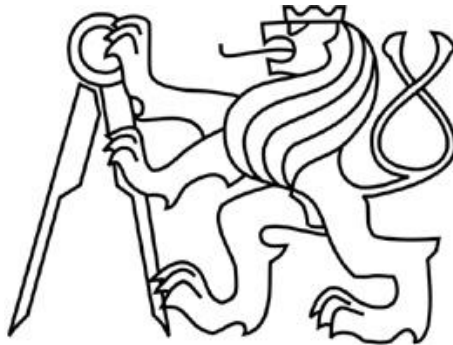


Projekt 3

Zastřešení sportovní haly založené na konceptu Leonardova mostu: statická analýza



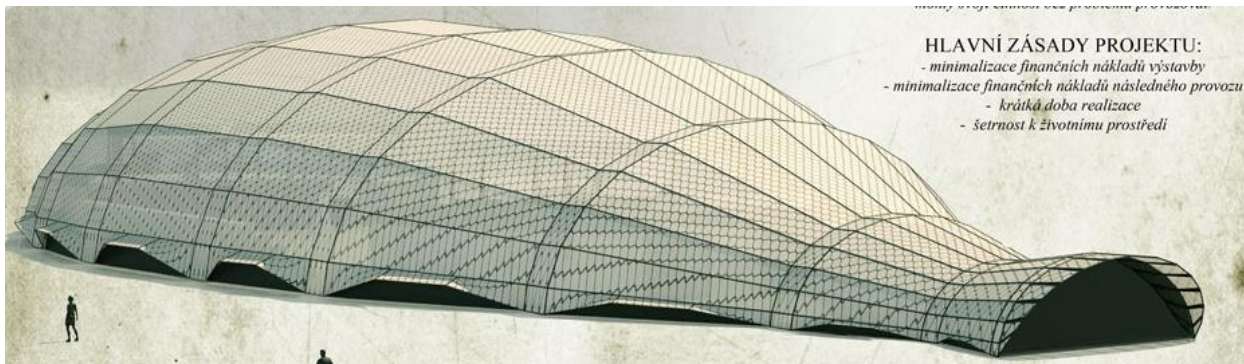
Vypracovala:	Bc. Karolína Mašková
Vedoucí projektu:	Doc. Ing. Jan Zeman, Ph.D.
Konzultace:	Ing. Ladislav Svoboda, Ph.D.
Místo:	Katedra mechaniky, fakulta stavební, ČVUT v Praze
Datum:	30.1.2013

OBSAH

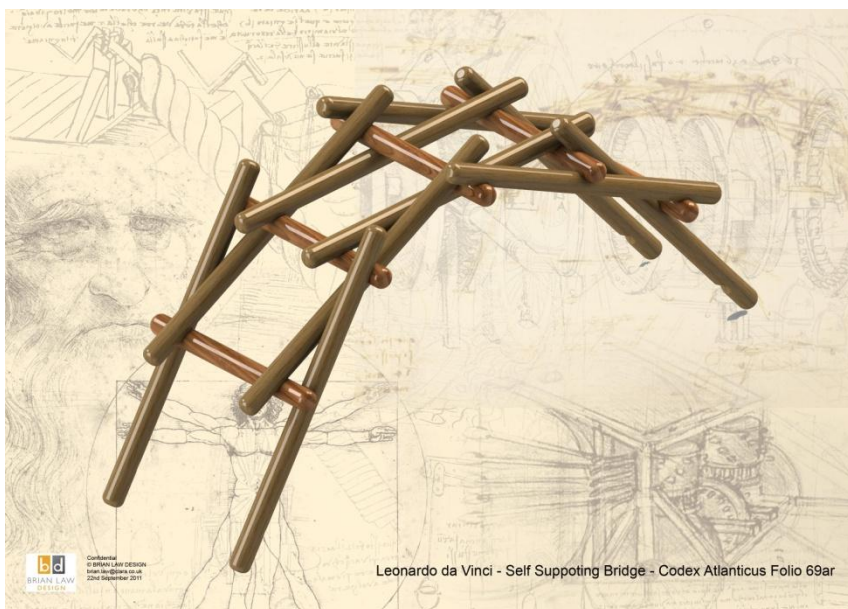
Úvod	3
Statický model.....	4
Donkey.....	4
Teorie pružnosti.....	5
Dřevěné konstrukce.....	6
Zatížení.....	7
Vlastní tíha	7
Střešní plášť	7
Zatížení sněhem.....	7
Shrnutí vstupních parametrů konstrukce	8
Skript.....	9
Vstupní parametry	9
Výstup.....	10
Vlastní návrh tvaru konstrukce	11
Postup.....	11
Vliv tvaru oblouku na chování konstrukce.....	11
Vliv počtu segmentů na chování konstrukce.....	13
Dolní prut	13
Spojovací prostředky.....	14
Vyhodnocení dat	14
Ruční výpočet	15
Scia Engineer	15
Závěr	18
Zdroje.....	19
Obrázky.....	19
Příloha 1.....	20

ÚVOD

Tato práce si klade za cíl prozkoumat chování obloukové nosné konstrukce v závislosti na tvaru oblouku a rozměrech jednotlivých prvků a vybrat optimální řešení. Pro posuzování byl vybrán objekt studie studenta fakulty architektury Martina Císaře – Městská sportovní hala v Kutné Hoře [1].



Nosnou konstrukci haly tvoří vždy dvojitá dřevěná oblouková konstrukce ve stylu mostu Leonarda da Vinci (princip viz obrázek 1). Pro zvolený nosný oblouk byla provedena optimalizace tvaru v programu Rhinoceros s využitím platformy Grasshopper. Následně byl pro vybranou variantu proveden ruční výpočet a porovnání výsledků s programem Scia Engineer.



