



České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Studijní program: **Stavební inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

Katedra mechaniky

Statická optimalizace objektu „polygon urbanism centrum“

Static optimization of “polygon urbanism center” object

Petr Pospíšil

Projekt 132PJ3C – statická optimalizace tvarově složitých konstrukcí

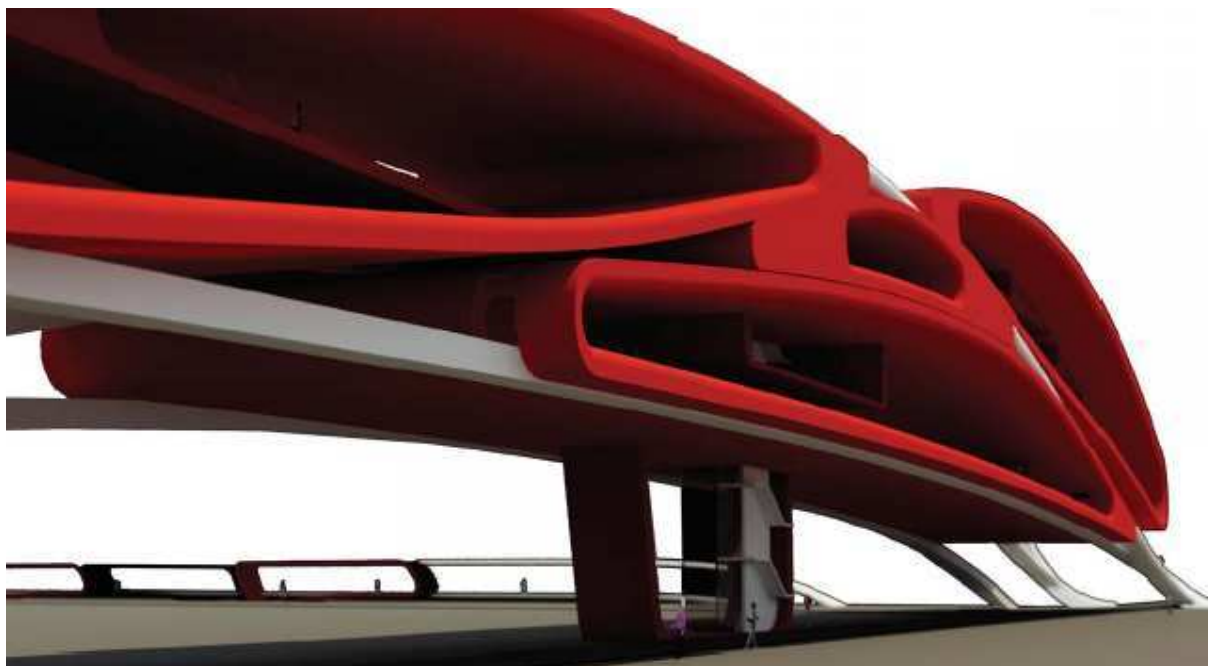
Vedoucí práce: Jan Novák

Praha, leden 2009

Osnova

1	Úvod	1
2	Architektonické řešení konstrukce	2
3	Výpočtový model	3
4	Analýza konstrukce	3
4.1	Statická optimalizace - 1. krok	3
4.1.1	<i>Zatížení</i>	3
4.1.2	<i>Výsledná doporučení</i>	3
4.2	Statická optimalizace - 2. krok	4
4.2.1	<i>Zatížení</i>	4
4.2.2	<i>Výsledná doporučení</i>	4
4.3	Statická optimalizace - 3. krok	6
4.3.1	<i>Zatížení</i>	7
4.3.2	<i>Výsledná doporučení</i>	9
5	Závěr a budoucí práce	11

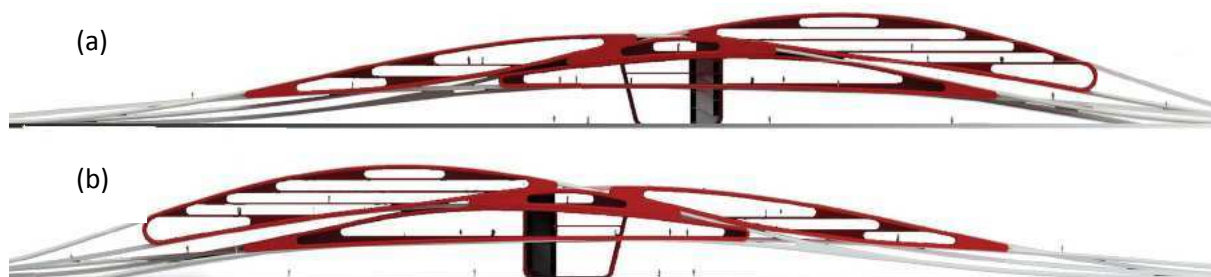
1 Úvod



Obr. 1. Vizualizace objektu „polygon urbanism centrum“

Ve stavební praxi se stále častěji můžeme setkat s projekty vytvořenými digitální cestou. Jedná se o projekty, nad kterými by se člověk v minulosti pouсмál a označil je za hodně vzdálenou budoucnost. Samozřejmě, že prvotní návrh se většinou neobejde bez skici na papíře. Ovšem ihned v další fázi se přechází k využití počítače a softwaru. Ten v dnešní době dokáže dle vhodných informací vytvořit něco, čím bychom se na papíře zabývali několik hodin ne-li dní a měsíců, viz obr. 1. Z důvodu využití různých algoritmů k návrhu tvaru konstrukce se vyvinul i název takového procesu projektování a to „digitální architektura“.

Tato architektura se dnes uplatňuje zejména u nekonvenčních budov (např. muzea, výstavní pavilony nebo knihovny). Důvodem je, že ne každý investor přijme takovou myšlenku a mnohdy raději sáhne po konzervativnějším řešení.

