	0,186
R4	roštový nosník	28	243,00	6,804
T1	šroub krátký 61 mm	570	0,30	0,171
CELKEM				28,275
* 20 Kč/kg				565 500,00 Kč

Cena za navrženou konstrukci PIŽMO pro ztužení mostu je 565 500 Kč. Tato cena je nižší než u předchozích dvou variant. Pokud budeme ale řešit jen cenu za ztužení oblouku, tak první varianta je přibližně dražší o 200 000 Kč. Zároveň tento návrh PIŽMO nemusí fungovat pro tento způsob montáže, protože je mnohem těžší a můžou tak vzniknout větší tlaky v táhlech než u předchozích variant. Systém PIŽMO by se taky mohl použít jako podpora v řece pro dráhu výsunu mostu, ale s největší pravděpodobností by tato varianta vyšla draž.

## 6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vyšetřit chování ocelového obloukového mostu během výsunu s důrazem na ochranu táhel proti trvalým deformacím. Z těchto poznatků pak navrhnout podpůrnou konstrukci pro výsun a k ní vytvořit projektovou dokumentaci.

Z chování táhel a mostu při zatěžování a výsunu bylo zjištěno, že samotné ztužení táhel nebo ztužení oblouku má jiné vlastnosti. Samotné ztužení táhel zvyšuje vzpěrnou únosnost. Naopak ztužení oblouku přebírá zatížení, které by jinak šlo do táhel.

Pro ztužení táhel se použily nosníky HEA, které se přiložily k táhlu. Protože tento způsob nebyl dokonalý, tak se zkusila i taková úprava, že se nosníky protáhly až k pásnici hlavního nosníku. Problémem byla velká vodorovná posunutí v připojení táhla na plech, který byl spojen se stojinou hlavního nosníku. Tato úprava pomohla snížit vodorovnou deformaci v tomto místě.

Ztužení za pomoci přidáním stojek mělo dvě verze. Buď se stojky daly kolem táhla v páru anebo do roviny příčného ztužení. V numerických modelech tyto konstrukce splnily svůj účel a přenášely zatížení místo táhel.

Vlastnosti ztužení táhel a oblouku se nakonec použily pro vytvoření dvou variant, kde se použily oba způsoby ztužení. Hospodárnější se ukázala varianta se stojkami v rovině příčného ztužení a táhly vyztuženými nosníky HEA 160 tam, kde bylo potřeba. Výkresová dokumentace varianty VS1 je součástí diplomové práce jako příloha číslo 1 až 7.



## Literatura

- [1] The Lupu Bridge, Shanghai, China. *IABSE* [online]. 2008 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://www.iabse.org/IABSE/IABSE/association/Award\\_files/Outstanding\\_Structure\\_Award/The\\_Lupu\\_Bridge\\_\\_Shanghai\\_\\_China.aspx](http://www.iabse.org/IABSE/IABSE/association/Award_files/Outstanding_Structure_Award/The_Lupu_Bridge__Shanghai__China.aspx)
- [2] STUDNIČKA, Jiří a Tomáš ROTTER. Čtyřicet let Žďákovského mostu. *Časopis stavebnictví* [online]. 2007 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/ctyricet-let-zdakovskeho-mostu\\_N228](http://www.casopisstavebnictvi.cz/ctyricet-let-zdakovskeho-mostu_N228)
- [3] ROTTER, Tomáš. *Ocelové konstrukce 30: ocelové mosty*. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2001. 223 s. ISBN 80-01-02380-X.
- [4] Výstavba Trojského mostu v Praze. *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. 2012 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vystavba-trojskeho-mostu-v-praze/>
- [5] 6th Avenue Arch Bridge. *Modjeski and Masters* [online]. 2013 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.modjeski.com/projects/detail.aspx?6th-Ave-Arch-Bridge>
- [6] 6th Avenue Bridge. *RTD Fastracks* [online]. 2010 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://www.rtd-fastracks.com/media/uploads/wc/6th\\_Avenue\\_Bridge\\_711.pdf](http://www.rtd-fastracks.com/media/uploads/wc/6th_Avenue_Bridge_711.pdf)
- [7] 6th Ave Arch Construction Engineering – Denver, CO. *YouTube* [online]. 2012 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=K7134XLSW-4>
- [8] Welcome to Arena Island: Arena Island Bridge in facts and figures. *BristolTempleQuarter* [online]. 2015 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.bristoltemplequarter.com/welcome-to-arena-island-arena-island-bridge-in-facts-and-figures/>
- [9] Arena Island Bridge: the Launch. *YouTube* [online]. 2015 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=PSnn2\\_Dwk2A](https://www.youtube.com/watch?v=PSnn2_Dwk2A)
- [10] RYJÁČEK, Pavel. *Moderní technologie výstavby ocelových mostů: Modern technologies for the erection of steel bridges*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05502-1.
- [11] DANUBE BRIDGE APOLLO. *MCE* [online]. , 2 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: [https://www.mce-hg.com/fileadmin/user\\_upload/Flyer\\_Apollo.pdf](https://www.mce-hg.com/fileadmin/user_upload/Flyer_Apollo.pdf)
- [12] Nové ocelové mosty ve Veselí nad Lužnicí. *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. 2015 [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/nove-ocelove-mosty-ve-veseli-nad-luznici/>