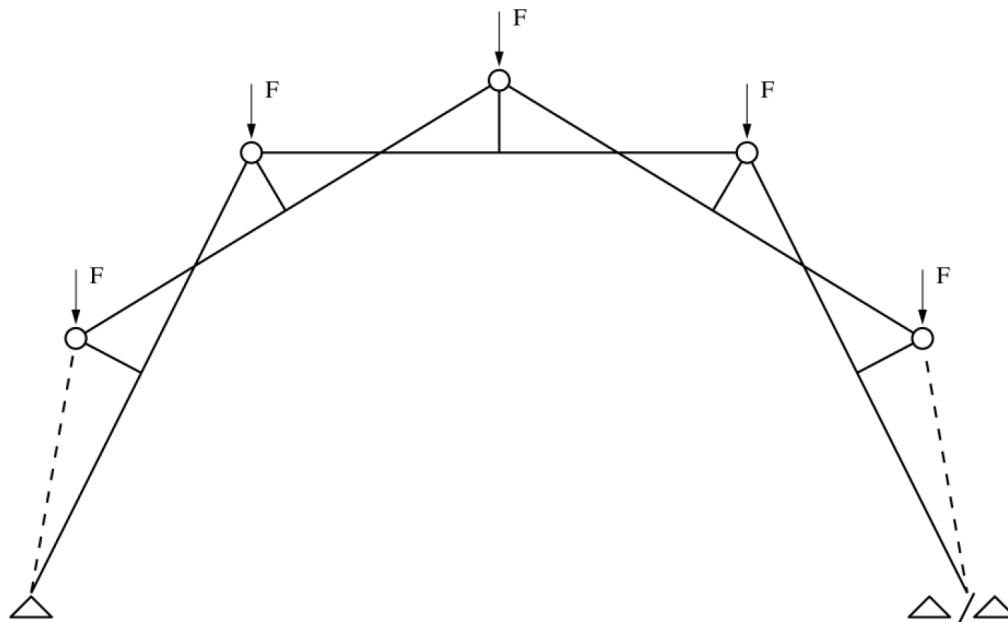
OBRÁZEK 1

V následujících kapitolách budou představeny použité programy a vysvětlení teorie, podle které byl proveden výpočet. Konkrétní naznačení postupu výpočtu, který provádí program na pozadí, je uvedeno v kapitole Ruční výpočet. Srovnáním výsledků s jiným statickým programem se zabývá kapitola Scia Engineer. Samostatné kapitoly se zabývají specifiky návrhu dřevěných konstrukcí, stanovení zatížení a práce se skriptem, vytvořeným pro tuto konstrukci. Jádrem práce je pak vyhodnocení chování konstrukce a doporučení pro návrh.

STATICKÝ MODEL

Konstrukce je modelována jako rovinná, tvořená pruty, které jsou spojeny klouby (viz obrázek). Původní návrh od Leonarda da Vinci naznačuje model bez čárkovaně znázorněných prutů, zabývá se totiž spíše ideou bezespojové konstrukce, ne otázkou statickou. Ze statického hlediska je takový model neefektivní (viz Dolní prut), pro konstrukci optimalizovanou v této práci je tedy využito modelu včetně čárkovaně znázorněných prutů. Konstrukce je podepřena kloubově, neposuvně.

Průřez prutů je obdélníkový. Konstrukce je dřevěná (viz Dřevěné konstrukce). Zatížení modelováno rovnoměrně spojitě, s působišti ve stycích (viz Zatížení).



OBRÁZEK 2

DONKEY [2]

Donkey je plug-in pro prostředí Grasshopper grafického programu Rhinoceros 3D. Donkey rozšiřuje možnosti Grasshopperu, jenž umožňuje okamžitou zpětnou vazbu z programů pro výpočty metodou konečných prvků. To je výhodné pro architekty i designéry, mohou si tak totiž už v prvních fázích vývoje projektu dělat představu o proveditelnosti z hlediska statického.

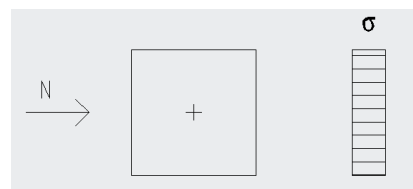
V tomto programu byl vytvořen skript modelující jeden oblouk „Leonardova mostu“. Pomocí jednoduchých vstupů (viz Vstupní parametry) je optimalizován tvar konstrukce. Jako výstup Donkey poskytuje vnitřní síly, míru využití průřezu a průhyby.

TEORIE PRUŽNOSTI

Konstrukce je řešena jako rovinná. Níže popsaná použitá teorie je založená na tom, že hodnota mezního využití v tahu i tlaku je stejná.

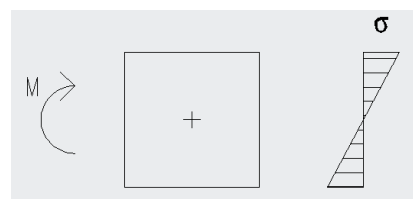
Tah/tlak

$$\sigma = \frac{N}{A}$$



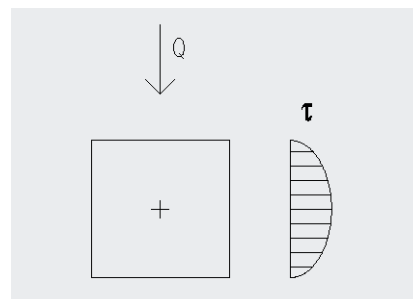
Ohyb

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} \quad (\text{pro obdélník})$$



Smyk

$$\tau_{max} = \frac{Q \cdot S_y}{b \cdot I_y} = \frac{3}{2} \frac{Q}{b \cdot h} \quad (\text{pro obdélník})$$



Pro každý bod průřezu lze sečíst napětí od normálové síly a od ohybu podle:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z$$

Podle teorie o chování pružnoplastického materiálu [4] se vypočítá ekvivalentní napětí v bodě:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij}s_{ij}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Pro rovinnou konstrukci zjednodušeno na:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} (2\sigma_x^2 + 6\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}}$$

Takto získané návrhové napětí program porovná se zadanou hodnotou pevnosti (f) ve smyslu:

$$\frac{\sigma_{eq}}{f}$$

Tato hodnota znázorňuje míru využití průřezu v elastickém režimu (dále jen „využití průřezu“). Hodnotou vyšší než jedna je označen problematický průřez, na hranici použitelnosti.

DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE

Posuzovaná konstrukce je navržena jako dřevěná, pro účely této práce z lepeného lamelového dřeva třídy SA. Dřevo se vyznačuje svým ortotropním chováním. V ČSN EN 1995-1-1 je uvedena pevnost v ohybu, smyku a tlaku a tahu kolmo k vláknům a rovnoběžně s vlákny.

Tabulka 1.2 Doporučené hodnoty charakteristických pevností a modulů pružnosti v MPa a charakteristických hustot v kg/m ³ pro lepené lamelové dřevo			
Způsob namáhání	označ.	Třída pevnosti	
		SA	SB
Ohyb	$f_{m,g,k}$	24,0	20,0
Tah	$f_{t,0,g,k}$	17,0	15,0
	$f_{t,90,g,k}$	0,45	0,35
	$f_{c,0,g,k}$	24,0	21,0
Tlak	$f_{c,90,g,k}$	5,5	5,0
Smyk	$f_{v,g,k}$	4,0	2,7
Modul pružnosti E	$E_{0,mean,g}$	11 000	10 000
	$E_{0,05,g}$	8 800	8 000
	$E_{90,mean,g}$	360	330
	$E_{90,05,g}$	280	260
Modul pružnosti G	$G_{mean,g}$	680	620
	$G_{05,g}$	540	490
Hustota	$\rho_{g,k}$	400	370

Pro posouzení výše uvedeným způsobem bylo nutné stanovit jednu hodnotu pevnosti. Coby oblouková, je konstrukce namáhána především tlakem rovnoběžně s vlákny a ohybem. S přihlédnutím k ostatním pevnostem byla hodnota „typické“ charakteristické pevnosti stanovena jako $f_k = 20$ MPa.

Při posuzování dřevěných konstrukcí na mezní stav únosnosti je podle ČSN EN 1995-1-1 nutné uvažovat specifické součinitele upravující vlastnosti materiálu:

- γ_M - dílčí součinitel vlastnosti materiálu, pro dřevo v základní kombinaci $\gamma_M = 1,25$
- k_{mod} - modifikační součinitel zohledňující účinek délky trvání zatížení a vlhkosti na parametry pevnosti
 - pro třídu vlhkosti 1 a 2, rostlé a lepené lamelové dřevo, stálé zatížení $k_{mod} = 0,6$ a krátkodobé zatížení (sníh) $k_{mod} = 0,9$

Striktně vzato, oba tyto součinitele mají být zohledněny v návrhové pevnosti, ve smyslu:

$$X_d = k_{mod} \cdot X_k / \gamma_M,$$

jelikož je však k_{mod} závislý na délce trvání zatížení, byly pro jednoduchost oba součinitele zahrnuty do výpočtu zatížení (viz kapitola Zatížení).

Pro mezní stav použitelnosti má být posouzen průhyb a kmitání. Při optimalizaci tvaru pro mě byla hodnota průhybu jedním z hlavních ukazatelů efektivity konstrukce. Požadavek na okamžitý průhyb od charakteristických hodnot nahodilého zatížení ČSN EN 1995-1-1 je $u_{inst} \leq \frac{l}{300}$. Konstrukce je navrhována pro minimální rozpětí 35,5 m a minimální výšku 13 m. Tyto požadavky plynou z architektonického návrhu. Limitní průhyb je tedy $u_{inst} \leq 117$ mm. Konečný průhyb $u_{fin} = u_{inst}(1 + k_{def}) \leq \frac{l}{200}$, kde $k_{def} = 0$ pro krátkodobé zatížení a $k_{def} = 0,8$ pro stálé zatížení ve třídě vlhkosti 2. Konečný průhyb v případě této konstrukce nemá rozhodující vliv.

ZATÍŽENÍ

Při řešení konstrukce je uvažováno zatížení stálé – vlastní tíha konstrukce a střešního pláště. Dále zatížení proměnné – sněh, a to rovnoměrně působící. Není uvažováno užité zatížení ani zatížení větrem.

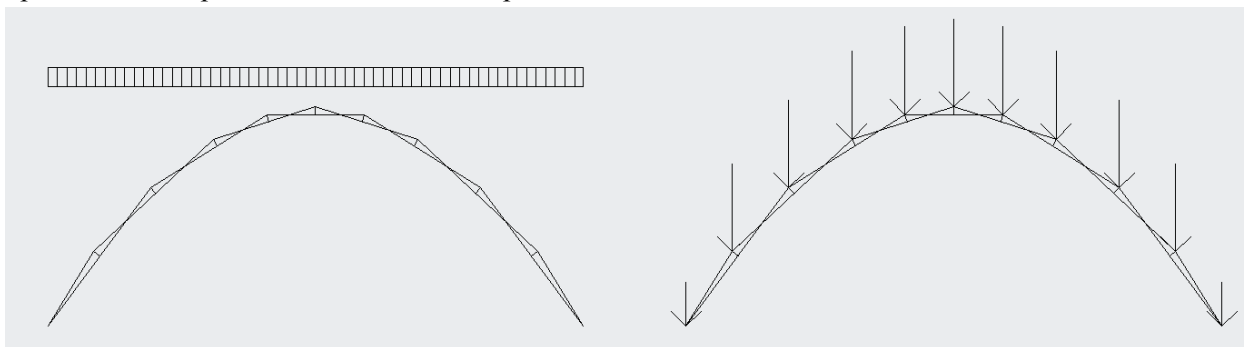
VLASTNÍ TÍHA konstrukce je ve skriptu počítána automaticky pomocí objemu použitého materiálu ze zadané hustoty.