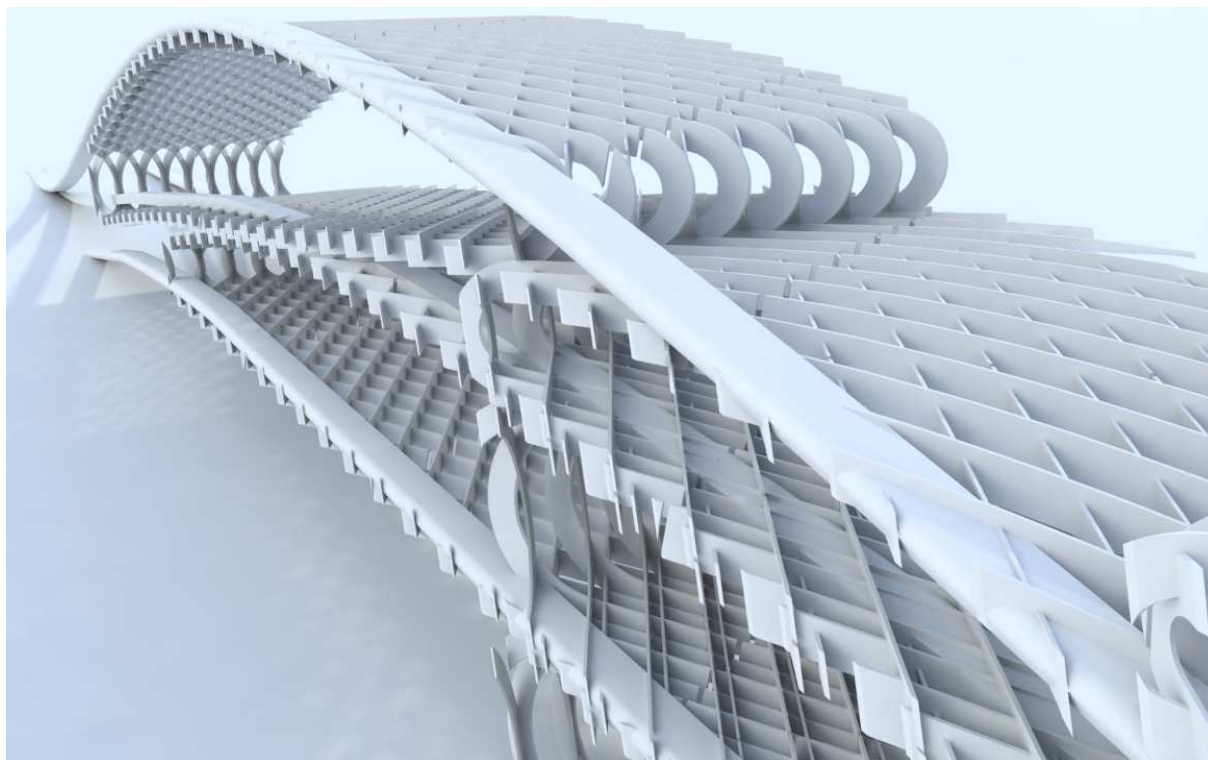


Obr. 2. Boční pohledy no konstrukci, (a) pohled východní, (b) pohled západní

Tématem předložené práce je optimalizace nosných konstrukčních prvků objektu navrženého s využitím principů „digitální architektury“. Architektonické řešení je zřejmé z obr. 1 až 3 a je stručně popsáno v následující kapitole.

2 Architektonické řešení konstrukce

Výchozí tvar konstrukce je výsledkem ročníkového projektu studenta Fakulty architektury Miroslava Strigáče. Objekt byl pojmenován „Polygon urbanism centrum“ a je umístěn v části průmyslové zóny Holešov. Konkrétně řeší centrum vybavenosti na okraji města v blízkosti místa, kde dochází k překládce nákladu mezi vlakovou a silniční dopravou.



Obr. 3. Drátěný model

Budova se skládá z průběžných zakřivených nosníků a vložených buněčných celků, viz obr. 2a, b. Oba konstrukční prvky společně vytváří nosný systém objektu. Tvar vnitřních buněk (délka, vzepětí) se odvíjí z velikosti prostorů vzniklých mezi liniemi průběžných pásů a nabývají hodnot v rozmezí 5-14 m výšky, 30-100 m délky. Půdorysná šířka konstrukce je okolo 20 m a rozpětí mezi jednotlivými podporami je přibližně 330 m. Maximální výška vzepětí objektu je 35 m. Představou autora projektu je, že objekt bude zhotoven z předpjatého betonu.

3 Výpočtový model

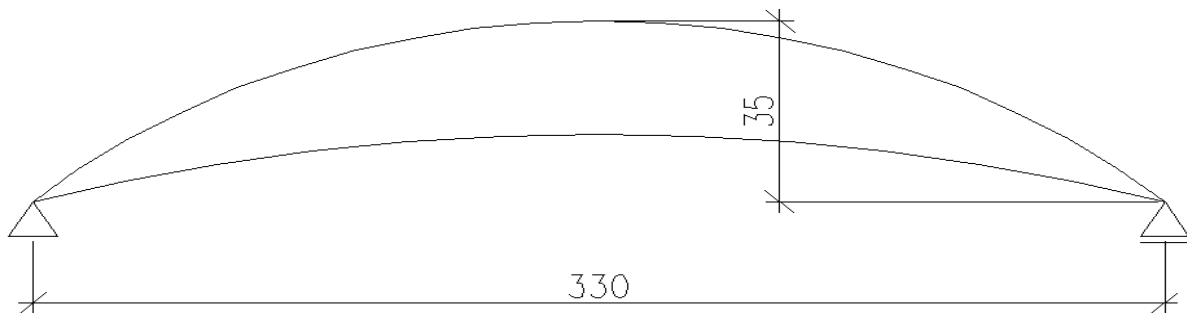
Při letmém pohledu není zcela jasné, jak se bude konstrukce jako celek chovat. Vzhledem k podélnému charakteru objektu ($b/l = 20/300$) byl zvolen dvojrozměrný výpočtový model. Model je reprezentován bočním průřezem 3D konstrukce do roviny xz se zachováním všech nosných podélných pásů.

