

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra mechaniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

16.06.2008

Michala Sobotková

# **Analýza konstrukce navržené pomocí principů digitální architektury**

**(Computer-aided assessment of a structure designed according to digital architecture paradigm)**

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá analýzou konstrukce navržené podle principů digitální architektury. Analýza byla provedena pomocí softwaru pracujícím na základě metody konečných prvků – MKP. Byl zjišťován charakter chování segmentu konstrukce při působení různých typů statických zatížení – zatížení vlastní tíhou, zatížení sněhem a větrem, ostatní stálé a užitné zatížení. Na základě výpočtu pak byla stanovena konstrukční opatření potřebná pro realizovatelnost dané konstrukce.

## **Abstract**

This thesis deals with a computer-aided assessment of a structure designed according to the digital architecture paradigm. The analysis was carried out by a software based on the Finite Element Method – FEM. The characteristic response of a segment of the structure to various external actions such as self weight, snow and wind pressure and other permanent and variable loads was determined. On the basis of the analysis results, the construction measures needed to ensure buildability of the structure were proposed.

# Obsah

Obsah .....	03
1 Úvod .....	04
1.1 Vývoj digitální architektury .....	04
1.2 Pojem digitální architektury .....	04
1.3 Význam digitální architektury pro praxi .....	06
2 Krátká charakteristika architektonického řešení .....	07
2.1 Představa architekta o dané konstrukci .....	07
2.2 Generování konstrukce .....	07
3 Detailní numerický model .....	09
3.1 Popis systému .....	09
3.2 Import konstrukce do výpočetního softwaru .....	09
3.3 Model konstrukce .....	10
4 Analýza segmentu konstrukce.....	11
4.1 Zatížení vlastní tíhou .....	11
4.1.1 Zjednodušený prutový model .....	12
4.1.2 Model s plochami .....	21
4.2 Zatížení větrem .....	25
4.3 Zatížení sněhem .....	28
4.4 Ostatní stálé a užitné zatížení .....	29
5 Závěr .....	32
6 Literatura (Bibliography) .....	33

# 1. ÚVOD

## 1.1 VÝVOJ DIGITÁLNÍ ARCHITEKTURY

Výzkum a vývoj v architektuře získaly s rozvojem informačních technologií výkonnější nástroje, nové cíle a hranice.

Schopnost vytvářet a ovládat složitější geometrie, především v kombinaci s počítačovými nástroji pro analýzu staveb a jejich prostředí a nástroji umožňujícími navrhování stavebních prvků přímo pro výrobu (computer aided manufacturing – CAM), vedla ke vzniku nové generace budov a návrhů, běžně označovaných jako digitální architektura.

Rychlost rozvoje digitální architektury jde ruku v ruce s rychlostí rozvoje digitálních technologií. Experimenty s možností jejich využití posouvají hranice „nemožného“ v architektuře. Možná závažnější je ale jejich dopad na formální stránku architektury, kde se slovo „digitální“ stalo synonymem pro architekturu volných forem a oblých tvarů.

## 1.2 POJEM DIGITÁLNÍ ARCHITEKTURY

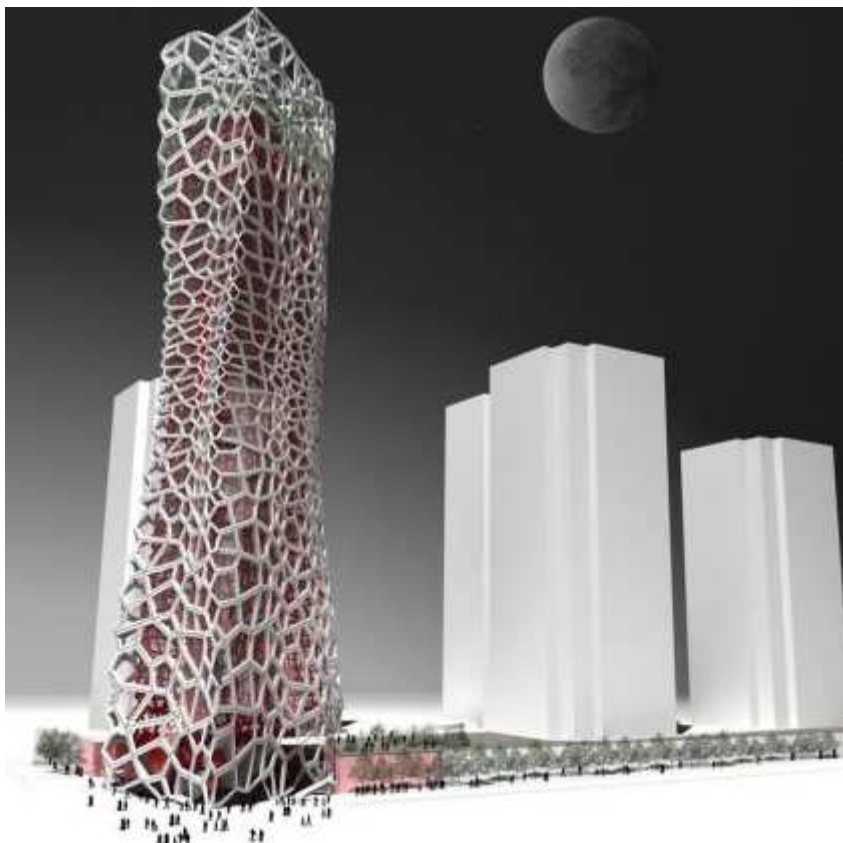
Pojem digitální architektura zahrnuje následující oblasti: generativní postupy projektování společně s parametrickým návrhem, CAD/CAM technologie od výroby modelu po výrobu jednotlivých stavebních prvků.

Navrhují se domy ve tvarech Béziérových ploch, NURBS, v čase se měnících struktur a dalších vymoženostech pocházejících z oblasti počítačové grafiky. Postupy, které vznikly v leteckém a automobilovém průmyslu při tvarování karosérií, našly uplatnění i v architektuře. Flexibilní membrány obalují oblé tvary nových domů, beton je odléván do libovolných plastových forem, doba plochého skla je ta tam.

Stěžejní lodí digitálního stavění je Guggenheimovo muzeum v Bilbao, jehož autorem je Američan Frank Gehry. Již dnes se ale objevují všude ve světě další ukázky tohoto stavebního stylu. Mladším představitelem digitálního stavění je pak návrh výškové budovy „Torre Absolute“ od mexického architekta Michela Rojkinda.



**Obr. 1.1 Guggenheimovo muzeum v Bilbao – Frank Gehry**



**Obr. 1.2 Torre Absolute – Michel Rojkind**

## 1.3 VÝZNAM DIGITÁLNÍ ARCHITEKTURY PRO PRAXI

Architekti, kteří se zařadili mezi „digitální avantgardu“, využívají dostupné technologie způsobem, který jim otevřel nový pohled na proces navrhování s přímou návazností na proces výroby.

Vzhledem k neustálému vývoji informačních technologií by se dalo předpokládat, že se tento způsob navrhování konstrukcí bude moci v budoucnu více prosadit a umožnit tak lepší spolupráci architekta s ostatními profesemi, především pak se statikem a konstruktérem.

Prozatím brání masivnějšímu průniku nových technologií do širšího stavebního povědomí jejich cena. Nezanedbatelnou roli hraje i jejich obtížnější využitelnost, a proto se „elektronická“ nebo „informační“ nebo „digitální“ architektura uplatňuje spíše jako doplněk konvenčních budov, při stavbě muzeí, mediátek, výstavních pavilonů a dalších prestižních zakázkách.

## 2. KRÁTKÁ CHARAKTERISTIKA ARCHITEKTONICKÉHO ŘEŠENÍ

### 2.1 PŘEDSTAVA ARCHITEKTA O DANÉ KONSTRUKCI

Tématem diplomové práce studenta fakulty architektury Ing. Arch. Lukáše Kurilly bylo vytvoření variabilní generované konstrukce, která by byla nositelem sofistikovaného LED systému, obohacujícího konstrukci o interaktivní prvek.

Stávající železniční stanice se nachází v severozápadní části města Spišská Nová Ves. Železnice Slovenské Republiky upravují železniční trať pro zvýšení rychlosti a současně se investuje do modernizace železničních stanic. Most pro pěší by byl návrhem propojení železniční stanice s obytnou zónou ležící na opačné straně železniční tratě.

Při tvoření tvaru konstrukce se Lukáš Kurilla inspiroval v přírodě, a to kroužkovci. Latinský název pro tento kmen je annelida, odkud je odvozené i pracovní pojmenování dané konstrukce. Kroužkovci jsou živočichové s vnější i vnitřní segmentací. Pod jejich pokožkou je svalový vak, tvořený vrstvou okružní a podlouhlé svaloviny, která jim umožňuje pohyb.

Podle představy architekta by segment konstrukce představoval segment annelidy. Ten by byl obdobně jako svalové vaky flexibilní a dimenzovaný na potřebnou únosnost. Annelida byla inspirací, která architektovi pomohla domyslet tvar a funkčnost konstrukce.

### 2.2 GENEROVÁNÍ KONSTRUKCE

Skript konstrukce se začal rodit v prostředí RhinoScriptu. Do čtveřice vodicích linek vepisoval architekt tvarosloví, které vycházelo z předešlých analýz a tvarových možností.

Konstrukce se dle tohoto skriptu generuje pomocí čtyř libovolných vodicích linek (centrální, dvou bočních a vrchní), které slouží jako limity generování prvků. Parametricky se definuje počet členění a tloušťka konstrukce.



Do budoucna poté architekt uvažuje také o parametrickém generování vodicích linek, které by zabezpečovalo kontrolu nad směrem generování a parametry jako objem prostoru, podchodná výška a sklon rampy.

Jako prvek konstrukce byla použita rovinná trojúhelníková plocha, která je na straně přepony vykrojená do půlobloubku. Spojením čtyř prvků vznikl zborcený čtyřúhelník. Tři zborcené čtyřúhelníky pak tvoří segment konstrukce. Ty do sebe zapadají a navzájem se zavětrují. Takto koncipované prvky mohou vytvářet libovolně dlouhou konstrukci.

K parametrizaci bylo využito informační technologie. Pro kontrolu parametrů prvků zvolil autor vodicí linky, které vytváří limit výšky, šířky a definují tvar výsledné konstrukce. Jejich úpravou se upravuje i konstrukce.

Skript kromě řazení konstrukce vodicími linkami obsahuje další parametry. Základním parametrem je počet elementů v konstrukci. Mezi další patří gradace hustoty řazení prvků, určení průměru tyče prvku v závislosti na poloze v konstrukci anebo posun horizontálních styčnickových bodů konstrukce ve vertikálním směru.



**Obr. 2.1** Začlenění konstrukce do prostoru železniční tratě

## 3. DETAILNÍ NUMERICKÝ MODEL

### 3.1 POPIS SYSTÉMU

Konstrukce se skládá z prutových prvků trubkového průřezu. Čtyři rovné a čtyři ohnuté pruty pak tvoří zborcený čtyřúhelník. Systém těchto čtyřúhelníků vytváří segment konstrukce. Styčníky, kde se sbíhají vždy čtyři pruty, jsou doplněny soustavou rovinných ploch ve tvaru trojúhelníka. Ocelové plechy budou přivařeny z vnější i vnitřní strany čtyřúhelníka a doplněny výztuhami. Z architektonických důvodů vytváří tyto plechy spolu s ohnutým prutem na straně přepony linii oblouku.

Hlavní nosnou funkci přebírá systém nosníků, výztuhy ve styčnicích pak celou konstrukci ztužují, především také zvyšují vzpěrnou únosnost ocelových prutů.

### 3.2 IMPORT KONSTRUKCE DO VÝPOČETNÍHO SOFTWARE

Konstrukce byla vytvořena parametricky v programu RhinoScript. Základním parametrem je počet elementů v konstrukci, mezi další pak patří gradace hustoty řazení prvků, určení průměru tyče prvku v závislosti na poloze v konstrukci, anebo posun horizontálních styčnickových bodů konstrukce ve vertikálním směru. Parametry se kontrolují pomocí vodicích linek.

Výstupem z tohoto programu byly souřadnice jednotlivých uzlů a definice linií a ploch uložené v souboru formátu IGES. Takto bylo možné využít spolupráce s výpočetním programem a výrazně tím zjednodušit práci s modelem konstrukce.