STŘEŠNÍ PLÁŠŤ je dle architektonického návrhu tvořen fóliovým systémem ETFE, jehož hmotnost včetně nosné konstrukce je $3\text{--}7\text{ kg/m}^2$ [5,6]. Za předpokladu nejvyšší udávané hmotnosti 7 kg/m^2 , součinitele zatížení $\gamma_G = 1,35$ a působící šířky $7,5\text{ m}$ by návrhové zatížení bylo $g_{d,0} = 7 \cdot 1,35 \cdot 7,5 = 70,88\text{ kg/m}$. V této fázi je ovšem nutno ještě zahrnout výše uvedené součinitele pro dřevěné konstrukce (viz kapitola Dřevo). Návrhové zatížení je tedy $g_d = \frac{70,88 \cdot 1,25}{0,6} = 147,67 \approx 150\text{ kg/m}$.

ZATÍŽENÍ SNĚHEM pro oblast Kutné Hory a daný tvar konstrukce je přibližně $s = c_e \cdot c_t \cdot s_k \cdot \mu_i = 0,75 \cdot (0,8 + 0,2) = 0,75\text{ kN/m}^2$. Skript ovšem vyžaduje vložení zatížení v kg/m , tedy $s = \frac{0,75}{9,81} = 76,45\text{ kg/m}^2$. Po zahrnutí všech součinitelů ($\gamma_Q = 1,5$, ostatní viz kap. Dřevo) a působící šířky tak: $q_d = 76,45 \cdot 1,5 \cdot \frac{1,25}{0,9} \cdot 7,5 = 1194,5\text{ kg/m}$.

Jako plné návrhové zatížení označme součet zatížení tíhou střešního pláště a zatížení sněhem $f_d = g_d + q_d = 150 + 1194,5 = 1344,5 \approx 1400\text{ kg/m}$.

TVAR zatížení, jak je zadáváno a vyhodnoceno skriptem je znázorněn na dalším obrázku. Zadává se jednočíselná hodnota spojitého zatížení, která je pak rozpočítána do působících sil. Toto řešení je v pořádku pro zatížení sněhem, neboť právě tak je toto zatížení modelováno podle ČSN EN 1991-1-3. Pro zatížení střešním pláštěm však dochází k určité chybě. Ve fázi předběžné analýzy je tato chyba přijatelná, s přihlédnutím k poměru zatížení střešním pláštěm a sněhem zanedbatelná.



SHRNUTÍ VSTUPNÍCH PARAMETRŮ KONSTRUKCE

Tvar konstrukce		
	rozpětí	min 35,5 m
	vzepětí	min 13 m
	vzdálenost dvojic oblouků	15 m
Materiálové charakteristiky		
	typická pevnost f_k	20 MPa
	modul pružnosti $E_{0,mean}$	11 000 MPa
	hustota ρ	400 kg/m ³
	Poissonovo číslo ν	0,3
Zatížení		
	vlastní tíha	400 kg/m ³
	střešní plášť g_d	150 kg/m
	plné f_d	1400 kg/m

SKRIPT

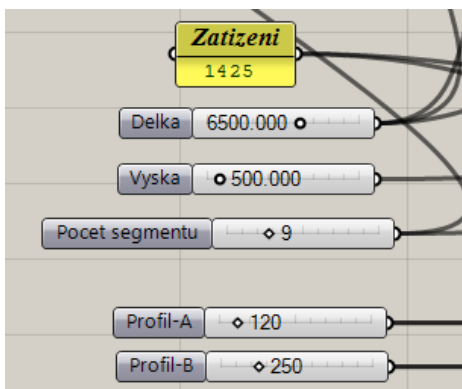
Skript vytvořený pro modelování konstrukce je znázorněn na obrázku vpravo. Vlevo vidíme grafické znázornění konstrukce, vykreslené programem Rhino.



VSTUPNÍ PARAMETRY

Donkey umožňuje zvolit materiál z nabídky, v tomto případě jsem ale zadala „vlastní materiál“ pomocí parametrů uvedených ve shrnující tabulce výše.

Základní vstupní parametry pro návrh konstrukce jsou znázorněny na dalším obrázku.



Zatížení zadáváno v kg/m

Délka značí referenční délku prutu v mm.

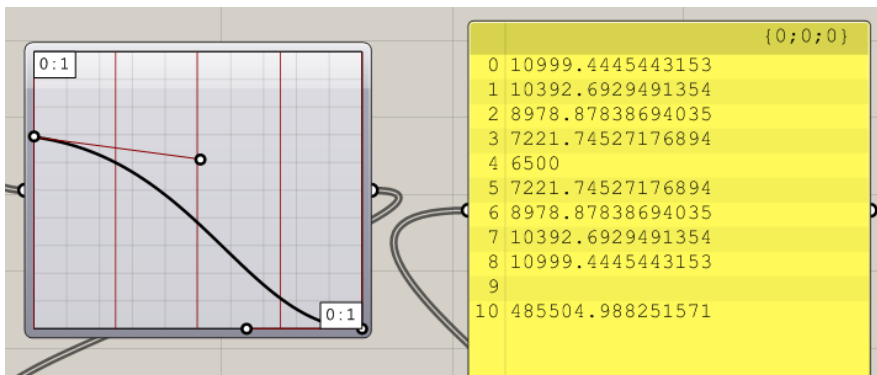
Výška je výška příčného trámku v mm (v kroužku).

Počet segmentů znamená počet „T“ komponent po délce oblouku (červená).

Profil A je šířka profil B výška průřezu trámu v mm.