Architektonický návrh budovy byl vytvořen v programu RhinoScript. Takový model je možné převést do formátu, který podporují statické programy. Model byl nejprve uložen do souboru dwg (AutoCAD). V něm došlo ještě k drobným úpravám a poté byla celá konstrukce importována do statického programu RSTAB firmy DLUBAL. Program převezme jednotlivé uzly a linie modelu, z nichž je posléze interpretována topologie sítě konečných prvků.

4 Analýza konstrukce

4.1 Statická optimalizace – 1. krok

Pro další výpočty bylo nutné přidělit materiál, rozměry konstrukce a podpory. Materiál byl zvolen beton C 40/50. Rozměry průřezu nosných prvků byly určeny kvalifikovaným odhadem, a to obdélník 1200/600 mm. Konstrukce byla podepřena kloubovými podporami, jak je patrné z obr. 4.



Obr. 4. Statické schéma konstrukce 1. výpočtového kroku

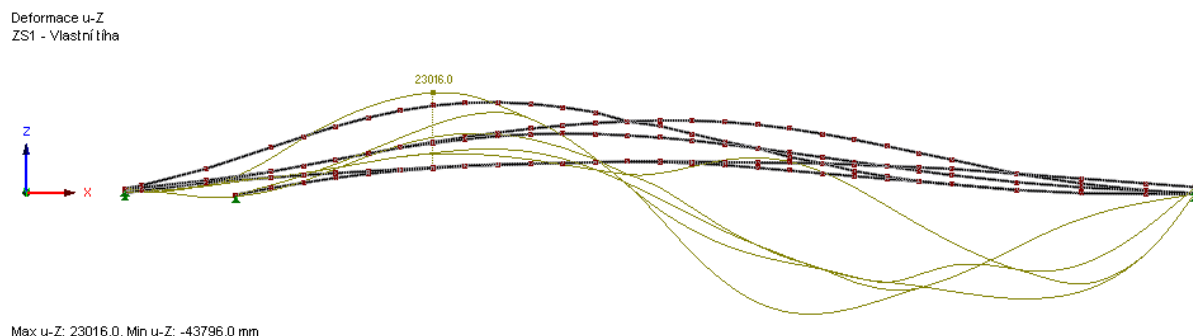
4.1.1 Zatížení

V rámci 1. kroku optimalizace byla ze všech zatížení vzata v úvahu pouze vlastní tíha hlavních nosných prvků konstrukce.

4.1.2 Výsledná doporučení

Již první výpočet odhalil, že konstrukce bez jakéhokoliv ztužení není schopná přenést svou vlastní tíhu. Byl by tu předpoklad chování obloukové konstrukce, ovšem k tomu nemá naše konstrukce vhodné rozměry. Poměr délky a výšky vepětí je tak velký, že se konstrukce

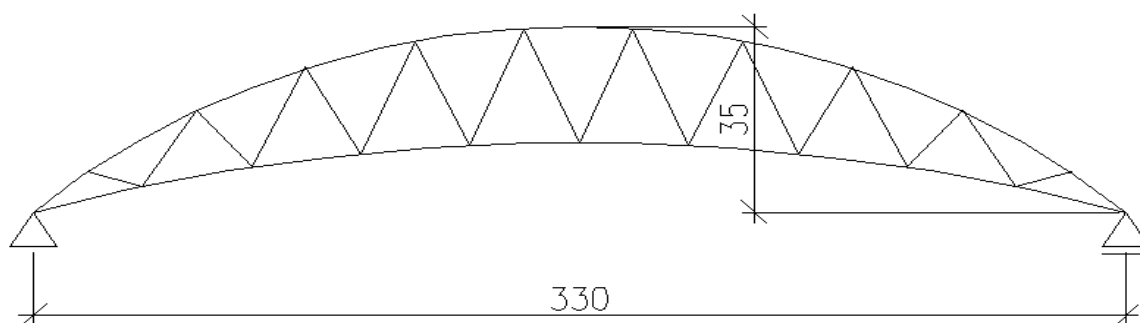
ukázala příliš poddajná. Maximální svislý posun činil 43,8 m, viz obr. 5. Ukázalo se, že k výsledkům velkou měrou přispívá samotná volba materiálu.



Obr. 5. Svislé posuny od vlastní tíhy v 1. výpočtovém kroku

4.2 Statická optimalizace – 2. krok

Po dohodě s architektem byla celá konstrukce ztužena příhradovými diagonálními pruty (ztužidly), viz obr. 6. Zároveň byla dohodnuta změna materiálu z betonu na ocel S 355. Pro výpočet byl použit uzavřený profil 1200/600/30/20 pro hlavní nosníky a v případě ztužidel trubka TR219,1x16.



Obr. 6. Statické schéma konstrukce 2. výpočtového kroku

4.2.1 Zatížení

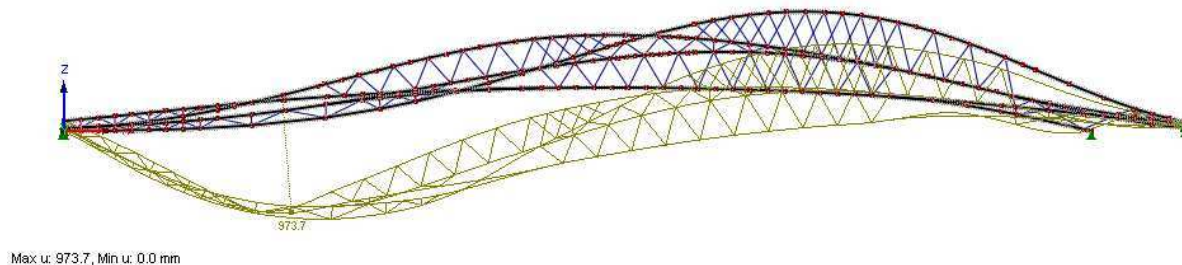
I v tomto kroku byl model zatížen pouze vlastní tíhou s předpokladem, že profily by měly být v ideálním případě využity přibližně na 50% své únosnosti. Zbýlých 50% únosnosti průřezů by mělo pokrýt další zatížení jako např. vlastní tíhu vnitřních buněk a především pak provozní nahodilá zatížení.