- [13] PECHAL, Antonín. Projektové a inženýrské služby. Výrobní dokumentace k žel. mostu v km 36,389, Modernizace trati Ševětín – Veselí nad Lužnicí – II.část. 2014
- [14] MCE Slaný a Bilfinger Construction: Realizační dokumentace k akci 8096-SO 45-20-05- Horusice – Veselí nad Lužnicí. 2014
- [15] ČSN EN 1993-1-1. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí-: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [17] ENGLICH, Jan a Jozef MAZAČ. *Základy stavby zatímních železničních mostů z materiálu PIŽMO a ŽM*. Druhé. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor krizového řízení, 2008.
- [16] ČSN EN 1993-1-8. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí-: Část 1-8: Navrhování styčníků*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

## Seznam příloh

Příloha č. 1:	Přehled ztužujících sestav	M1:200
Příloha č. 2:	Sestava A	M1:25, M1:10
Příloha č. 3:	Sestava B	M1:25, M1:10
Příloha č. 4:	Sestava C	M1:25, M1:10
Příloha č. 5:	Sestava D	M1:25, M1:10
Příloha č. 6:	Sestava E	M1:25, M1:10
Příloha č. 7:	Příčné řezy D-D', F-F', detaily	M1:25, M1:10
Příloha č. 8:	Upravené HEA 220	M1:20, M1:10

## Seznam obrázků

Obr. 1 a) obloukový most s horní mostovkou b) obloukový most s mezilehlou mostovkou c) obloukový most s dolní mostovkou [3].....	16
Obr. 2 a) obloukový most s dolní mostovkou b) Langerův trám [3].....	16
Obr. 3 Příčné řezy obloukovým mostem s dolní mostovkou [3].....	17
Obr. 4 a) svislá táhla b) šikmá táhla c) síťový oblouk [3].....	17
Obr. 5 a) příhradové ztužení b) rámové ztužení c) uklonění oblouků [3] .....	18
Obr. 6 Trojský most – montáž [4] .....	19
Obr. 7 Montáž za pomoci kolového podvozku [7].....	20
Obr. 8 Konstrukce pro podepření mostu při přepravě [5] .....	21
Obr. 9 Nos pro výsun [9] .....	22
Obr. 10 Výsun mostu přes řeku Avon [9] .....	22
Obr. 11 Otáčení mostu Apollo [11] .....	23
Obr. 12 Schéma montáže mostu Apollo [10] .....	24
Obr. 13 Výsun mostu s podporou jeřábu – Veselí nad Lužnicí [12].....	25
Obr. 14 Schéma výsunu mostu – Veselí nad Lužnicí [14].....	26
Obr. 15 Výpočtový model v softwaru Scia Engineer.....	27
Obr. 16 Průřez hlavního nosníku ve výkresu [13].....	28
.....	28
Obr. 17 Průřez hlavního nosníku v numerickém modelu.....	28
Obr. 18 Pohled na příčník ve výkresu [13].....	29
Obr. 19 Průřez příčníku v numerickém modelu .....	29
Obr. 20 Průřez podporového příčníku v numerickém modelu .....	30
Obr. 21 Průřez oblouku v polovině a ve čtvrtině rozpětí ve výkresu .....	30
Obr. 22 Průřez oblouku v numerickém modelu .....	31
Obr. 23 Průřez příčle ve výkresu [13] .....	31
Obr. 24 Průřez příčle v numerickém modelu .....	32
Obr. 25 Průřez táhla ve výkresu [13].....	32
Obr. 26 Průřez táhla v numerickém modelu.....	33
Obr. 27 Trubkový závěs v numerickém modelu .....	34
Obr. 28 Podélný pohled na podpůrnou konstrukci obloukového mostu [14].....	34
Obr. 29 Příčný řez v polovině rozpětí a ve dvou pětinach rozpětí [14].....	35