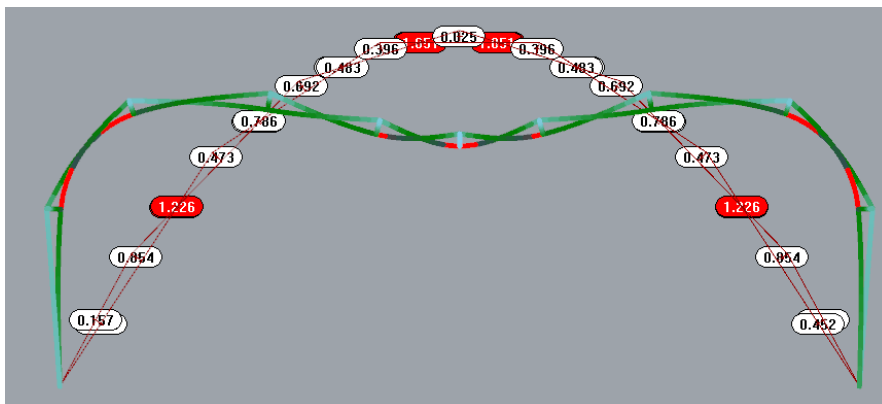
Zásadním parametrem pro návrh konstrukce se stal tvar křivky. Skript umožňuje modelovat oblouk z různě dlouhých prutů pomocí nástroje zobrazeného na dalším obrázku. Vlevo je modelován tvar křivky. Žlutá tabulka vpravo je výpis délek konkrétních prutů.



VÝSTUP

Výstupní parametry jsou především rozpětí oblouku, vzepětí (tedy výška oblouku), průhyb a objem spotřebovaného materiálu.

Průhyb je možno sledovat v číselném a zároveň grafickém vyjádření, což je velmi praktické při optimalizaci tvaru konstrukce.



Rozpeti	
{0;0}	
0 36086.994858	
Vzepeti	
{0;0}	
0 14337.375558	

Čísla v bílých oválech jsou hodnotou znázorňující míru využití konstrukce $\frac{\sigma_{eq}}{f}$.

VLASTNÍ NÁVRH TVARU KONSTRUKCE

POSTUP

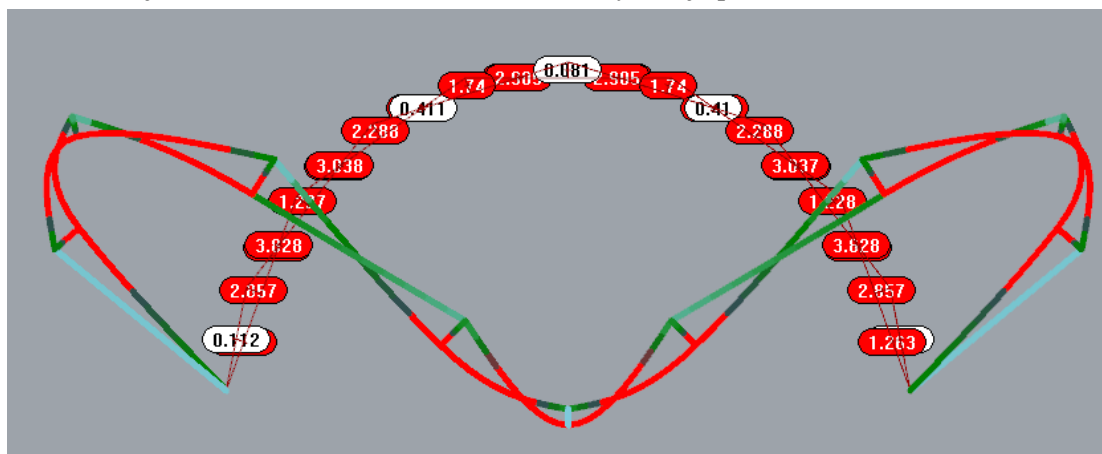
Po zadání materiálových charakteristik pro lepené lamelové dřevo třídy SA včetně „typické“ hodnoty pevnosti byl vždy pro určitý počet segmentů modelován takový tvar, aby splňoval hodnoty minimálního rozpětí a výšky oblouku za co nejmenšího průhybu a spotřeby materiálu. Napětí v žádném průřezu nepřekročilo mez využití.

Tvar a hodnota průhybu byla sledována jak pro zatížení stálé, tak pro „plné“ (viz kap. Zatížení). Porovnáním objemů spotřebovaného materiálu bylo získána nejefektivnější řešení.

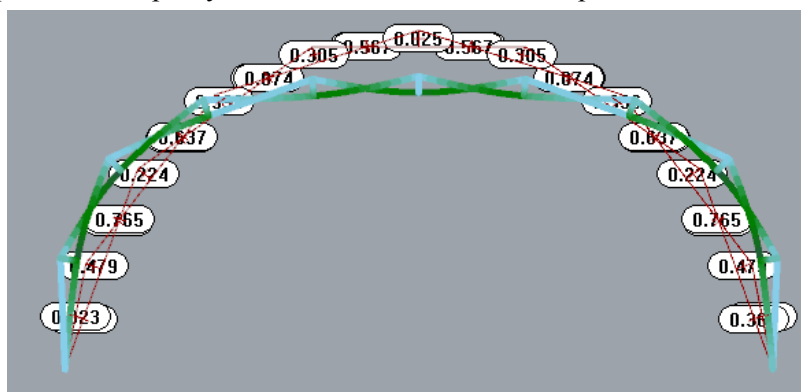
VLIV TVARU OBLOUKU NA CHOVÁNÍ KONSTRUKCE

Bylo zjištěno, že je výhodné, když pruty ve vrcholu jsou kratší a postupně směrem k uložení se prodlužují. Spíše než kruhovému oblouku se tak tvar blíží části elipsy. Na dalších obrázcích je zobrazena konstrukce z 9 segmentů, při výšce 500mm, referenční délce prutu 6500mm, plném zatížení. Srovnávací průřez je 120x250mm. Průhyb je 20x zvětšen.