4.2.2 Výsledná doporučení

Nyní se opět ukázalo, že v určitých místech je konstrukce nepřiměřeně poddajná. Konkrétně se to týká míst v nadpodporových oblastech, kde nebylo možné konstrukci vyztužit příhradovými pruty. Průhyby zde dosahovali hodnot až 1,0 m, viz obr. 7. To je pro

konstrukci nepřijatelné, zejména uvážíme-li, že bylo počítáno pouze s vlastní tíhou, ale limitní hodnota svislého průhybu pro přímé pruty $l/250$ byla dodržena.

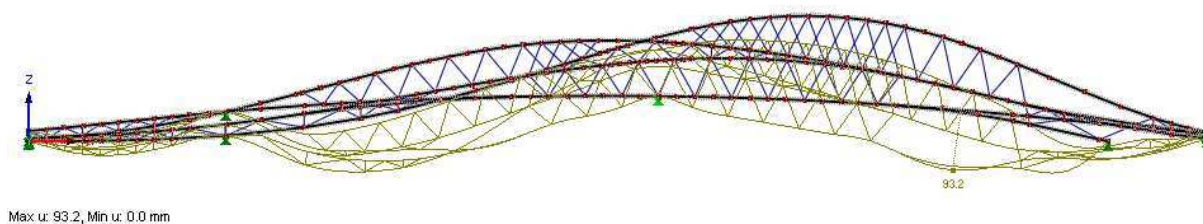
Deformace u
ZS1 - Vlastní tíha



Obr. 7. Svislé posuny od vlastní tíhy před vložením podpor

Z výše uvedených důvodů byl model opět modifikován. Do místa styku hlavních nosníků byla vložena další kloubová podpora a jádro uprostřed rozpětí, které dosud plnilo pouze funkci komunikačního koridoru, bylo využito jako středový nosný pilíř.

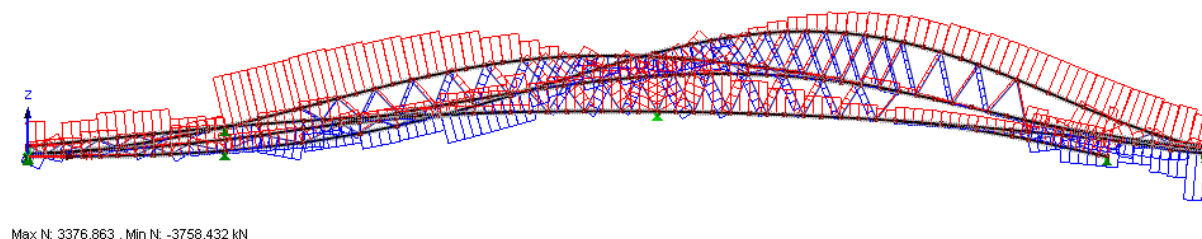
Deformace u
ZS1 - Vlastní tíha



Obr. 8. Svislé posuny od vlastní tíhy po vložení podpor

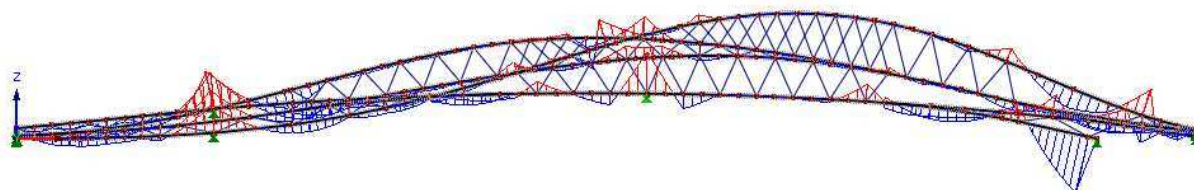
Výsledný maximální svislý posun $u = 93$ mm, viz obr. 8 je již přijatelný. Z výsledků je dále zřejmé, že je nutné vyztužit průřezy podélných nosníků v místech uložení do patek. Totéž se týká i diagonál. Naopak existují oblasti, kde je možné průřezy zmenšit, jelikož jsou vzhledem k vnitřním silám využity pouze z 20%. Vnitřní síly jsou znázorněny na obr. 9 a 10.