Pro modelování byl zvolen výpočetní program RFEM firmy Ing.- Software Dlubal, který umožňuje import pozic příslušného formátu. Ze souřadnic z programu RhinoScript byly vytvořeny uzly modelu, dále se přiřadily informace o určení linií a ploch a jejich typu.

Importovaný model obsahoval soustavu uzlů, kterými byly definovány linie. Vyskytoval se zde pouze jeden typ, a to linie přímá určená dvěma uzlovými body. Zakřivené

pruty konstrukce byly importovány jako spojení několika přímých částí. Hustota dělení byla pro výsledný tvar dostatečná. Model obsahoval vždy systém několika linií, které se nacházely v jedné rovině a ohraničovaly tak rovinné trojúhelníkové plochy konstantní tloušťky se zaoblením na straně přepony.

### 3.3 MODEL KONSTRUKCE

Pro další práci s takto importovanou konstrukcí bylo potřeba jednotlivým prvkům přiřadit průřezy a materiály.

Pro jednoduchost byly všechny tyčové pruty zvoleny jednotného trubkového průřezu TR 152/12,5 – oceli S355, jako typ prutu byl zvolen nosník s vetknutými konci do styčníku.

Plošné prvky byly modelovány z ocelového plechu S355 konstantní tloušťky 10 mm. Plechy se nacházejí na vnější a vnitřní straně zborceného čtyřstěnu, do modelu však bylo zavedeno určité zjednodušení. Plocha byla modelována jako jedna v tloušťce rovnající se součtu tloušťky vnitřního a vnějšího plechu, tj. tloušťky 20 mm. Toto zjednodušení je na straně bezpečnosti, neboť tak snižujeme příznivý vliv ohybové tuhosti distancovaných plechů propojených výztuhami. Většinu ohybového namáhání tak ponесou ocelové nosníky.

Jednotlivé čtyřstěny byly importovány samostatně, proto bylo nutné vytvořit mezi nimi statickou vazbu. Pro naše účely nejlépe vyhovovala vazba typu „vetknutí – vetknutí“. Jedná se o typ spojení prvků, které zajišťuje shodné posuny a natočení, což vyhovuje svařovanému spoji, který by byl vytvořen prostřednictvím speciálně tvarovaného plechu vloženého mezi oba pruty. Vzdálenost jednotlivých vazeb se pohybovala od 0,3 - 0,5 m. Toto rozmezí bylo dáno tím že se dílčí uzly vazeb vytvářely rovnoměrným dělením prutů různých délek, nikoli dělením po konstantních vzdálenostech.

Výpočet programu RFEM je na principu metody konečných prvků – MKP, z tohoto důvodu je volená vzdálenost vazeb z pohledu zahuštění sítě prvků a k tomu ekvivalentní doby výpočtu zvolená přiměřeně.

## 4. ANALÝZA SEGMENTU KONSTRUKCE

Analýza segmentu konstrukce byla prováděna s ohledem na chování při statickém zatížení, tj. zatížení vlastní tíhou, stálým a užitným zatížením, zatížení sněhem a větrem. Na základě chování segmentu vůči těmto způsobům namáhání pak bylo možno určit opatření důležitá k realizovatelnosti celé konstrukce.

Vybraný segment se skládá ze sedmi prostorových celků, které jsou základní skladebnou jednotkou. Každý takovýto prostorový celek je dále složen ze tří zborcených čtyřúhelníků, které jsou vytvořené soustavou čtyř lineárních a čtyř zaoblených prutů. V rozích čtyřúhelníka je realizováno ztužení prostřednictvím ocelových plechů, přivařených na jeho vnější i vnitřní straně. Distance mezi plechy je pak zajištěna soustavou výztuh, jejichž řešení není předmětem této práce.

Model konstrukce vychází z hlavního statického působení prutových prvků, dané plochy zde mají potom ztužující charakter. Ocelové pruty jsou modelovány jako nosníky vetknuté do styčnic, tento model vychází z předpokladu svařovaných spojů, které jsou pro atypické konstrukce běžnější.

### 4.1 ZATÍŽENÍ VLASTNÍ TÍHOU

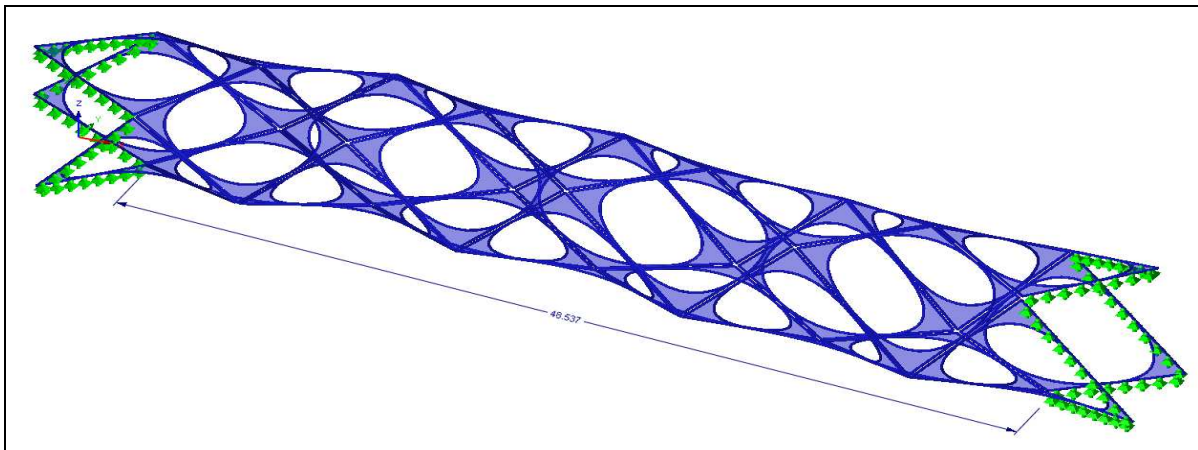
Pro analýzu byl vybrán segment konstrukce celkové délky 48,54m. Model obsahuje prutové prvky lineární a zaoblené, jejich průřez byl volen pro jednoduchost stejný TR 152,4/12,5. Tloušťka trubky je odvozena od zaoblených prutů, kde by z důvodu ohýbání menší tloušťky než 10 mm nebyly příliš vhodné.

Styčnice prutů jsou vyztuženy plechy tl. 10 mm navařenými z obou stran trubek. Toto oboustranné spojení plechů s trubkami zajišťuje spolupůsobení prutu a plechu ve formě vetknutí.

Z těchto prvků jsou tvořeny jednotlivé čtyřúhelníky konstrukce. Ty jsou v modelu vzájemně prostřednictvím sousedních prutů spojeny vazbou vetknutí – vetknutí, která představuje svařovaný spoj pomocí speciálně tvarovaného plechu vloženého do prostoru mezi

oběma čtyřúhelníky. Vzdálenost vazeb se pohybuje mezi 0,3 – 0,5 m podle délky každého prutu. Vazby byly vytvářeny v místech rovnoměrného dělení prutů. Z hlediska výpočtu pomocí MKP je tato vzdálenost dostačující.

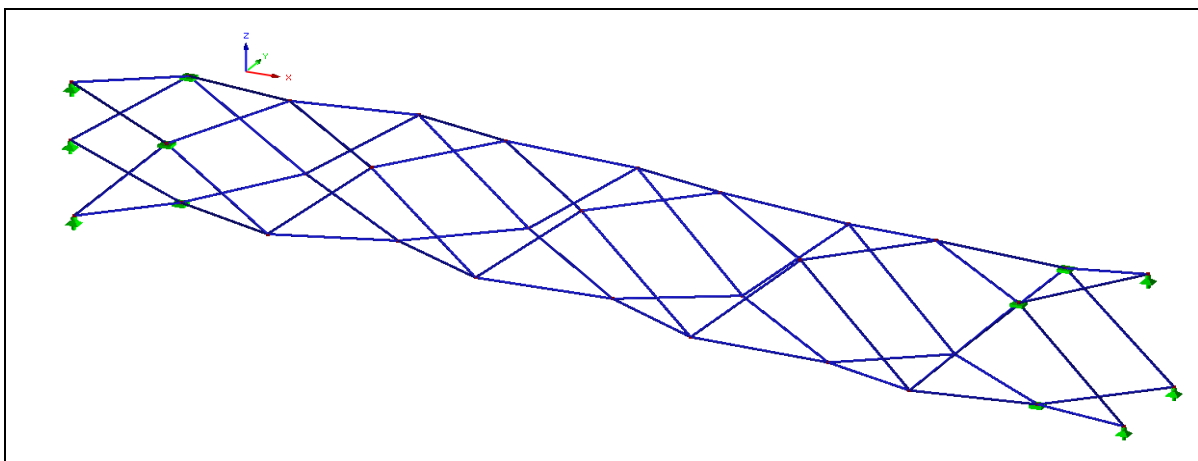
Vybraný segment konstrukce představuje délku zkoumaného pole, které je v modelu vetknuto prostřednictvím liniových podpor do polí sousedních – viz obrázek 4.1.



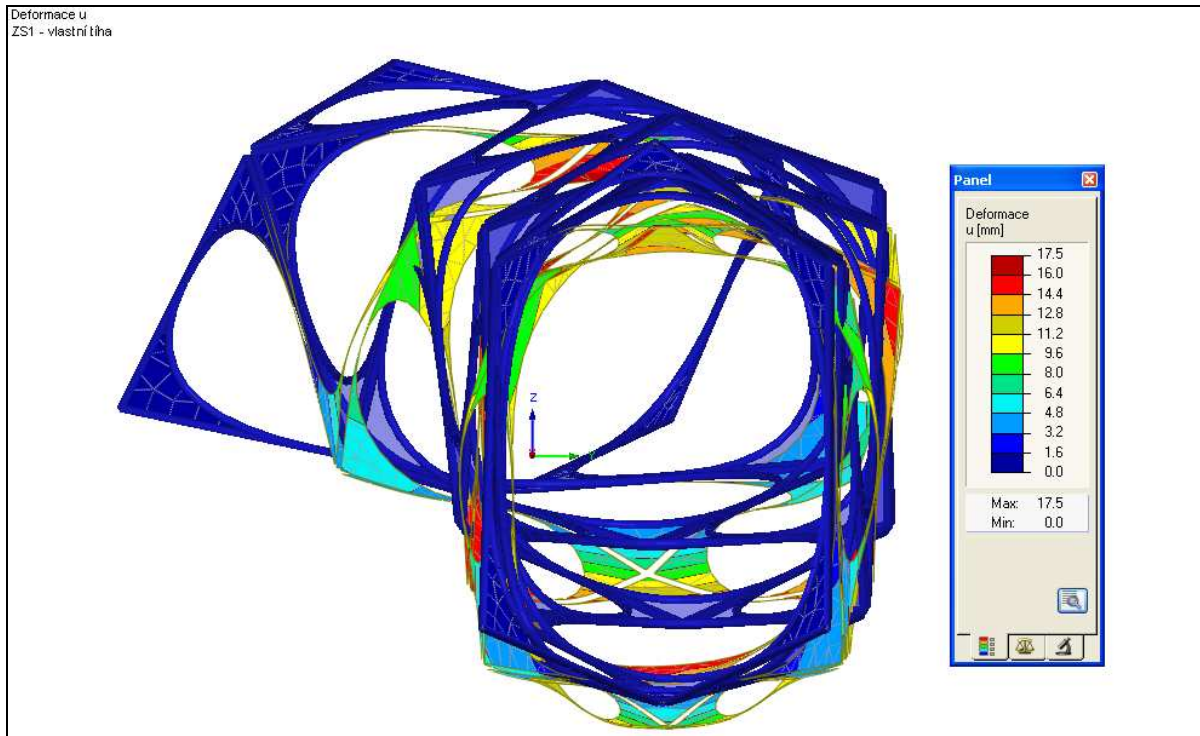
Obr. 4.1 Model segmentu v prostředí programu RFEM