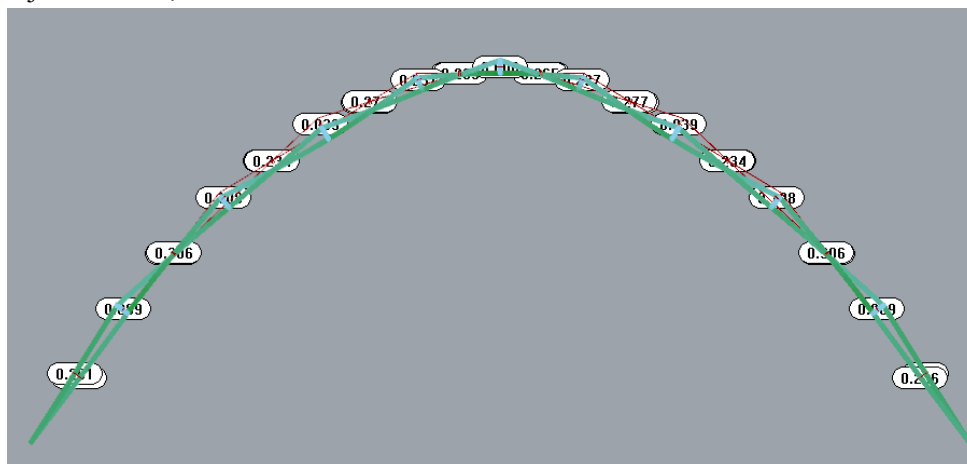
První obrázek ukazuje konstrukci sestavenou ze stejně dlouhých prutů (tedy 6500mm). Je tak dosaženo rozpětí 21,6m, vzepětí 10,3m, maximálního průhybu 546mm při objemu spotřebovaného materiálu 2m³. Je zjevné, že takto navržená konstrukce nevyhovuje požadavkům.



Zde je tatáž konstrukce. Průřez byl zvětšen na 250x400mm, tak aby bylo dosaženo dostatečné pevnosti a zároveň splněn limitní průhyb. Tím se však dostáváme na spotřebu téměř 7m³ dřeva.

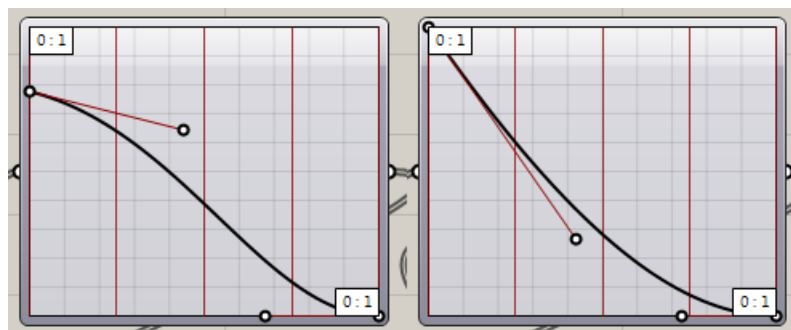


Další obrázek zobrazuje původní konstrukci po optimalizaci tvaru, resp. vhodné úpravě délek prutů. Nejnižší pruty jsou nejdelší (12m), délka v tomto případě přibližně lineárně klesá až na referenčních 6,5m pro vrcholový prut. Je dosaženo rozpětí 36,5m, vzepětí 14,8m, maximálního průhybu 20mm a objemu dřeva 3,05m³.



Z této ukázky je zřejmé, jak velký vliv má volba správného tvaru oblouku. Prostou změnou oblouku z kruhového na „optimalizovaný“ bylo dosaženo méně než poloviční spotřeby materiálu a o polovinu většího vzepětí i rozpětí.

Jako velmi efektivní se ukázaly tvary, které jsou dále znázorněny pomocí „tvarovacího nástroje“ z Donkey.



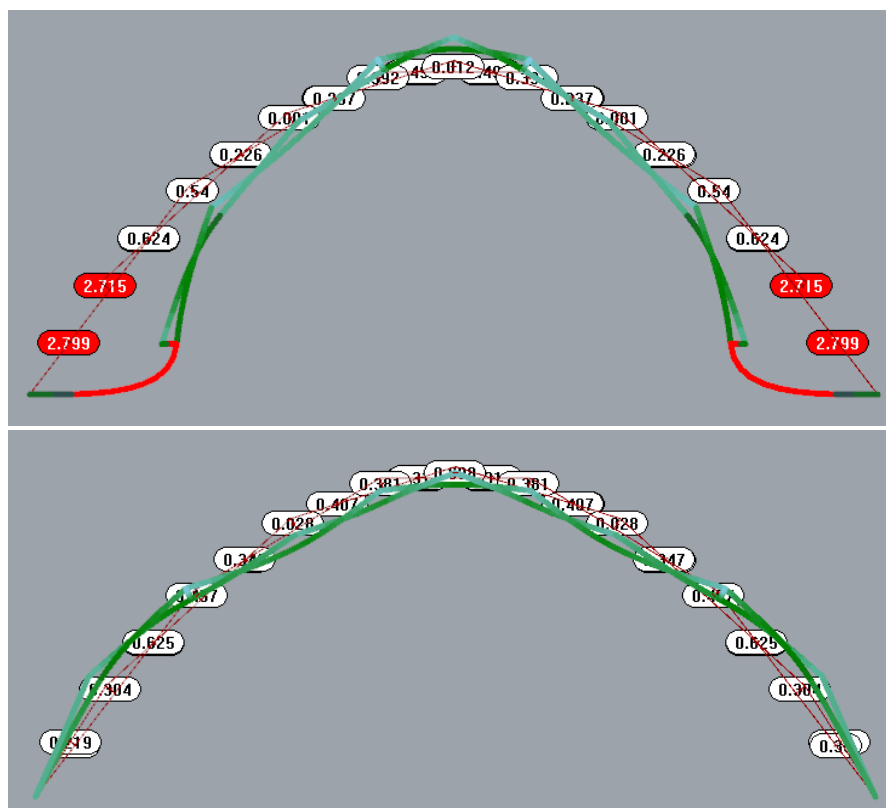
Parametry výška a délka jsou do jisté míry dány požadovaným minimálním vzepětím a rozpětím oblouku. Při optimalizaci byla snaha získat vhodnou kombinaci výška-délka z hlediska hospodárnosti. Autor studie sám původně provedl jistou optimalizaci, a tak jsou tyto požadavky ve vzájemném souladu. Jinými slovy poměr (architektem) požadovaného vzepětí-rozpětí je pro tento typ konstrukce velmi vhodný a při výrazné změně tohoto poměru je návrh nevhodný.