Vnitřní síly N
ZS1 - Vlastní tíha



Obr. 9. Vnitřní normálové síly N od vlastní tíhy

Vnitřní síly M-y
ZS1 - Vlastní tíha

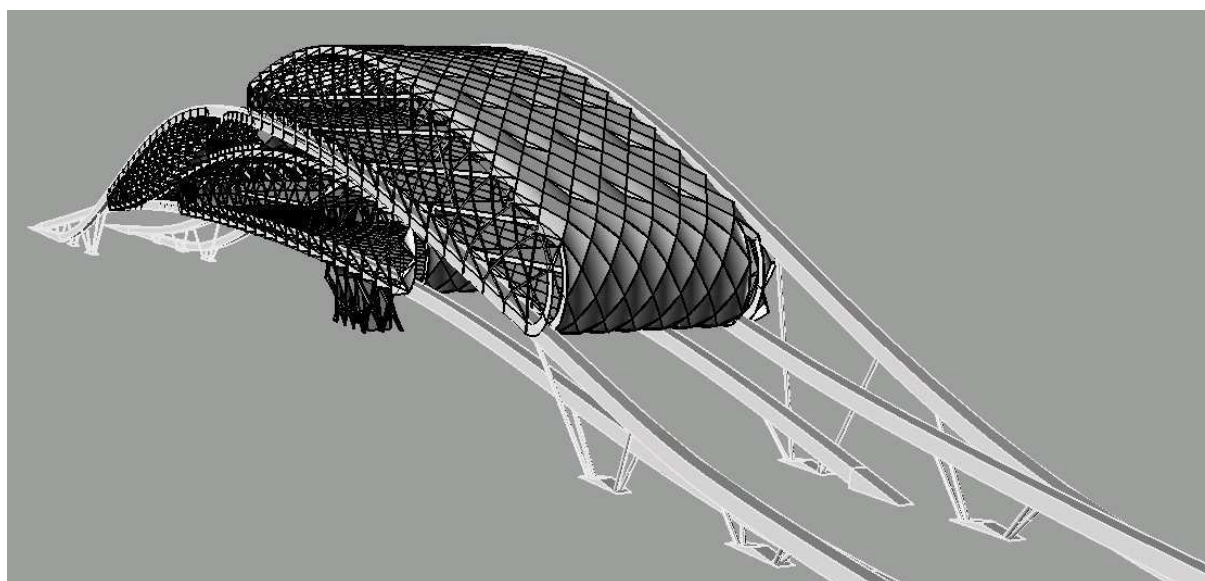


Max M-y: 2932.489 , Min M-y: -2133.392 kNm

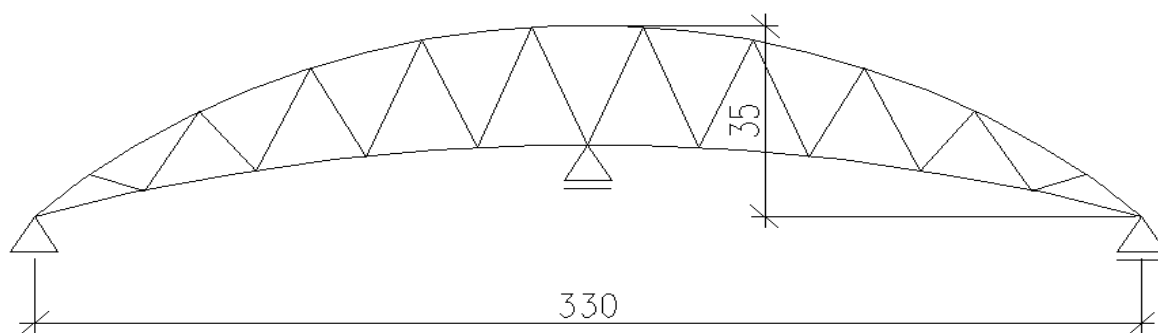
Obr. 10. Momentové účinky My od vlastní tíhy

4.3 Statická optimalizace – 3. krok

Po poslední schůzce s architektem, došlo pouze ke kosmetickým úpravám modelu, viz obr. 11 a 18. Rastr diagonál byl zhuštěn a přibyly další podpory. Dále byla zahrnuta vložená patra do bublin. Naopak na požadavek architekta byly z některých částí vypuštěny diagonály a průřez hlavních nosníků byl pootočen kolem podélné (těžišťové) osy. Horní a dolní příruby jsou tedy nyní široké 1200 mm a výška profilu je 600 mm. Tato změna byla provedena z důvodu využití nosníků jako komunikace pro pěší. Z hlediska statického působení je však tato změna krajně nevhodná.



Obr. 11. Úprava architekta



Obr. 12. Statické schéma konstrukce 3. výpočtového kroku

4.3.1 Zatížení

V rámci tohoto výpočtu byla vzata v úvahu další zatížení. K vlastní tíze tak přibýlo stálé zatížení od navazujících konstrukcí a nahodilé zatížení s ohledem na využití vnitřních prostorů. V případě střechy bylo aplikováno zatížení sněhem. Nahodilá a stálá zatížení v jednotlivých podlažích jsou aplikována jako bodové síly v místech napojení příslušných stropních konstrukcí na nosný skelet. Konkrétní hodnoty všech zatížení jsou uvedeny v tab. 1 a 2. a zobrazeny jsou na obr. 13-17.

Tab. 1 Stálá zatížení

Stálé	kN.m^{-2}	γ_f	kN.m^{-2}
vlastní tíha nosného skeletu	-	1,35	-
vl. tíha konstrukce stropu (skořepiny)	1,00		1,35
vl. tíha podlah	2,50		3,38
vl. tíha konstrukce pater	3,00		4,05

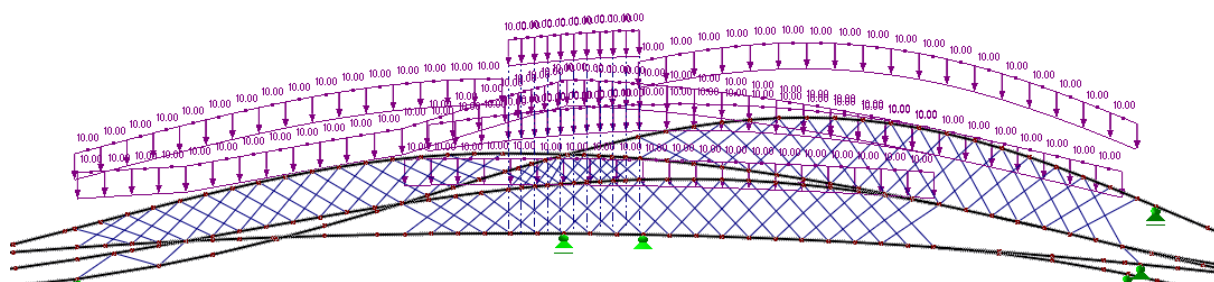
Tab. 2 Nahodilá zatížení

Nahodilé	kN.m^{-2}	γ_f	kN.m^{-2}
užitné obchod, služby	4,50	1,50	6,75
stravování, konferenční sál	5,00		7,50
ubytování	2,00		3,00
sníh	0,85		1,28

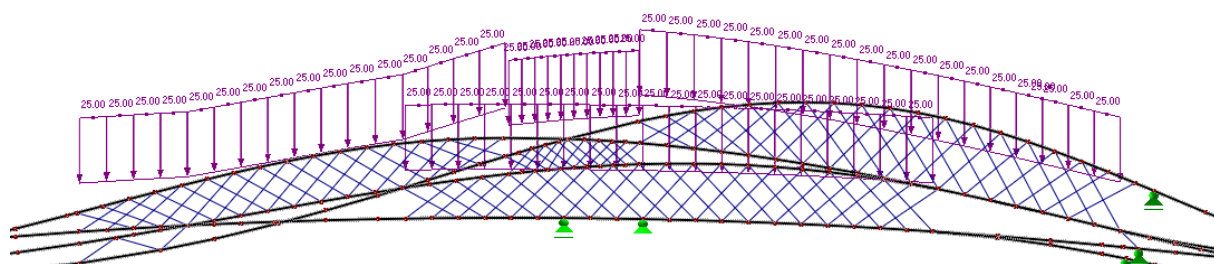
Zatěžovací stavy jsou:

- ZS1 vlastní tíha nosného skeletu (diagonály, podélné nosníky)
- ZS2 vlastní tíha konstrukce bublin (skořepiny)
- ZS3 vlastní tíha podlah
- ZS4 vlastní tíha konstrukce vložených pater
- ZS5 užitné zatížení
- ZS6 klimatická zatížení - sníh (účinky větru nezahrnuty)

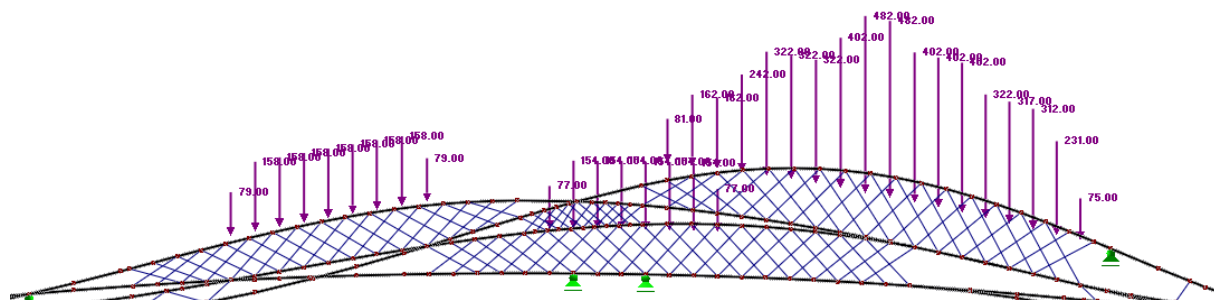
$$\text{KZS1} \quad 1.35 \times (\text{ZS1} + \text{ZS2} + \text{ZS3} + \text{ZS4}) + 1.50 \times (\text{ZS5} + \text{ZS6})$$



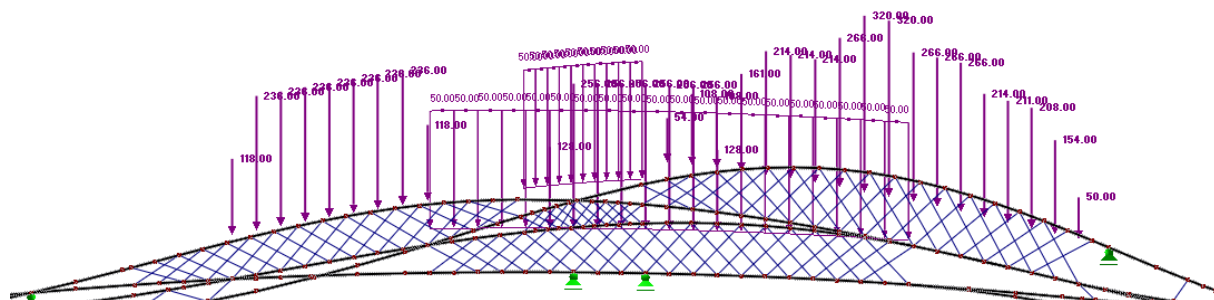
Obr. 13. ZS2 vlastní tíha konstrukce bublin (skořepiny)