Obr. 30 Numerický model – podpůrná konstrukce .....	35
Obr. 31 Numerický model – průřez 2xHEB340.....	36
Obr. 32 Numerický model – průřez 400x200x20 mm.....	37
Obr. 33 Numerický model –průřez 200x200x20 mm.....	37
Obr. 34 Numerický model – průřez TR300x20 mm .....	38
Obr. 35 Numerický model – průřez 2xL100/10 .....	38
Obr. 36 Zobrazení fází v softwaru Scia Engineer .....	41
Obr. 37 1. fáze výstavby – numerický model výsunu .....	41
Obr. 38 2. fáze výstavby – numerický model výsunu .....	42
Obr. 39 3. fáze výstavby – numerický model výsunu .....	42
Obr. 40 4. fáze výstavby – numerický model výsunu .....	43
Obr. 41 13. fáze výstavby – numerický model výsunu .....	43
Obr. 42 Výsledné reakce [kN] – 1.fáze .....	44
Obr. 43 Výsledné reakce [kN] – 4.fáze .....	44
Obr. 44 Výsledné reakce [kN] – 5.fáze .....	44
Obr. 45 Výsledné reakce [kN] – 10.fáze .....	45
Obr. 46 Výsledné reakce [kN] – 11.fáze .....	45
Obr. 47 Výsledné reakce [kN] – 12.fáze .....	45
Obr. 48 Výsledné reakce [kN] – 13.fáze .....	46
Obr. 49 Výsledné reakce [kN] – 14.fáze .....	46
Obr. 50 Výsledné reakce [kN] – 15.fáze .....	46
Obr. 51 Výsledné reakce [kN] – 16.fáze .....	47
Obr. 52 Výsledné reakce [kN] – 17.fáze .....	47
Obr. 53 Výsledné reakce [kN] – 18.fáze .....	47
Obr. 54 Výsledné reakce [kN] – 21.fáze .....	48
Obr. 55 Upravený numerický model výsunu.....	49
Obr. 56 Průřez reprezentující stěnu hlavního nosníku a výztuhu.....	50
Obr. 57 Očíslování táhel obloukového mostu .....	50
Obr. 58 Normálové síly [kN] v táhlech – 1.fáze – model výsunu bez ztužení.....	51
Obr. 59 Normálové síly [kN] v táhlech – 2.fáze – model výsunu bez ztužení.....	51
Obr. 60 Normálové síly [kN] v táhlech -3.fáze – model výsunu bez ztužení .....	52
Obr. 61 Normálové síly [kN] v táhlech – 4.fáze – model výsunu bez ztužení.....	52
Obr. 62 Normálové síly [kN] v táhlech – 7.fáze – model výsunu bez ztužení.....	52
Obr. 63 Normálové síly [kN] v táhlech – 8.fáze – model výsunu bez ztužení.....	53

Obr. 64 Normálové síly [kN] v táhlech – 9.fáze – model výsunu bez ztužení.....	53
Obr. 65 Normálové síly [kN] v táhlech – 10.fáze – model výsunu bez ztužení.....	53
Obr. 66 Normálové síly [kN] v táhlech – 11.fáze – model výsunu bez ztužení.....	54
Obr. 67 Normálové síly [kN] v táhlech – 12.fáze – model výsunu bez ztužení.....	54
Obr. 68 Normálové síly [kN] v táhlech – 13.fáze – model výsunu bez ztužení.....	54
Obr. 69 Normálové síly [kN] v táhlech – 14.fáze – model výsunu bez ztužení.....	55
Obr. 70 Normálové síly [kN] v táhlech – 15.fáze – model výsunu bez ztužení.....	55
Obr. 71 Normálové síly [kN] v táhlech – 19.fáze – model výsunu bez ztužení.....	55
Obr. 72 Normálové síly [kN] v táhlech – 21.fáze – model výsunu bez ztužení.....	56
Obr. 73 Normálové síly [kN] v táhlech – mezi 11. a 12. fází – model výsunu bez ztužení	57
Obr. 74 Numerický model – příčné ztužení .....	58
Obr. 75 Průřez L120x12 – příčné ztužení.....	59
Obr. 76 Průřez 200x15 – příčné ztužení.....	59
Obr. 77 Deskostěnový model – hlavní nosník a výsuvná stolice .....	61
Obr. 78 Deskostěnový model – táhlo a přípoj na hlavní nosník.....	62
Obr. 79 Deskostěnový model – oblouk .....	63
Obr. 80 Deskostěnový model – nastavení nelineárních kombinací a imperfekcí Scia Engineer .....	66
Obr. 81 Deskostěnový model – statické schéma pro výpočet únosnosti táhla .....	67
Obr. 82 Deskostěnový model – numerický model pro výpočet únosnosti táhla .....	67
Obr. 83 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – táhlo .....	68
Obr. 84 Deskostěnový model – vyšetřované body na táhlu. ....	68
Obr. 85 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/100$ – táhlo	69
Obr. 86 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/150$ – táhlo	70
Obr. 87 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu – $F = 175$ kN – $e_0/L=1/150$ – táhlo.....	71
Obr. 88 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/200$ – táhlo	72
Obr. 89 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 160 .....	73
Obr. 90 Deskostěnový model – ztužení HEA 160.....	74
Obr. 91 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 160.....	74
Obr. 92 Deskostěnový model – ztužení HEA 160.....	75
Obr. 93 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení– ztužení HEA 160 .....	75
Obr. 94 Deskostěnový model – únosnost – ztužení HEA 160 .....	76
Obr. 95 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – ztužení HEA 160.....	77