VLIV POČTU SEGMENTŮ NA CHOVÁNÍ KONSTRUKCE

Při vyšetřování nejvhodnějšího počtu segmentů tvoří dolní hranici opět požadované rozpětí a vzepětí. Pro dosažení těchto požadavků je potřeba minimálně 7 segmentů. Větší počet segmentů navrhovaný na tytéž požadavky znamená menší délku prutů a s tím i menší výšku. Konstrukce se tím stává citlivější na přesné tvarování oblouku a reaguje výrazněji na změnu zatížení. Spolu s faktem, že se tím i zvyšuje počet spojů a tedy pracnost, není vhodné navrhovat konstrukci s příliš mnoha segmenty. Všestranně výhodné je využití devíti až čtrnácti segmentů.

DOLNÍ PRUT

V původním návrhu je konstrukce modelována s jedním prutem v uložení (viz Statický model). V jediném podporovém prutu pak ale vzniká výrazně větší napětí (srovnej následující obrázky – průhyb 20x zvětšen). Aby konstrukce napětí přenesla, bylo by nutné zvětšit průřez prutu. Konstrukce je modelována jako stálého průřezu, takže by došlo ke zbytečnému nárůstu spotřeby materiálu. Problém by mohl být případně řešen lokálními přílozkami nebo zesílením pouze spodního prutu. Jiná možnost je nejspodnější prut zkrátit, čímž by se eliminoval negativní dopad na konstrukci. Celkově efektivnější ale je konstrukci řešit přidáním dalšího prutu. Model „bez dolního prutu“ tedy nebyl dále uvažován.



SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

Geniálnost původní konstrukce navržené Leonardem da Vincim spočívá mimo velké efektivnosti také v tom, že může být postavena bez využití spojovacích prostředků. Tak, jak konstrukci modelujeme, ale v příčných trámcih někde vznikají malé tahy, v řádu jednotek kN. Znamená to, že spojovací prostředek je v takovém místě nutný. Tyto tahy by byly eliminovány, kdyby byl konstrukci umožněn posun v podpoře, což ale není technicky praktické. A v tomto případě ani ekonomicky výhodné, neboť spojovací prostředky jsou nutné i z konstrukčních důvodů.

VYHODNOCENÍ DAT

Při uvažování výše uvedených poznatků bylo několik variant návrhu vyhodnoceno jako nejlepších. Nutno říci, že na zvolení určité varianty by se podílela další hlediska, jako například jednoduchost výroby, názor investora a architekta, atd. Níže uvedené varianty jsou vybrány jako nejvýhodnější ze statického hlediska.

Var.	Počet segm entů	Výška [mm]	Délka [mm]	Parametry křivky*	Rozpětí/ vzepětí [m]/[m]	Průhyb pro plné zatížení [mm]	Průhyb pro stálé zatížení [mm]	Objem mat. [m ³]
1	9	500	6500	0,72/0,67/0,43/0,09/0	35,5/14,4	34,8	8,8	2,98
2	10	400	6000	0,77/0,64/0,41/0,16/0	35,6/14	24,7	9,0	2,95
3	11	350	5500	0,9/0,74/0,51/0,25/0,06/0	36,5/15,1	27,9	8,5	3,07
4	12	300	5000	1/0,84/0,6/0,31/0,09/0	35,5/15,5	22,1	11,7	3,06
5	13	250	4500	0,92/0,84/0,70/0,54/0,36/0,17/0	38,3/14,2	61,8	11,2	3,06
6	14	200	4500	1/0,71/0,46/0,25/0,10/0,02/0	35,7/14,1	28,8	12,7	2,93

*křivku v programu vidíme znázorněnou graficky, pomocí „hodnot“ a pomocí délek jednotlivých prutů – „hodnoty“ jsou numerickým znázorněním grafu „tvaru“ a (1+hodnota)*referenční délka prutu = návrhová délka prutu