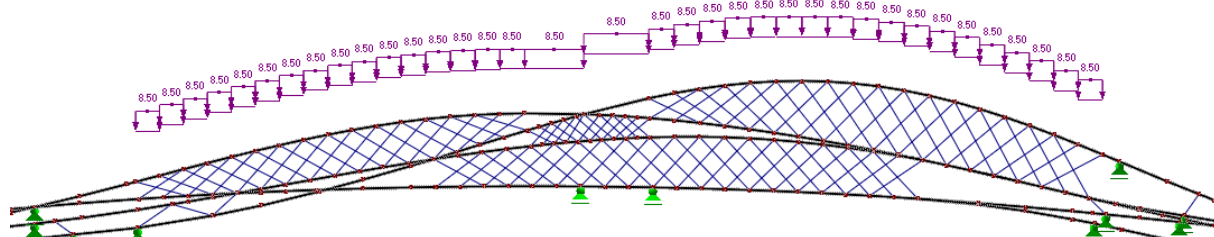
Obr. 14. ZS3 vlastní tíha podlah



Obr. 15. ZS4 vlastní tíha konstrukce vložených pater

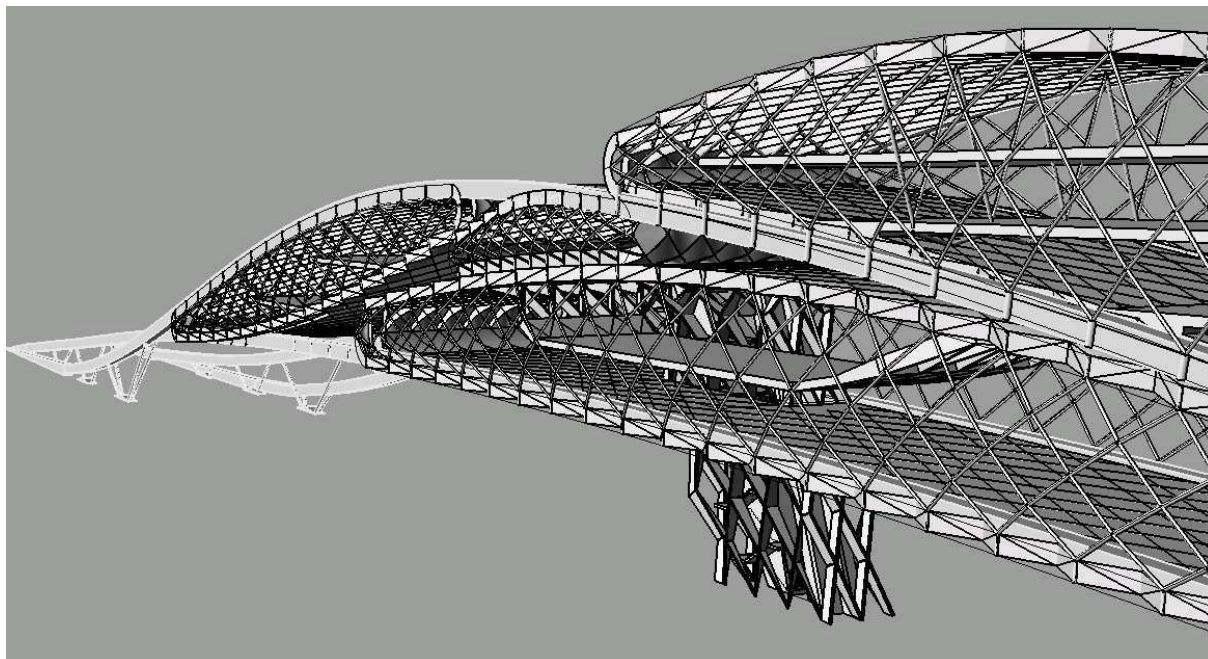


Obr. 16. ZS5 užité zátížení



Obr. 17. ZS6 klimatická zátížení - sníh

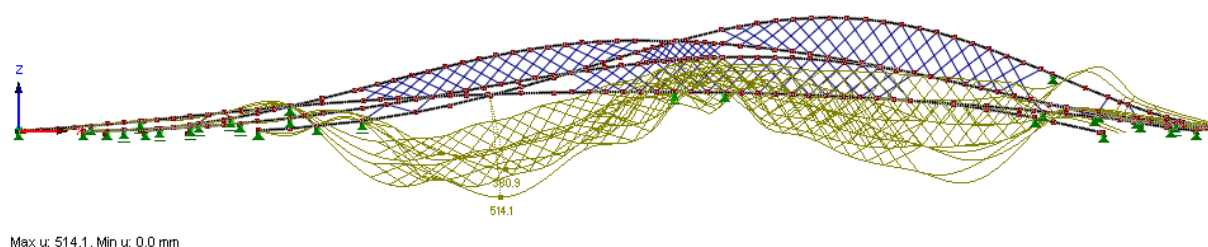
4.3.2 Výsledná doporučení



Obr. 18. Pohled na ztužení konstrukce

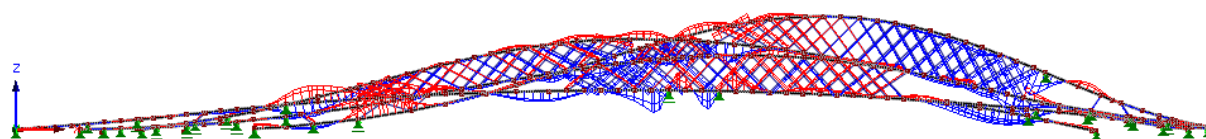
V případě této analýzy šlo především o zjištění maximálních hodnot vnitřních sil prutů a globálních posunů konstrukce, viz obr. 19-24. Přetvoření se vzhledem k celkovým rozměrům konstrukce ukázala být v přijatelných mezích. Co se týče průřezů jednotlivých prvků a odpovídajících vnitřních sil, jsou v konstrukci celé oblasti, kde využitelnost průřezů dosahuje pouze 20%. Naopak v určitých místech, hlavně v blízkosti podpor by bylo nutné průřezy ještě zvětšit, jelikož je zde využitelnost mnohdy i 2,5 krát překročena. Co se týče hlavních nosníků závěry mají obdobný charakter. Vhodnou volbou by byl proměnný průřez postupně se zužující směrem ke středu konstrukce. V místech podpor bude nutné navrhnout ztužení profilu hlavních nosníků. To lze docílit vložením bočních výztuh nebo zvětšením tloušťek přírub a stojin.

Deformace u
KZS1 - 1.35*ZS1/S + 1.35*ZS2/S + 1.35*ZS3/S + 1.35*ZS4/S + 1.5*ZS5 + 1.5*ZS8



Obr. 19. Svislé posuny od kombinace zatížení KZS1

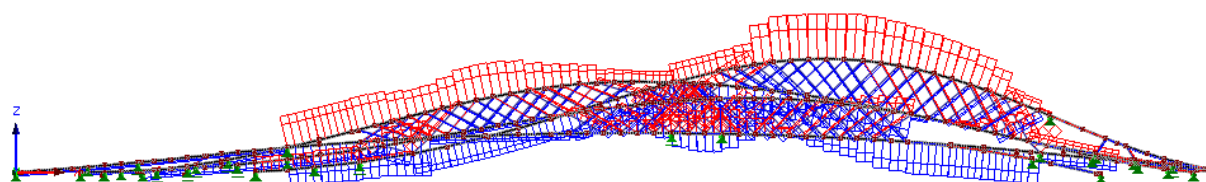
Deformace F_i-y
 $KZS1 - 1.35 \cdot ZS1/S + 1.35 \cdot ZS2/S + 1.35 \cdot ZS3/S + 1.35 \cdot ZS4/S + 1.5 \cdot ZS5 + 1.5 \cdot ZS8$