Obr. 96 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/100$ – ztužení HEA 160.....	78
Obr. 97 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/150$ – ztužení HEA 160.....	79
Obr. 98 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu – $F=700$ kN – $e_0/L=1/150$ – HEA 160.....	80
Obr. 99 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/200$ – ztužení HEA 160.....	81
Obr. 100 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 220 .....	82
Obr. 101 Deskostěnový model – ztužení HEA 220.....	82
Obr. 102 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 220.....	83
Obr. 103 Numerický model – ztužení nosníky HEA 220.....	83
Obr. 104 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení HEA 220 .....	84
Obr. 105 Graf závislosti síly na tlakovém napětí– ztužení HEA 160.....	85
Obr. 106 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/100$ – ztužení HEA 220.....	86
Obr. 107 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/150$ – ztužení HEA 220.....	87
Obr. 108 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu – $F=1100$ kN – $e_0/L=1/150$ – HEA 220.....	88
Obr. 109 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/200$ – ztužení HEA 220.....	89
Obr. 110 Ztužení táhel obložením nosníky HEA 300 .....	90
Obr. 111 Deskostěnový model – ztužení HEA 300.....	90
Obr. 112 Deskostěnový model – průřez 1D táhla – ztužení HEA 300.....	91
Obr. 113 Numerický model – ztužení nosníky HEA 300.....	91
Obr. 114 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení– ztužení HEA 300 .....	92
Obr. 115 Graf závislosti síly na tlakovém napětí – ztužení HEA 300.....	92
Obr. 116 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/100$ – ztužení HEA 300.....	93
Obr. 117 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/150$ – ztužení HEA 300.....	94
Obr. 118 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu – $F=1200$ kN – $e_0/L=1/150$ – HEA 300.....	95



Obr. 119 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodů na táhlu – $e_0/L=1/200$ – ztužení HEA 300.....	96
Obr. 120 Schéma upravení HEA 220 - pohled.....	98
Obr. 121 Numerický model upravené HEA 220 .....	99
Obr. 122 Graf závislosti síly na maximálním tlaku ve ztužení – upravené HEA 220.....	99
Obr. 123 Tabulka pro graf závislosti síly na maximálním tlaku ve ztužení –upravené HEA 220.....	100
Obr. 124 $F_x$ [kN] – hrana nosníku HEA 220 .....	100
Obr. 125 $F_y$ [kN] – hrana nosníku HEA 220 .....	100
Obr. 126 $F_z$ [kN] – hrana nosníku HEA 220 .....	101
Obr. 127 $M_y$ [kNm] – hrana nosníku HEA 220.....	101
Obr. 128 Graf závislosti síly na maximální tlaku v táhlu – upravené HEA 220 a původní ztužení HEA 220 .....	103
Obr. 129 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_0 - e_0/L=1/100$ .....	104
Obr. 130 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_2 - e_0/L=1/100$ .....	104
Obr. 131 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_0 - e_0/L=1/150$ .....	105
Obr. 132 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_2 - e_0/L=1/150$ .....	105
Obr. 133 Průběh napětí a vodorovných deformací na táhlu – $F = 1275$ kN – $e_0/L=1/150$ – upravené HEA 220 .....	106
Obr. 134 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_0 - e_0/L=1/200$ .....	107
Obr. 135 Graf závislosti síly na vodorovném posunutí bodu $u_2 - e_0/L=1/200$ .....	107
Obr. 136 Ztužení táhel přidáním stojek k táhlům.....	108
Obr. 137 Deskostěnový model – ztužení táhel stojkami .....	109
Obr. 138 Prutová část deskostěnového modelu – ztužení táhel stojkami.....	109
Obr. 139 Numerický model – ztužení stojkami u táhel.....	110
Obr. 140 Průřez U200 – ztužení stojkami u táhel.....	110
Obr. 141 Průřez 300x16 – ztužení stojkami u táhel .....	111
Obr. 142 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení stojkami.....	111
Obr. 143 Schéma – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení .....	112
Obr. 144 Numerický model – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení .....	112
Obr. 145 Numerický model – příčný řez 400x20– ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení .....	113
Obr. 146 Numerický model – příčný řez 350x20 – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení .....	113