#### 4.1.1 Zjednodušený prutový model

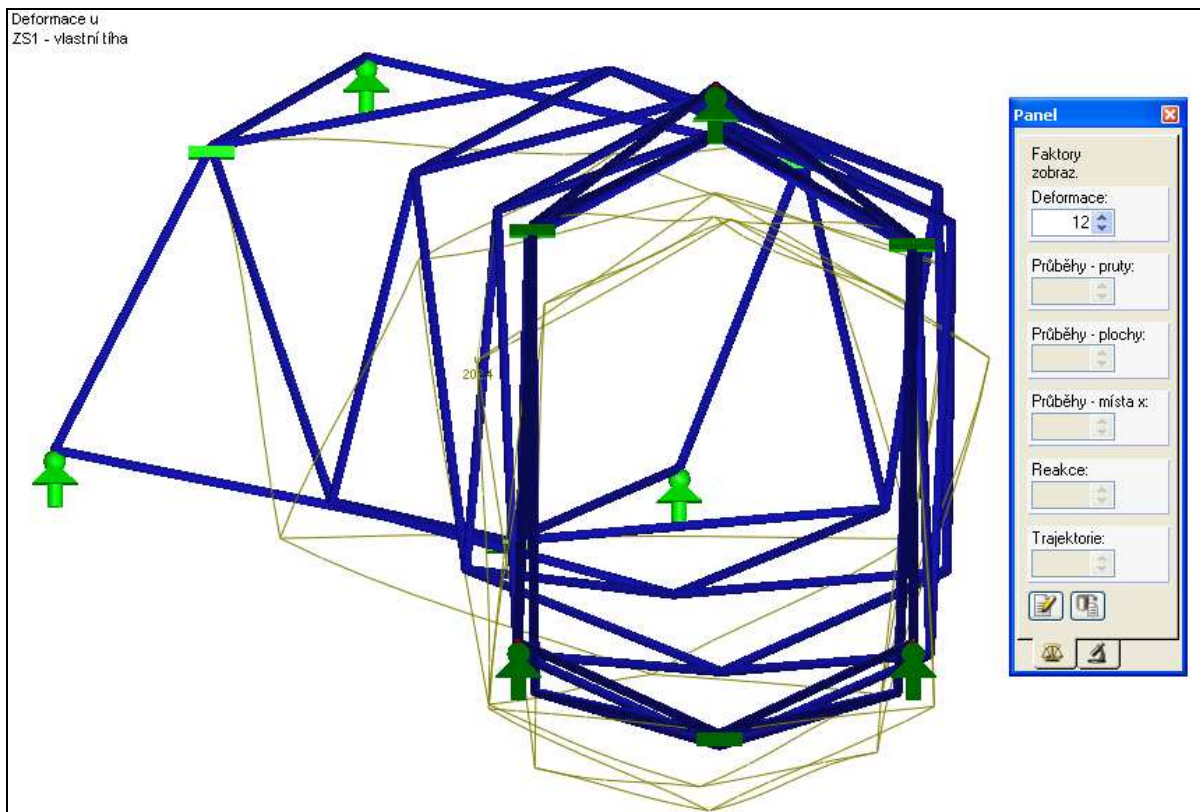
Při zatížení vlastní tíhou konstrukce se v některých místech negativně projevil imperfektní tvar konstrukce. Pro detailnější představu byl proto model zjednodušen na prutový.



Obr. 4.2 Zjednodušený prutový model segmentu



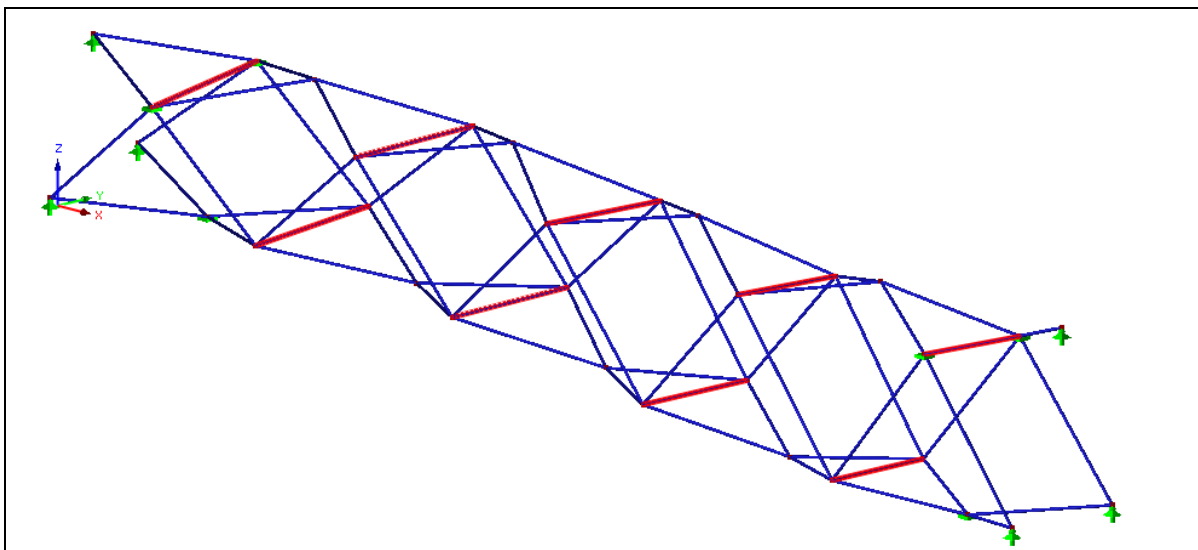
Obr. 4.3 Tvar deformace u modelu s plochami ve styčnicích



Obr. 4.4 Tvar deformace u náhradního prutového modelu

Z obrázku 4.4 je patrný nepříznivý charakter deformace příčného průřezu náhradního prutového modelu, který je v případě modelu s plochami ve styčnicích lehce eliminován, viz obr. 4.3.

Z výše popsaných důvodů byla konstrukce doplněna o další pruty, které zajišťují právě tvar příčného průřezu konstrukce. Jejich rozmístění bylo zvoleno tak, aby byl zachován vnější tvar konstrukce a aby nebyl příliš omezen vnitřní prostor, poloha je patrná z obrázku 4.5.

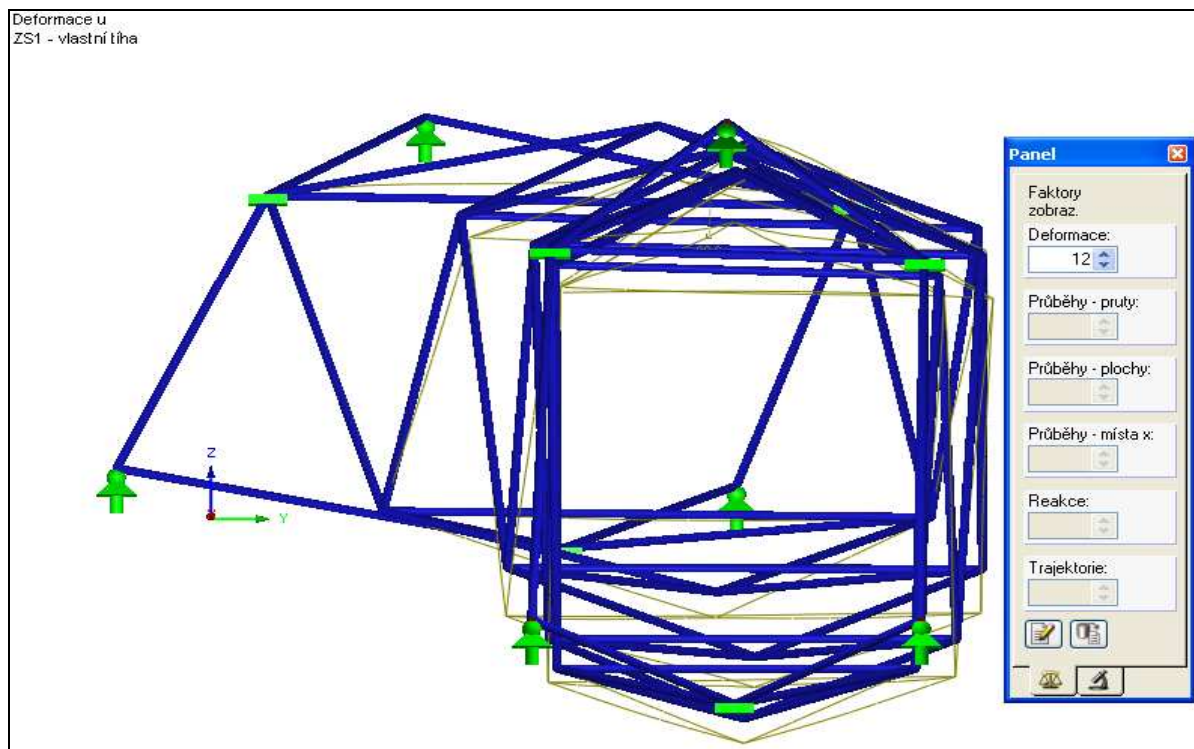


**Obr. 4.5** Rozmístění doplňujících příčných nosníků - červeně

Z porovnání deformací zjednodušených prutových konstrukcí na obrázcích 4.4 a 4.6 je patrné, že konstrukce s vloženými příčnými nosníky je vůči imperfektnímu chování mnohem odolnější.

Tvar deformace je na obou obrázcích zobrazen ve stejném měřítku, z toho plyne že model s vloženými pruty se deformuje výrazně méně a tvar příčného průřezu konstrukce zůstává i v deformovaném stavu zachován.

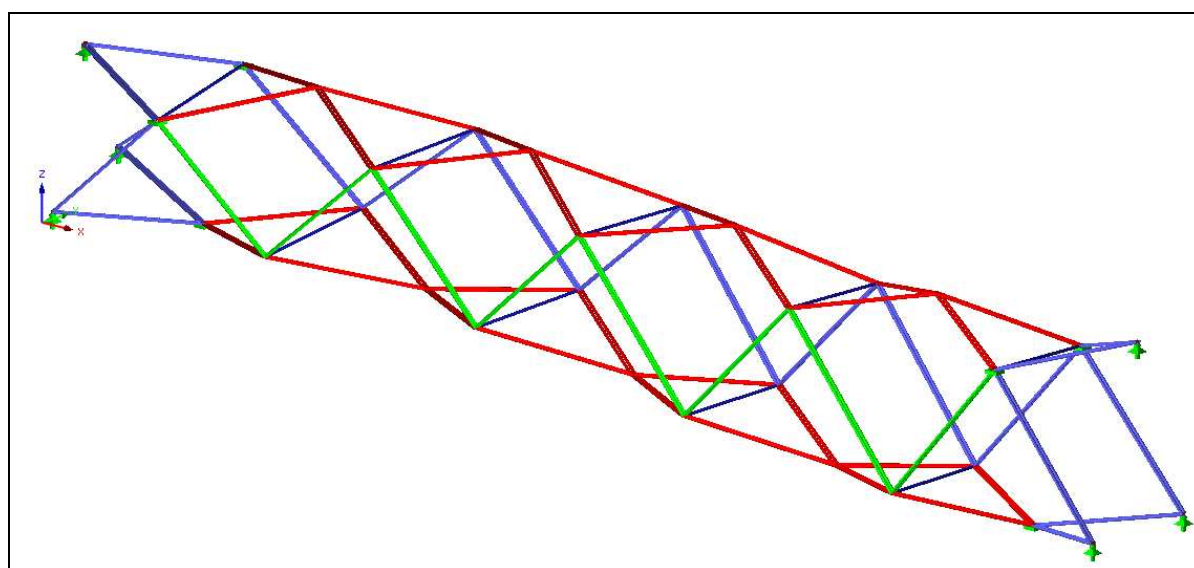




**Obr. 4.6 Tvar deformace u náhradního prutového modelu s příčnými nosníky**

V následujících grafech bylo provedeno porovnání obou náhradních prutových modelů.