Max F_i-y : 32.7 , Min F_i-y : -24.7 mrad

Obr. 20. Natočení konstrukce od kombinace zatížení KZS1

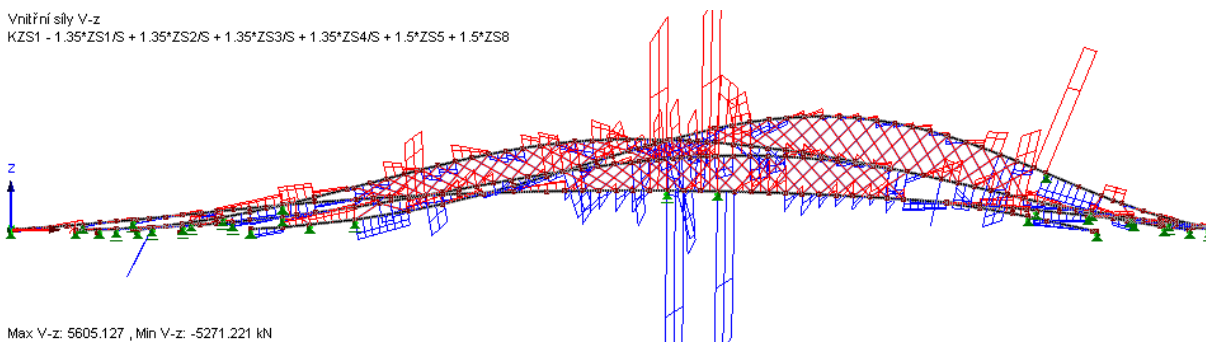
Vnitřní síly N
 $KZS1 - 1.35 \cdot ZS1/S + 1.35 \cdot ZS2/S + 1.35 \cdot ZS3/S + 1.35 \cdot ZS4/S + 1.5 \cdot ZS5 + 1.5 \cdot ZS8$



Max N: 24216.313 , Min N: -20780.896 kN

Obr. 21. Vnitřní normálové síly N od kombinace zatížení KZS1

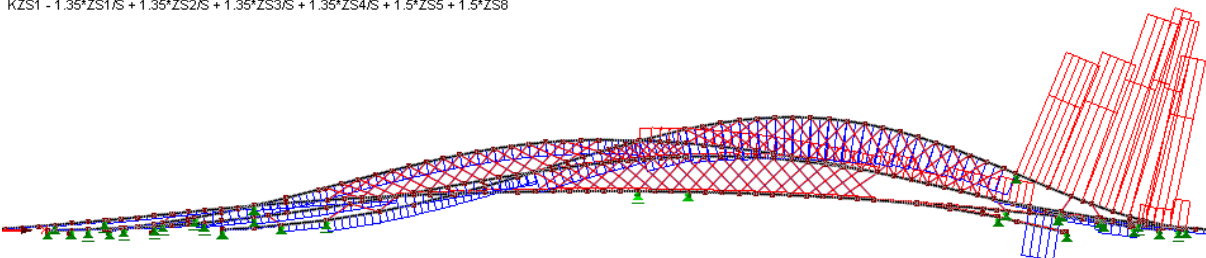
Vnitřní síly V-z
 $KZS1 - 1.35 \cdot ZS1/S + 1.35 \cdot ZS2/S + 1.35 \cdot ZS3/S + 1.35 \cdot ZS4/S + 1.5 \cdot ZS5 + 1.5 \cdot ZS8$



Max V-z: 5605.127 , Min V-z: -5271.221 kN

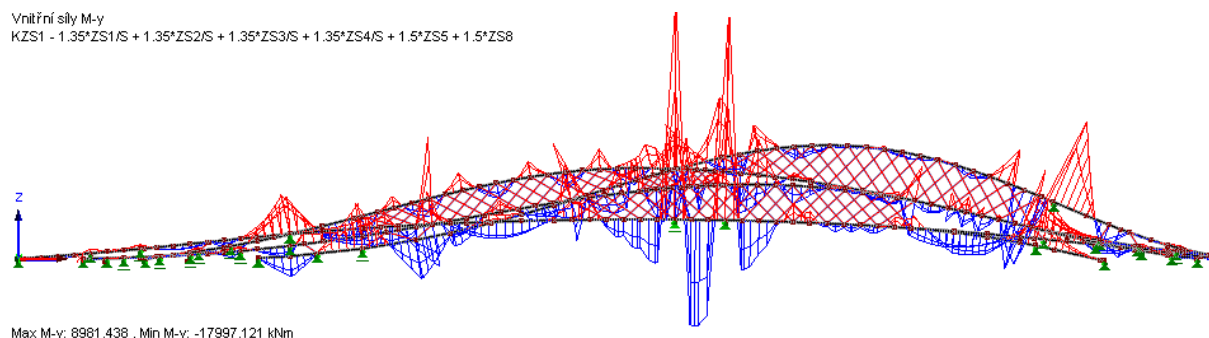
Obr. 22. Vnitřní posouvající síly Vz od kombinace zatížení KZS1

Vnitřní síly M-T
 $KZS1 - 1.35 \cdot ZS1/S + 1.35 \cdot ZS2/S + 1.35 \cdot ZS3/S + 1.35 \cdot ZS4/S + 1.5 \cdot ZS5 + 1.5 \cdot ZS8$



Max M-T: 0.000 , Min M-T: 0.000 kNm

Obr. 23. Krouťící moment Mt od kombinace zatížení KZS1



Obr. 24. Momentové účinky M_y od kombinace zatížení KZS1

5 Závěr a budoucí práce

Závěrem je nutné podotknout, že při modelování tvarově nestandardních konstrukcí s využitím statických programů je nutné dbát na pečlivou přípravu geometrie statického schématu. Častým problémem je výskyt chyb v návaznosti konstrukčních prvků. V případě jednoduchých konstrukcí o pár prvcích lze chyby většinou odstranit velmi rychle. Naopak u rozsáhlých konstrukcí a konstrukcí skládajících se z křivek není taková operace jednoduchá.

Výpočet ukázal a dal alespoň přibližný návod, jakou cestou se dát v případném detailním návrhu této konstrukce. Výpočty je třeba brát se značnou rezervou, jelikož zde nebyly zohledněny všechny možnosti, co tato konstrukce nabízí a potřebuje. Ovšem již nyní můžeme říci, že bude za určitých předpokladů proveditelná.

V budoucí práci by se dalo pokračovat například ve zdokonalení modelu, zavedením dalších zatížení od větru, dynamických zatížení nebo montážních zatížení. Vhodné by bylo vytvořit trojrozměrný model a prozkoumat potenciál případného předpětí.