Obr. 147 Numerický model – příčný řez 300x16 – ztužení táhel stojkami v rovině příčného ztužení .....	114
Obr. 148 Graf závislosti napětí na počátečním vybočení – ztužení stojkami v rovině příčného ztužení .....	114
Obr. 149 Schéma – varianta 1 .....	115
Obr. 150 Numerický model – 35,74 m .....	117
Obr. 151 Numerický model – 51,48 m .....	117
Obr. 152 Numerický model – 35,74 m – normálová síla [kN] ve stojce uprostřed rozpětí .....	118
Obr. 153 Numerický model – 51,48 m – normálová síla [kN] ve stojce vedle táhla 6 .....	119
Obr. 154 Numerický model – 50,48 m – normálová síla v táhlu 6 .....	120
Obr. 155 Schéma – varianta 2 .....	121
Obr. 156 Numerický model – 50,48 m .....	122
Obr. 157 Numerický model – 50,48 m – normálová síla v táhlu a stojkách .....	123
Obr. 158 Schéma – PIŽMO .....	125

## Seznam tabulek

Tab. 1 Zatížení jeřábu a výsuvných jednotek [14] .....	39
Tab. 2 Průběh zatížení jeřábu [14].....	39
Tab. 3 Tabulka podfází – manipulace s podpůrnou konstrukcí během výstavby [14].....	40
Tab. 4 Fáze numerického modelu včetně délky vysunutí a odpovídající fáze ve výkresu..	40
Tab. 5 Výsledky v souhrnné tabulce .....	48
Tab. 6 Normálové síly [kN] v táhlech – přehled – model výsunu bez ztužení .....	56
Tab. 7 Výpočet kritické síly v táhlech.....	57
Tab. 8 Návrhové hodnoty imperfekcí ve tvaru počátečního prohnutí $e_0 / L$ [15].....	64
Tab. 9 Počáteční posunutí jednotlivých bodů na táhlu pro všechny hodnoty imperfekcí [mm] .....	65
Tab. 10 Tabulka – $e_0/L=1/100$ – táhlo .....	69
Tab. 11 Tabulka – $e_0/L=1/150$ – táhlo .....	69
Tab. 12 Tabulka – $e_0/L=1/200$ – táhlo .....	71
Tab. 13 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – táhlo .....	72
Tab. 14 Tabulka – $e_0/L=1/100$ – HEA 160.....	77
Tab. 15 Tabulka – $e_0/L=1/150$ – HEA 160.....	78
Tab. 16 Tabulka – $e_0/L=1/200$ – HEA 160.....	80
Tab. 17 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 160 .....	81
Tab. 18 Tabulka – $e_0/L=1/100$ – HEA 220 .....	85
Tab. 19 Tabulka – $e_0/L=1/150$ – HEA 220.....	86
Tab. 20 Tabulka – $e_0/L=1/200$ – HEA 220 .....	88
Tab. 21 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 220 .....	89
Tab. 22 Tabulka – $e_0/L=1/100$ – HEA 300.....	93
Tab. 23 Tabulka – $e_0/L=1/150$ – HEA 300.....	93
Tab. 24 Tabulka – $e_0/L=1/200$ – táhlo .....	95
Tab. 25 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – HEA 300 .....	96
Tab. 26 Tabulka únosnosti (max. tlak 250 MPa) – shrnutí .....	97
Tab. 27 Tabulka $e_0/L=100$ – upravené HEA 220 .....	104
Tab. 28 Tabulka $e_0/L=1/150$ –upravené HEA 220.....	105
Tab. 29 Tabulka $e_0/L=1/200$ –upravené HEA 220 .....	106
Tab. 30 Tabulka návrhových vnitřních sil pro táhla.....	116

Tab. 31 Tabulka navržených ztužení táhel .....	116
Tab. 32 Seznam prvků pro variantu 1.....	120
Tab. 33 Tabulka navržených ztužení táhel .....	121
Tab. 34 Seznam prvků pro variantu 2.....	124
Tab. 35 Seznam prvků pro PIŽMO .....	125