Uvedené výsledky dokládají, že pokud do prostorové soustavy prutů vložíme příčné nosníky, blíží se konstrukce svým chováním více prostorové příhradové konstrukci s horním a spodním pásem, které jsou vzájemně propojeny soustavou diagonál, viz obr. 4.7



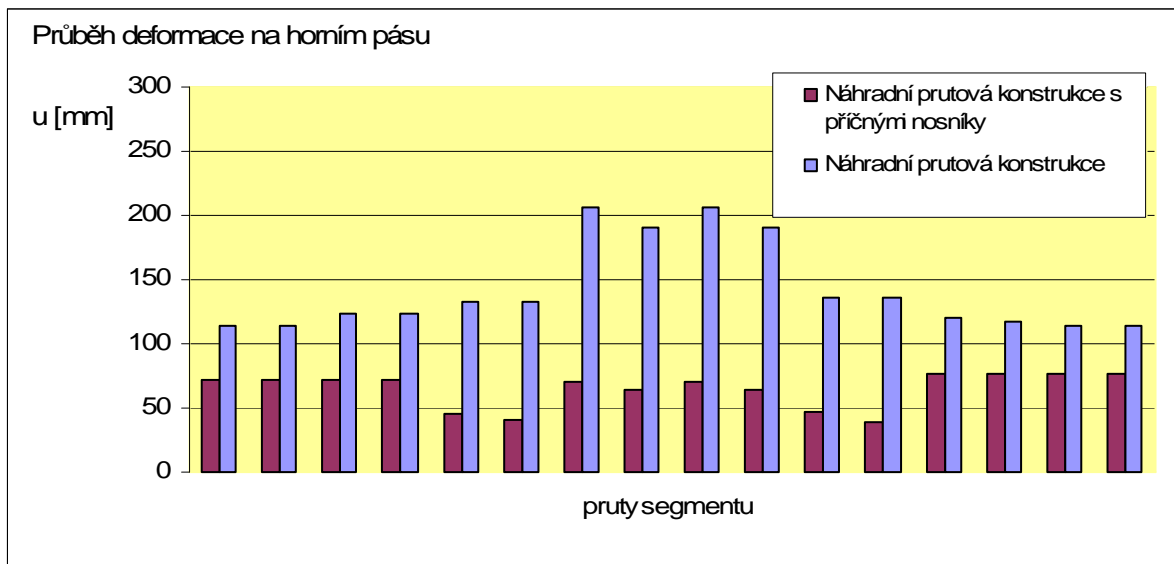
**Obr. 4.7 Zobrazení příhradových pásů (červeně) a diagonál (zeleně) u prutového modelu**



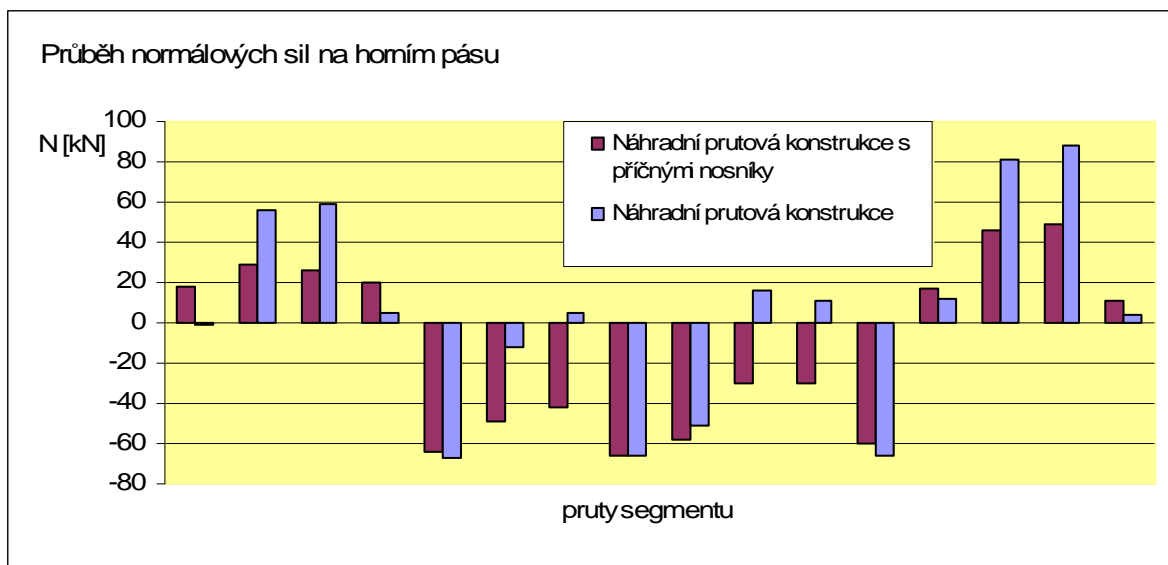
U prutového modelu s příčnými nosníky došlo k výraznému poklesu celkové deformace, což je patrné z grafu na obrázku 4.8, sloupce odpovídají jednotlivým prutům řazeným postupně po délce posuzovaného segmentu.

Při pohledu na obrázek 4.9 je patrné, že i velikost normálových sil se více blíží chování příhradové konstrukce. Jedná se o horní pás, který je v případě zatížení vlastní tíhou tlačенý, pouze na okrajích pole se vyskytují tažené pruty. Toto je způsobeno vetknutím středního pole do polí sousedních.

Při srovnání s prutovým modelem bez příčných nosníků došlo i k omezení extrémních tahových sil na okrajích segmentu.

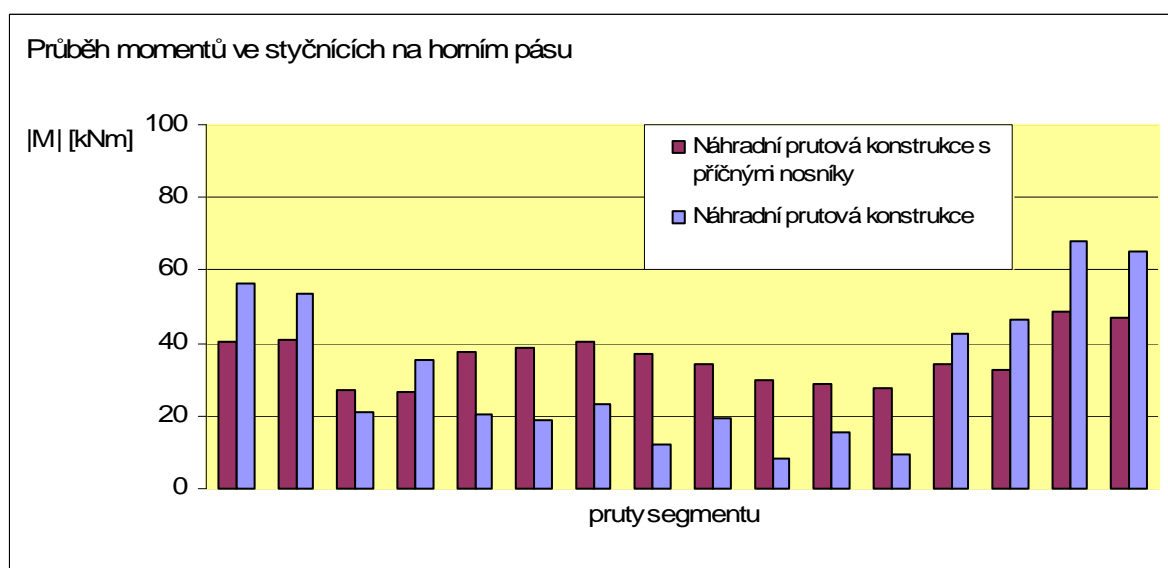


Obr. 4.8 Grafické porovnání deformací prutů horního pásu



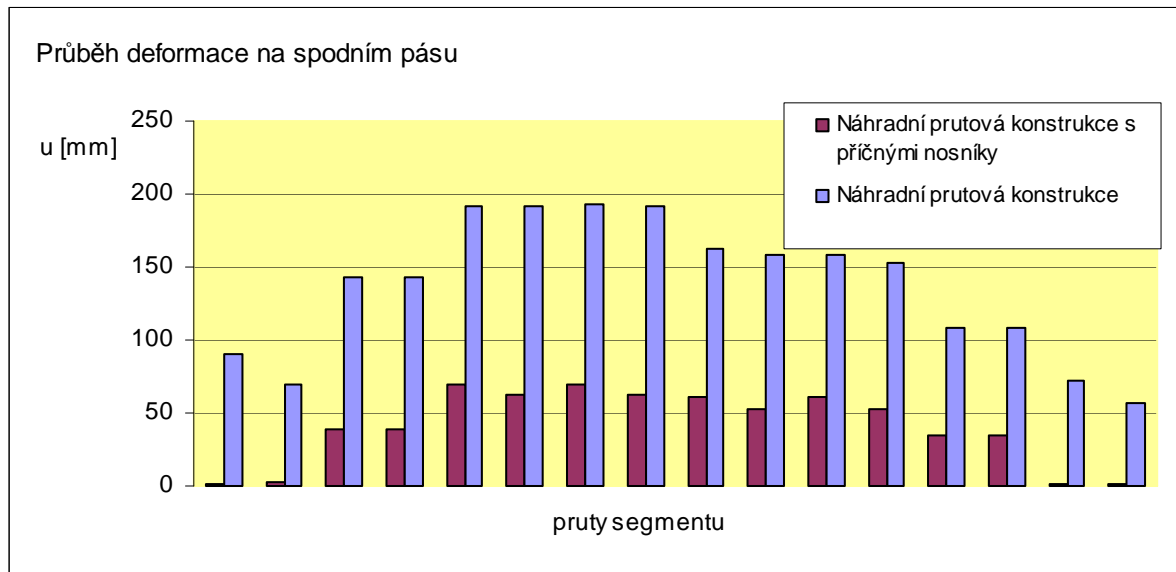
Obr. 4.9 Grafické porovnání velikosti normálových sil u prutů horního pásu

Svařované styčníky bude nutné dimenzovat mimo jiné i na vznikající ohybový moment. Vložení příčných nosníků se příznivě projevilo na jeho velikosti. Extrémní hodnoty byly redukovány a současně došlo k rovnoměrnějšímu rozdělení momentů po délce segmentu – viz graf na obrázku 4.10. Hodnoty byly do grafu nanášeny bez ohledu na jejich znaménko.

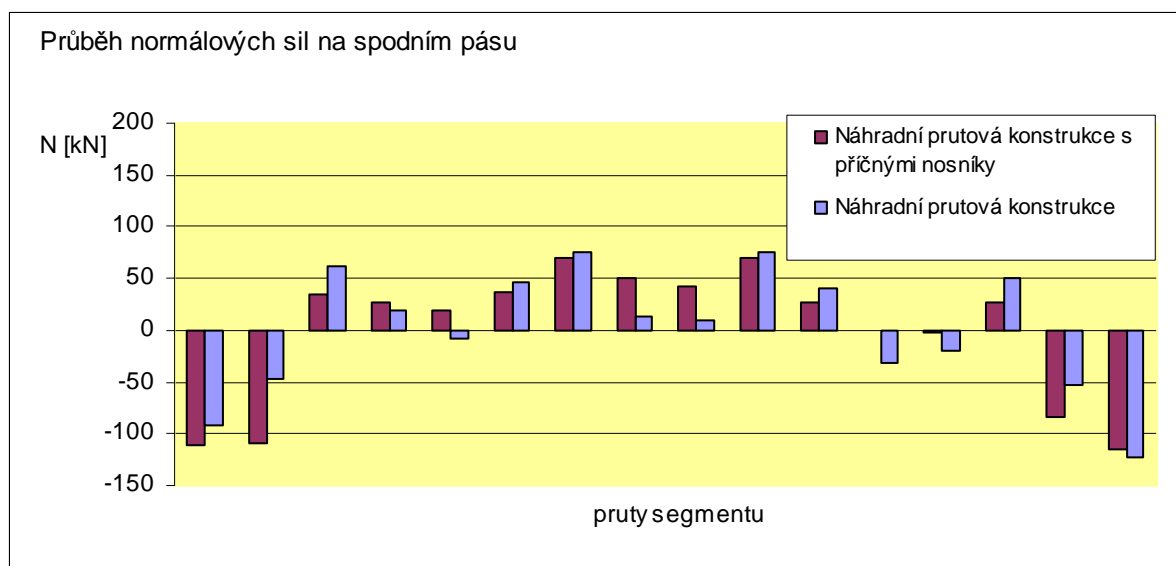


Obr. 4.10 Grafické porovnání velikosti momentů ve styčnicích horního pásu

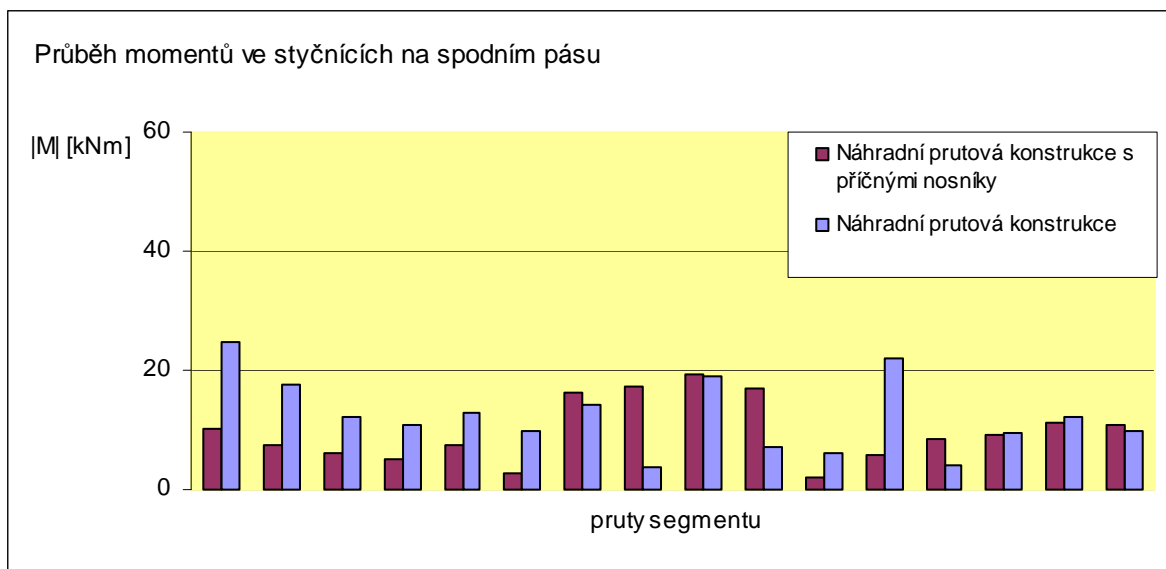
K velice podobným závěrům docházíme i při posuzování chování spodní části segmentu na obrázcích 4.11 až 4.13 . Opět došlo k výraznému poklesu celkové deformace. Rozložení normálových sil od zatížení vlastní tíhou odpovídá taženému spodnímu pásu příhradové konstrukce s tlakovými silami na okrajích pole z důvodu vetknutí. Velikost normálových sil a ohybových momentů se u obou prutových modelů pro spodní pás nijak výrazně neliší.



Obr. 4.11 Grafické porovnání deformací prutů spodního pásu



Obr. 4.12 Grafické porovnání velikosti normálových sil u prutů spodního pásu

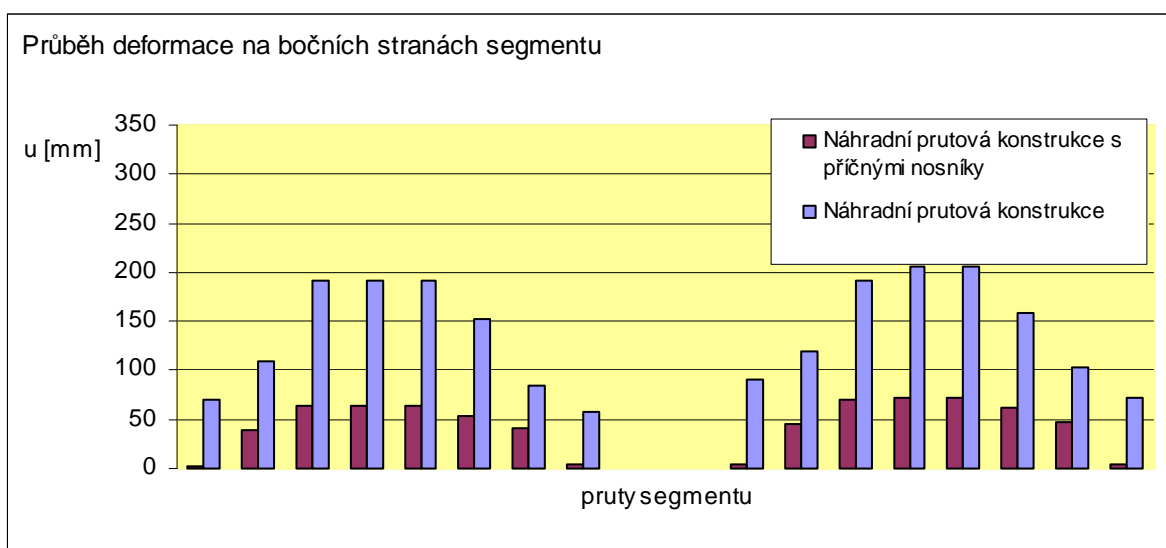


Obr. 4.13 Grafické porovnání velikosti momentů ve styčnicích spodního pásu

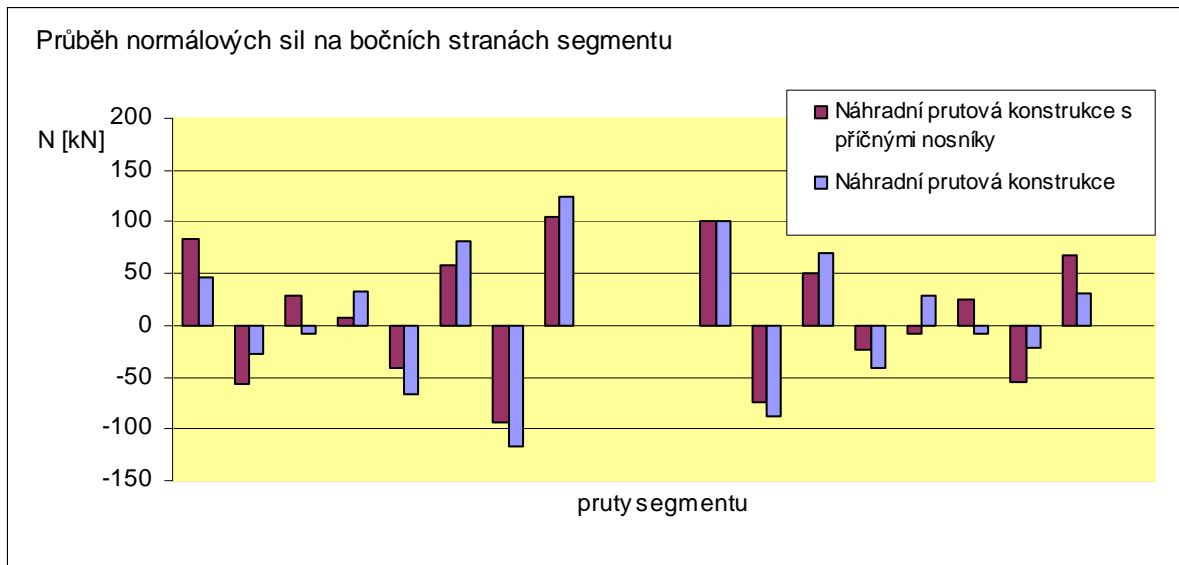
Při analýze bočních částí segmentu, které se skládají z diagonálních prutů lze konstatovat pouze výrazný pokles celkové deformace.

Typické střídání tlačných a tažených diagonál je patrné pro oba náhradní prutové modely, velikosti normálových sil a momentů se již výrazně neliší. Z toho lze usoudit, že boční část segmentu působí u obou prutových modelů přibližně stejně.

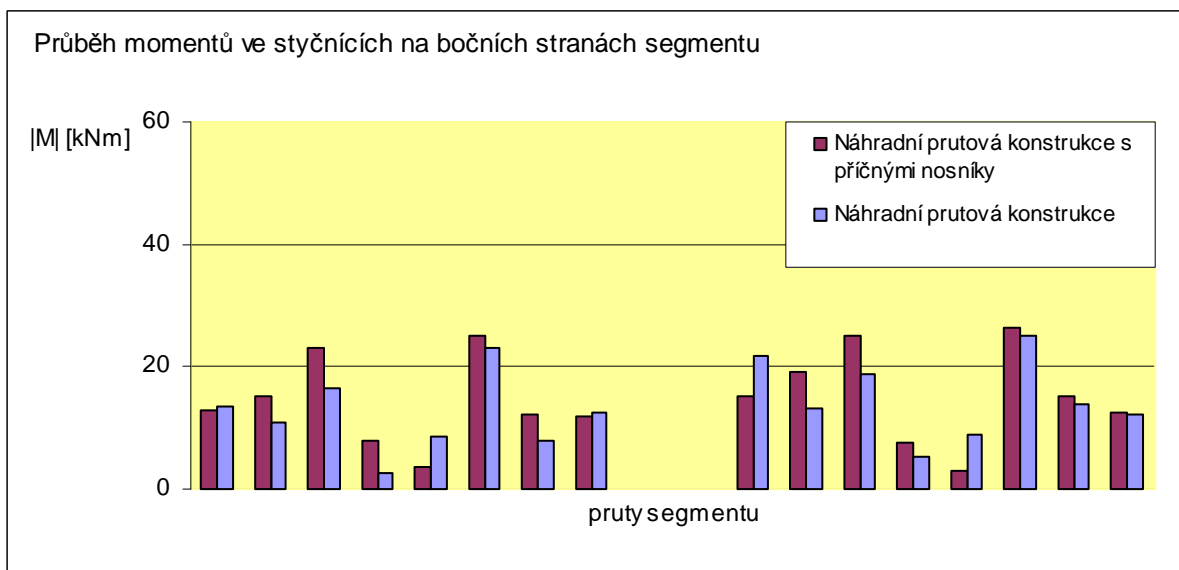
V grafech na obrázcích 4.14 až 4.16 jsou zobrazeny vždy obě boční stěny, které jsou od sebe odděleny mezerou.



Obr. 4.14 Grafické porovnání deformací na bočních stranách prutových modelů



Obr. 4.15 Grafické porovnání velikosti normálových sil na bočních stranách prutových modelů



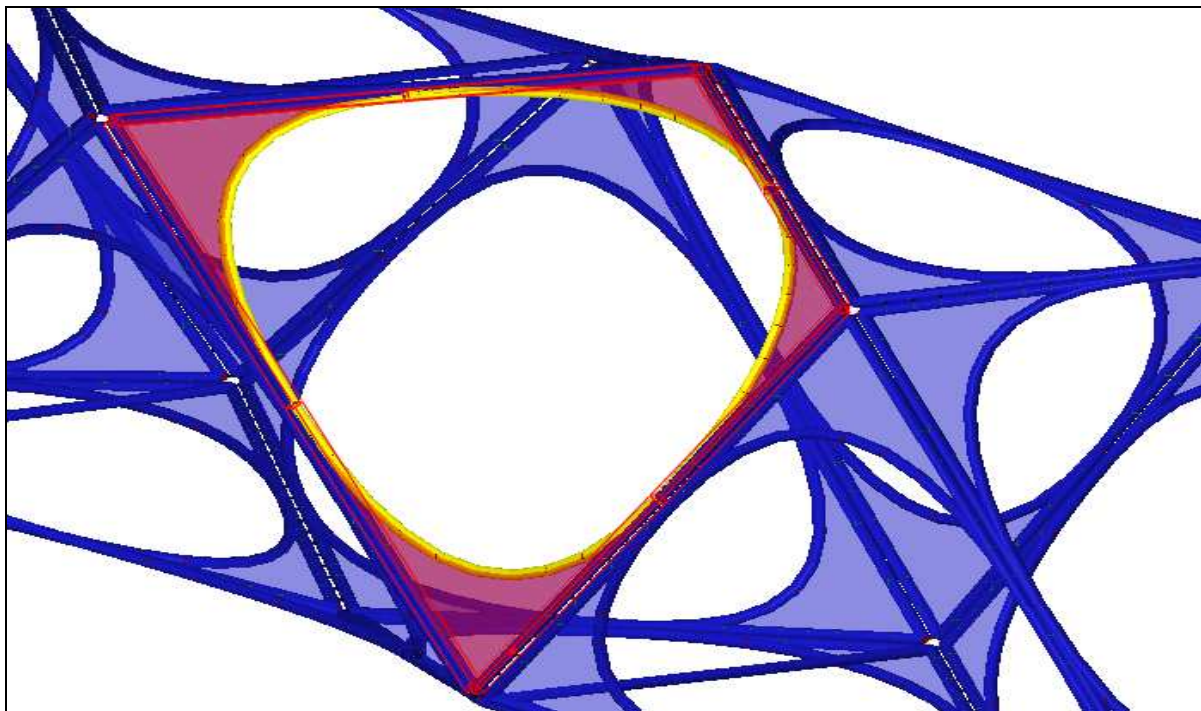
Obr. 4.16 Grafické porovnání velikosti momentů ve styčnicích diagonálních pásů prutových modelů

## 4.1.2 Model s plochami

Model s plochami obsahuje na rozdíl od prutového modelu krom ploch také zakřivené pruty (viz obr. 4.17), které jsou nutné pro výrobu plošného prvku konstrukce, tj. zborceného čtyřúhelníka.

Krom nepříznivého tvaru deformace příčného průřezu segmentu dochází u nezjednodušeného modelu také k nemalému namáhání zakřivených prutů normálovými silami.

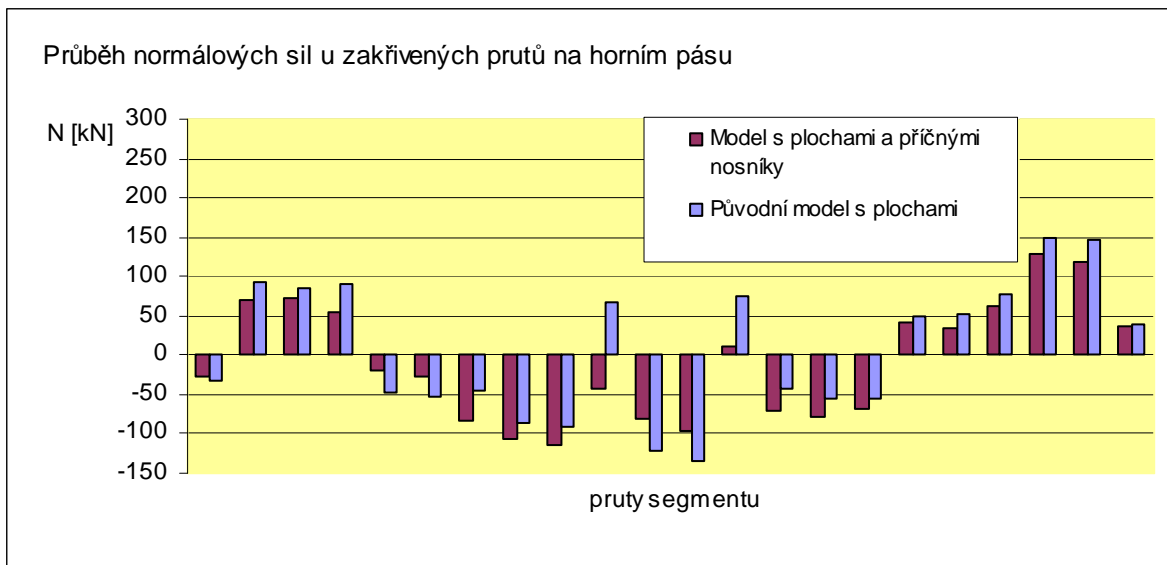
V následujících grafech je na jejich průběhu dokázáno, že i zde mají příčné nosníky příznivý vliv na celkové chování konstrukce.

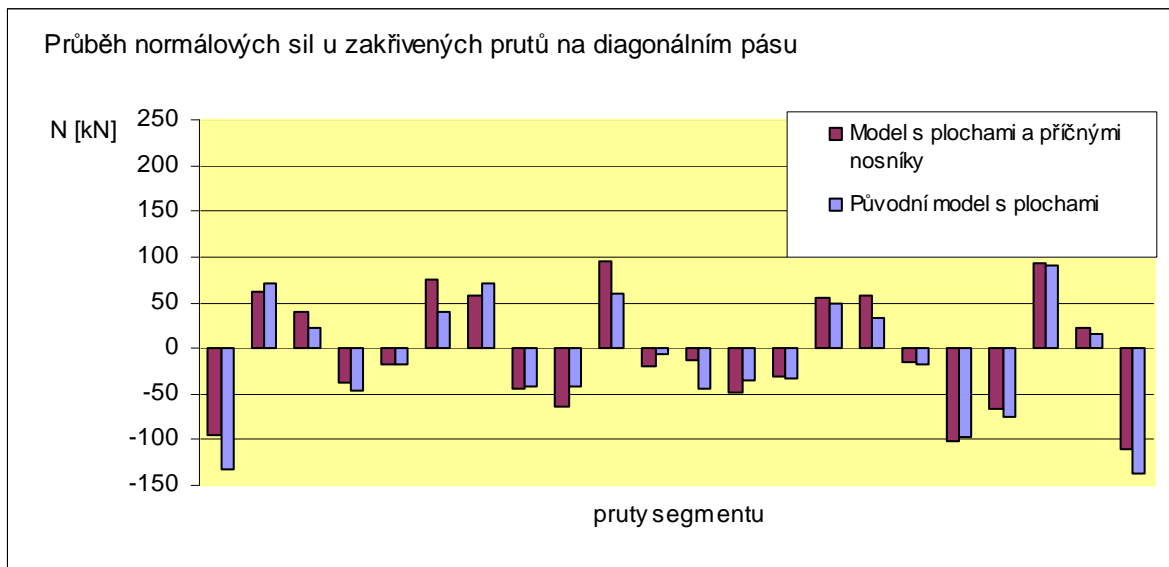


Obr. 4.17 Zakřivené pruty zborceného čtyřúhelníka (žlutě)

Ohnuté pruty horního a spodního pásu se u modelu s příčným vyztužením více podílí na nosníkovém působení horního a spodního příhradového pásu. U spodního pásu dále došlo k výraznému snížení jejich namáhání normálovými silami.

V případě diagonálních stěn se výsledky obou modelů opět příliš neliší.





Obr. 4.20 Grafické porovnání velikosti normálových sil zakřivených prutů na diagonálním pásu

U modelu s plochami, které mají primárně ztužující charakter, dochází k dalšímu výraznému poklesu celkové deformace oproti samotnému prutovému modelu, viz obr. 4.21.

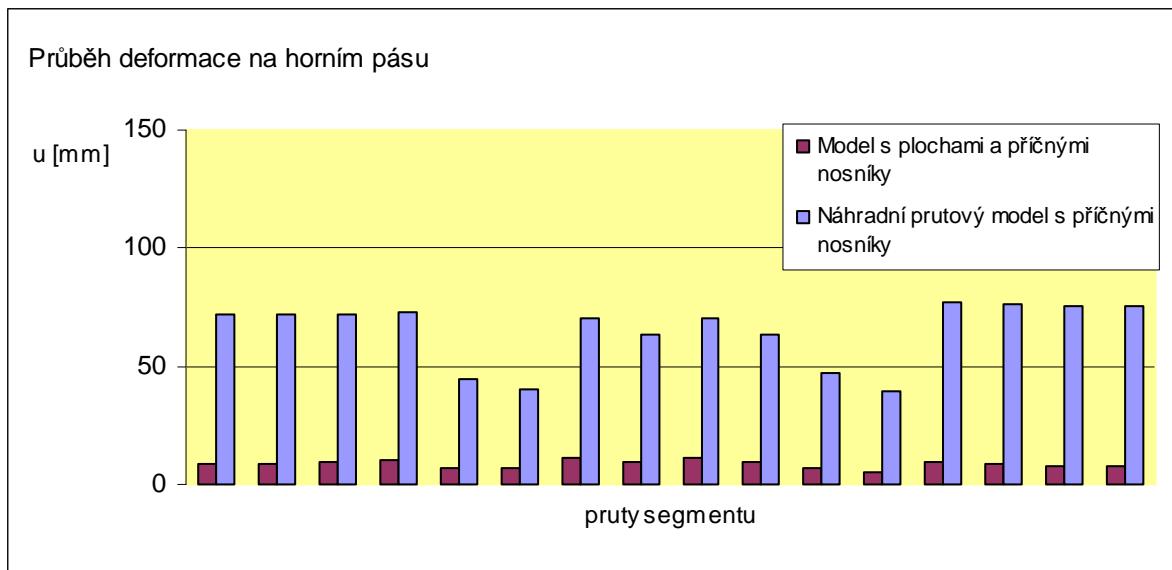
Vliv ploch dále vede k jinému rozdělení především normálových sil po prutech. Jejich velikost po délce prutu je značně proměnlivá. Na rozdíl od prutového modelu, kde byl průběh normálových sil přibližně konstantní, se u modelu s ocelovými plechy objevují extrémní hodnoty výrazně vzdálené od průměrné normálové síly v prutu.

Tento rozdíl je způsoben skoky mezi kladnými a zápornými hodnotami v rámci jednoho prutu. Průměrná velikost pak již odpovídá hodnotám normálových sil u prutového modelu, což je dobře patrné z grafu na obrázku 4.22.

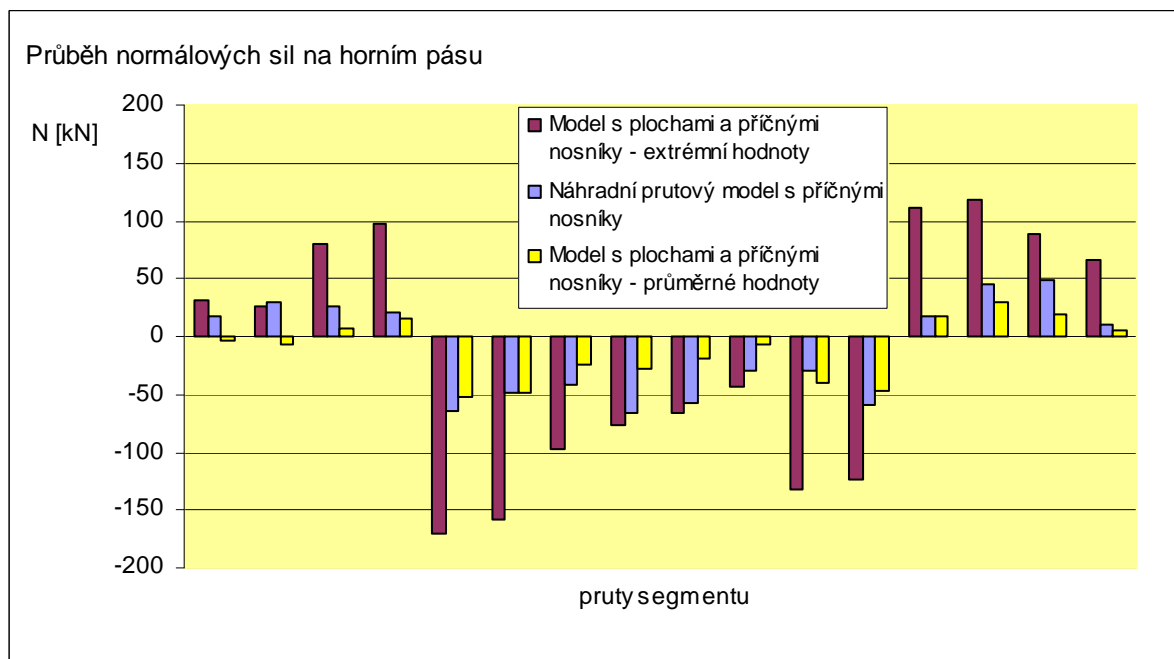
Ve styčnicích se plochy také výrazně podílejí na redukci velikosti ohybových momentů, což je velice příznivé z hlediska dimenzování svarů.

Grafy na obrázcích 4.21 až 4.23 se týkají porovnání průběhu deformace, normálových sil a momentů na prutech horního pásu pro model s plochami a příčnými nosníky a náhradní prutový model s příčnými nosníky. Pro spodní pás a diagonály by platily obdobné závěry.

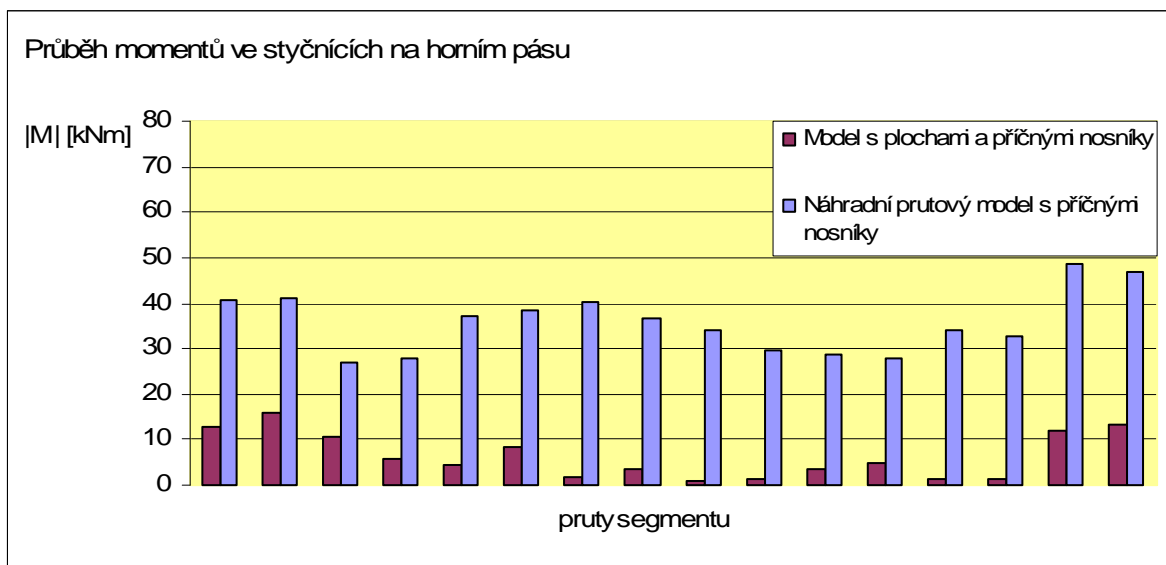




Obr. 4.21 Grafické porovnání deformací na horním pásu



Obr. 4.22 Grafické porovnání normálových sil na horním pásu



Obr. 4.23 Grafické porovnání momentů ve styčnicích horního pásu

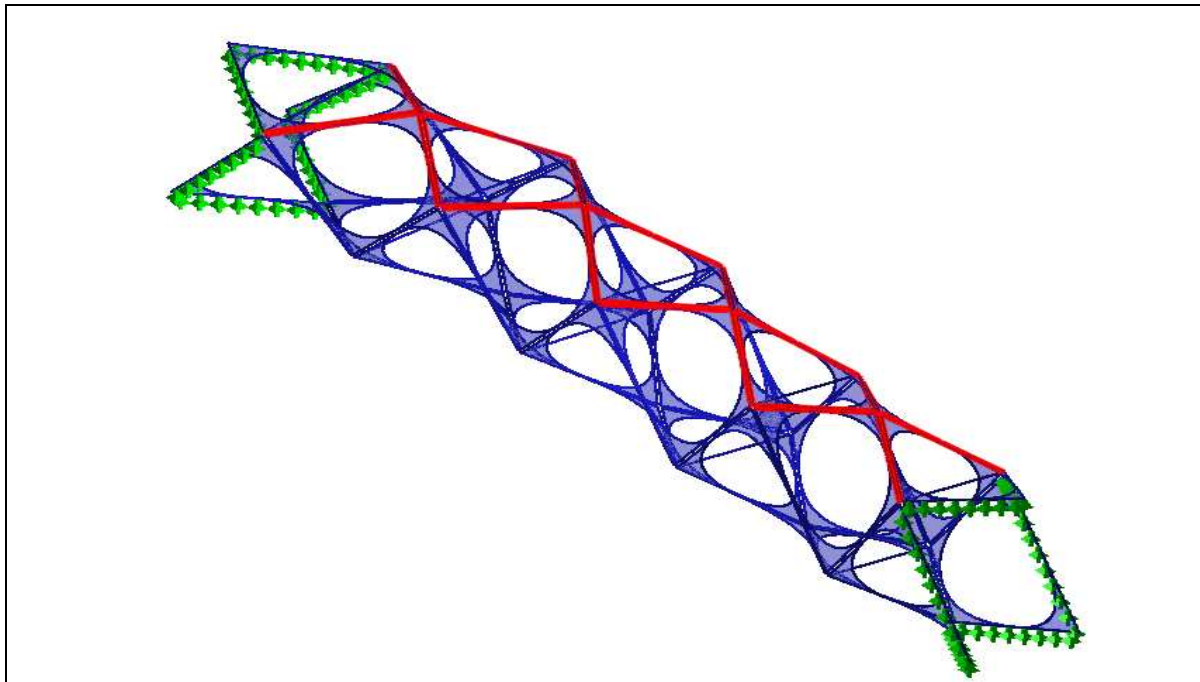
## 4.2 ZATÍŽENÍ VĚTREM

V případě analýzy chování segmentu konstrukce na statické účinky zatížení větrem bylo uvažováno působení na boční stěny s plošným konstantním zatížením  $q_1 = 0,450 \text{ kN/m}^2$  pro tlak a  $q_2 = 0,300 \text{ kN/m}^2$  pro sání.

Plošné zatížení v modelu zjednodušeně převádíme na liniové konstantní, kterým jsou zatíženy příslušné pruty a to z toho důvodu, že ohybová tuhost plošných prvků byla v modelu zanedbána.

Příslušný postup přibližného výpočtu je pro představu o charakteru chování konstrukce vůči zatížení větrem dostačující. Přitom se braly v úvahu pouze statické účinky tohoto zatížení.

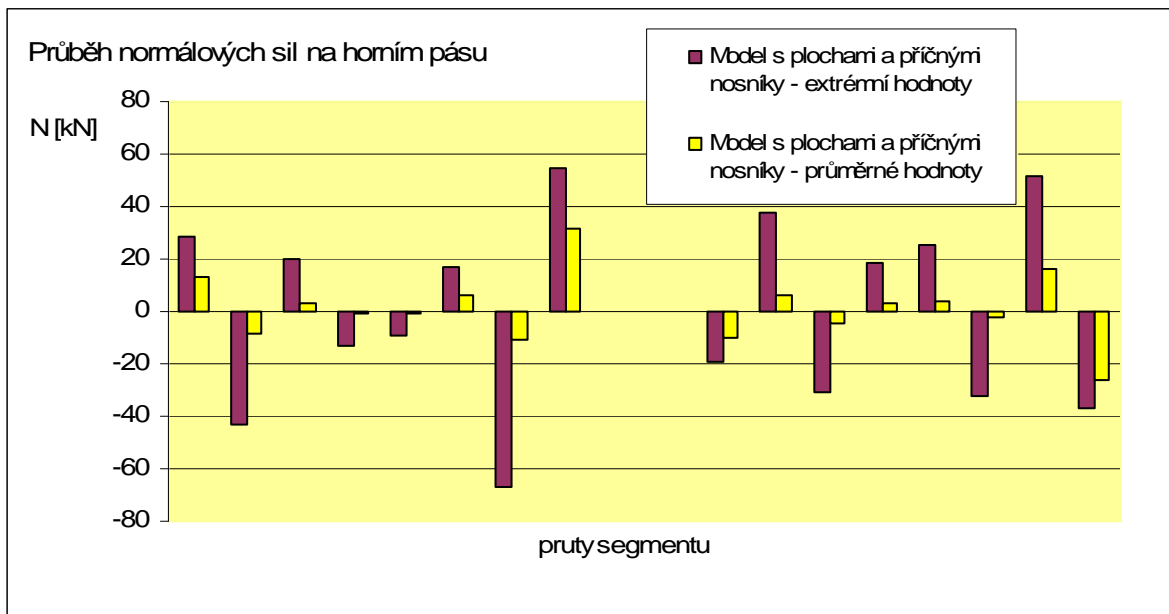
Při zatížení čelní a zadní stěny konstrukce větrem se výhodně projevuje tvar horního a spodního pásu ve formě křížených diagonál, které dobře fungují jako zavětrovací ztužidla, viz obr. 4.24.



Obr. 4.24 Horní pás tvořený kříženými diagonálami

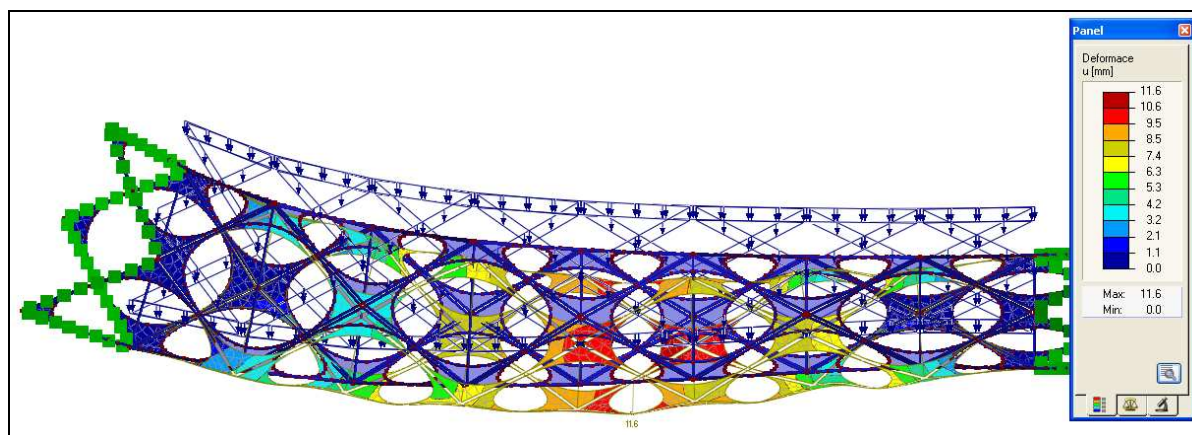
Z následujícího grafu na obrázku 4.25 je patrné rozdělení normálových sil v horním pásu. Mezerou jsou od sebe odděleny pruty návětrné a závětrné strany. V obou případech dochází ke střídání kladných a záporných hodnot normálových sil, stejně jako u diagonál v příhradové konstrukci.

Extrémní hodnoty normálových sil převyšují průměrné z důvodu skoků mezi zápornými a kladnými hodnotami v místě napojování ohnutých prutů.



Obr. 4.25 Průběh normálových sil na prutech horního pásu – vlevo návětrná strana, vpravo závětrná

Právě pruty horního a spodního pásu pak výrazně ovlivňují charakter deformace, který je patrný z obrázku 4.26.



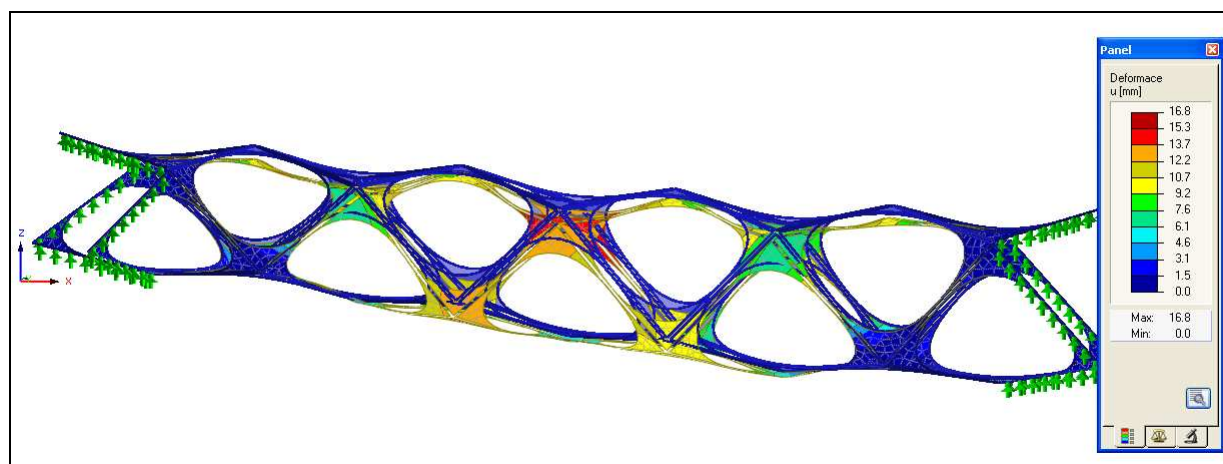
Obr. 4.26 Deformace segmentu od zatížení větrem

## 4.3 ZATÍŽENÍ SNĚHEM

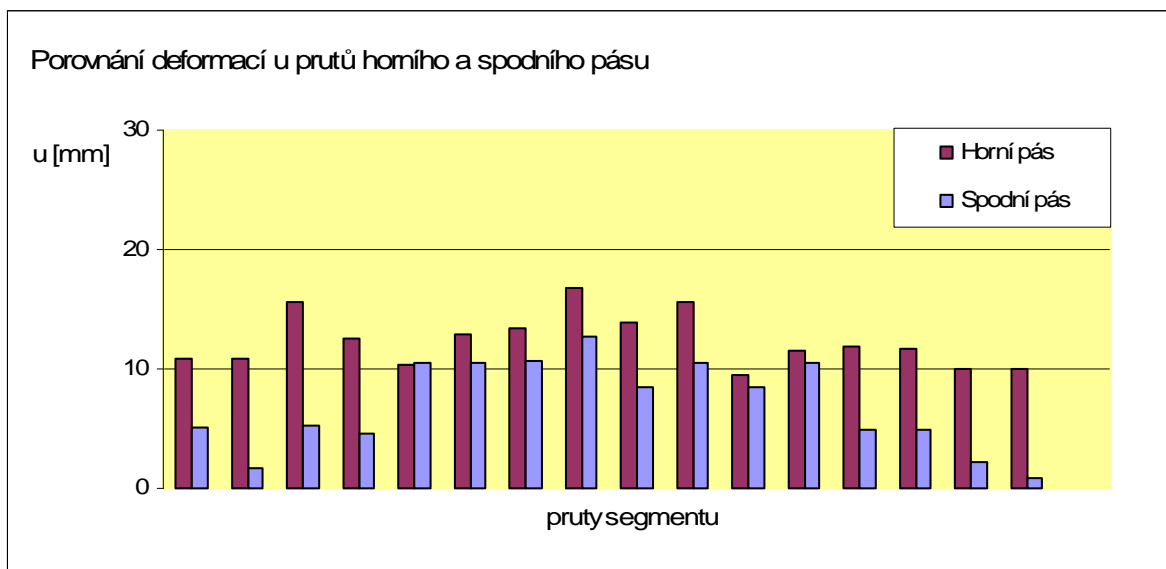
Zatížení sněhem se pro účely analýzy přepočítává na konstantní liniové zatížení hlavních nosných prutů horního pásu segmentu.

Pro přibližný výpočet byla zvolena plošná hodnota zatížení  $2,5 \text{ kN/m}^2$ . Příslušný postup výpočtu je pro představu o charakteru chování konstrukce vůči zatížení sněhem dostačující.

Z obrázku 4.27 je patrný charakter deformace pro celý segment konstrukce. Pruty horního pásu při zatížení sněhem deformují více než pruty spodního pásu a pro oba pásy lze pozorovat odlišný průběh deformace, viz graf na obr. 4.28.



**Obr. 4.27** Deformace segmentu od zatížení sněhem



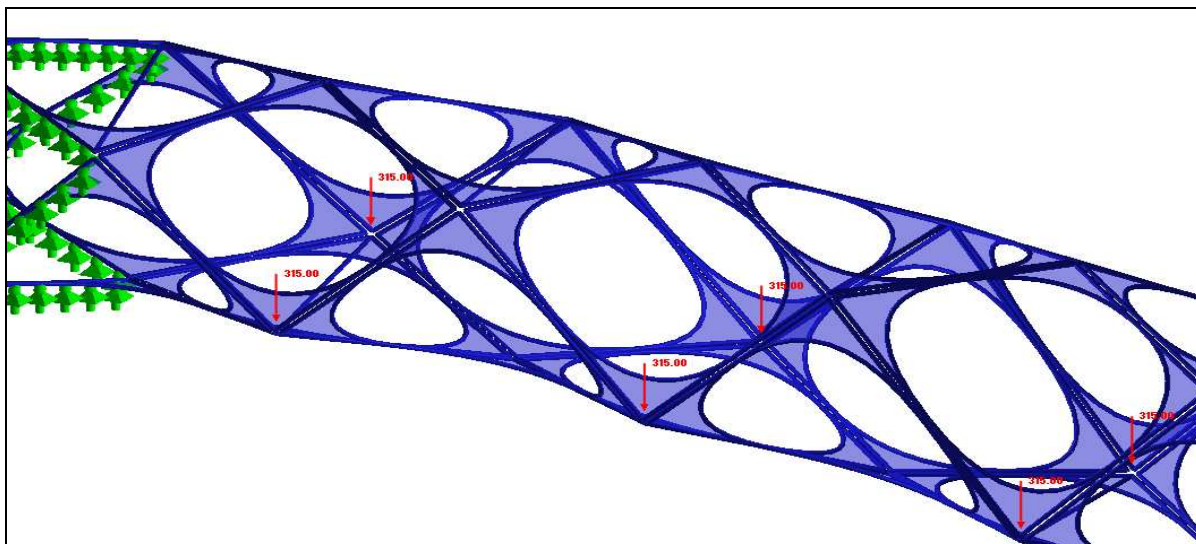
Obr. 4.28 Porovnání deformací u prutů horního a spodního pásu – zatížení sněhem

## 4.4 OSTATNÍ STÁLÉ A UŽITNÉ ZATÍŽENÍ

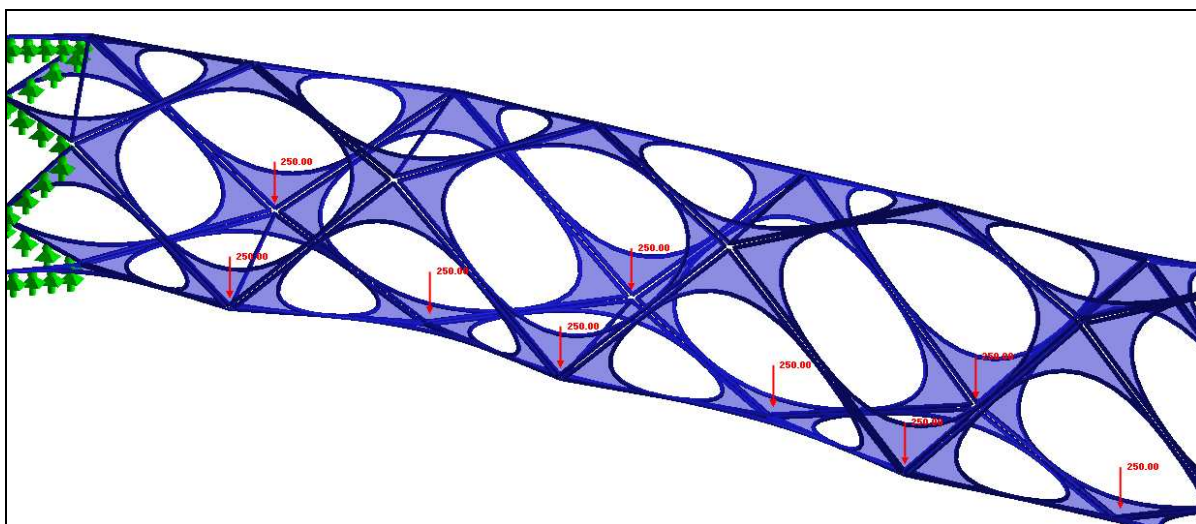
Vzhledem k přání architekta nezdvajovat nosnou konstrukci, ke kterému by došlo v případě samonosné mostovky, je v této práci uvažováno s tím, že konstrukce podlahy by byla nesena rovněž ocelovou konstrukcí.

Pro výpočet bylo zvoleno bodové zatížení v místech styčníků, vypočtené z bezpečně odhadnuté hodnoty plošného zatížení  $15\text{kN/m}^2$ . Byly uvažovány dvě varianty způsobu zatížení dle upevnění nosné konstrukce podlahy.

V první variantě byly bodově zatíženy pouze styčnky v místě příčných prutů, v druhé variantě se pak uvažovalo s tím, že část zatížení by přenesl styčník mezilehlý. Obě varianty jsou patrné z obrázků 4.29 a 4.30.

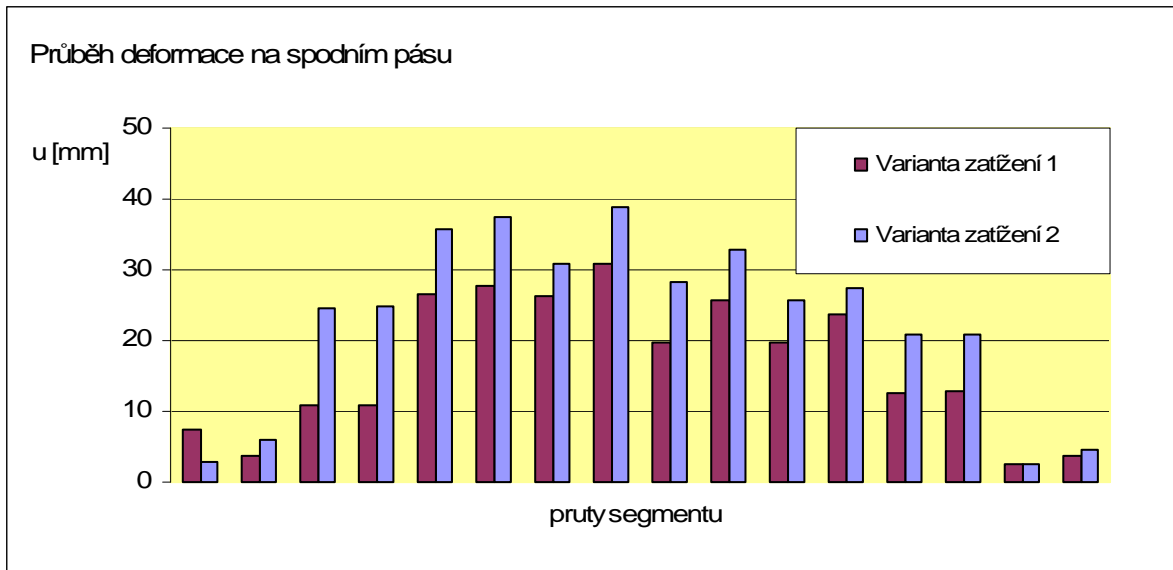


Obr. 4.29 Varianta zatížení 1



Obr. 4.30 Varianta zatížení 2

Z grafu na obrázku 4.31 je patrné, že pro konstrukci jako celek je výhodnější konstrukce podlahy, která je podepřena pouze ve styčnicích s příčnými pruty. Pokud pro výpočet použijeme variantu č.2, vzroste celková deformace u prutů spodního pásu až o 28%.



Obr. 4.31 Porovnání deformací u prutů spodního pásu pro varianty zatížení 1 a 2



## 5. ZÁVĚR

Analýza konstrukce byla provedena s použitím výpočetního programu RFEM.

Předmětem této práce bylo zkoumání chování segmentu konstrukce vystaveného účinkům různých typů statického zatížení. Jednalo se o zatížení vlastní tíhou, zatížení sněhem a větrem, stálé a užitné zatížení.

V průběhu analýzy se ukázalo, že konstrukce vykazuje nevhodný tvar deformace příčného profilu už při zatížení vlastní tíhou. Proto byl model dále zjednodušen na prutový, kde byl tvar deformace z důvodu absence ploch lépe pozorovatelný. Nepříznivé chování bylo způsobeno imperfektním tvarem bočních prutů segmentu. Konstrukce byla doplněna o soustavu příčných prutů. Výsledky prokázaly jejich pozitivní vliv při deformaci jak příčného průřezu tak i konstrukce jako celku.

Pro zatížení větrem bylo ověřeno příznivé působení horního a spodního pásu jako zavětrovacích ztužidel.

V případě stálého a užitného zatížení existovaly dva možné způsoby, jak vytvářet konstrukci podlahy. Analýza prokázala, že z hlediska celkové deformace konstrukce je výhodnější kotvení nosné konstrukce podlahy pouze do vnějších styčníků spodního pásu.

Předmětem této analýzy bylo zjišťování chování konstrukce vůči účinkům jednotlivých typů statického zatížení. Na základě zjištěných vlastností segmentu byly do modelu zapracovány některé konstrukční úpravy, které by byly pro realizovatelnost konstrukce nezbytné.

Dimenze prvků byla na počátku analýzy odhadnuta a pro jednoduchost se uvažoval průřez všech prutů stejný. Z časových důvodů již nebyla zjišťována optimální délka pole a k tomu příslušné dimenze prvků.

## 6. LITERATURA (BIBLIOGRAPHY)

- [1] Doc. Ing. Václav Kufner, CSc., doc. Ing. Pavel Kuklík, CSc.: Stavební mechanika 20, ČVUT, Praha 2003
- [2] Prof. Ing. Jiří Studnička, DrSc., Prof. Ing. Milan Holický, DrSc.: Ocelové konstrukce 20 – Zatížení staveb podle Eurokódu, ČVUT, Praha 2003
- [3] Tomáš Vraný, František Wald: Ocelové konstrukce – tabulky, ČVUT, Praha 2005
- [4] časopis ERA 21, 5/07

<http://www.e-architekt.cz>

<http://www.archiweb.cz>

<http://www.archinet.cz>

<http://kurilla.atelierflorian.com>