RUČNÍ VÝPOČET

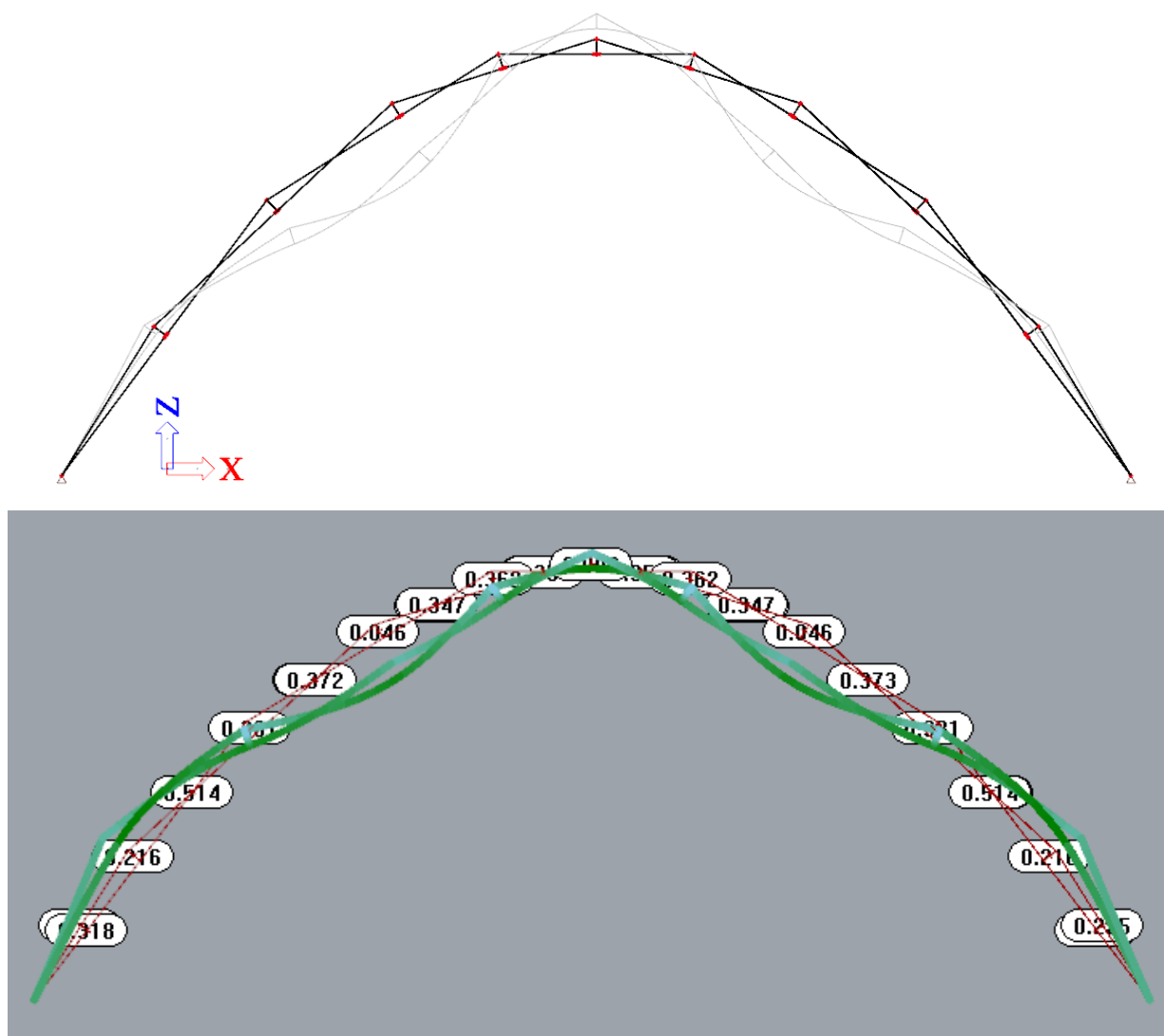
Pro názorné předvedení postupu výpočtu, který provádí program na pozadí byl pro jeden průřez tento výpočet simulován ručně. Z hodnot vnitřních sil vypočtených pomocí Donkey bylo stanoveno maximální napětí v průřezu. Poměr tohoto napětí a stanovené pevnosti je míra využití průřezu. Vypočtená hodnota byla porovnána s hodnotou vypočtenou programem a zjištěno, že jsou totožné. Ruční výpočet byl tedy skutečně proveden v souladu s postupem programu. Výpočet viz Příloha 1.

SCIA ENGINEER

PRŮHYB A VNITŘNÍ SÍLY

Pro modelování konstrukce ve Scia Engineer bylo využito stejného statického modelu, zatížení i materiálových charakteristik. Srovnání bylo provedeno opticky (průhyb) a zároveň porovnáním číselných hodnot průhybu a vlastních sil ve zvolených uzlech.

První obrázek je grafický výstup deformací ze Scia Engineer, druhý z Rhino. Je vidět, že průhybová čára se v obou případech chová podobně.



Výpis číselných hodnot vektoru přemístění [mm] a vnitřních sil vybraných entit [kN, kNm].

Uzel*	Scia vektor x	Rhino vektor x	Scia vektor z	Rhino vektor z
Vrcholový (5T)	-0,11	-0,1	3,0	2,7
3T	14,2	12,7	-28,7	-31,5
1T	-18,2	-20,6	9,3	10,4

*T značí segment, číslováno zdola zleva (tj.5T je vrcholový), v každém segmentu porovnáván vždy horní uzel

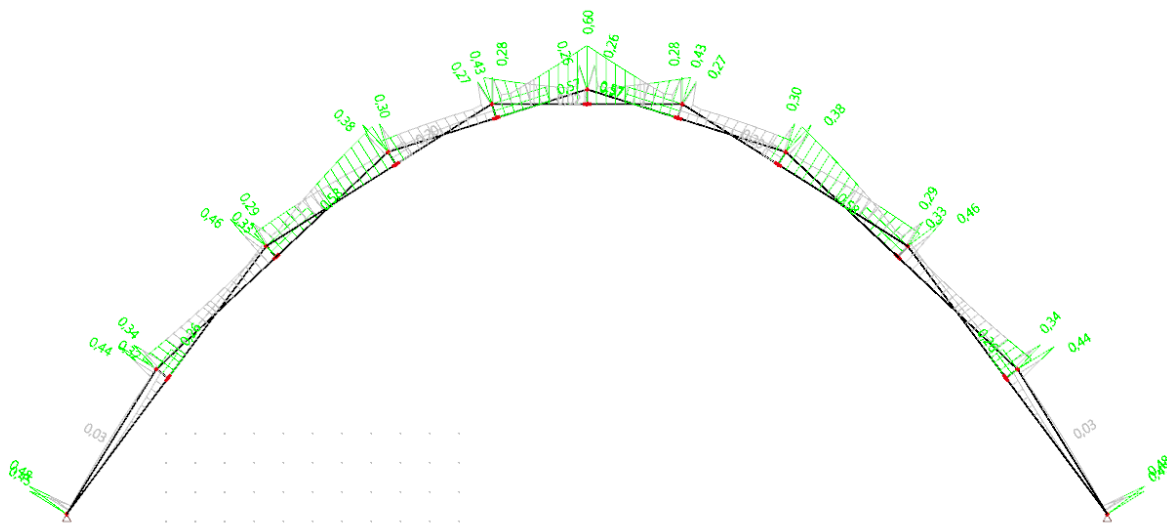
Prut**	Scia N	Rhino N	Scia V	Rhino V	Scia M	Rhino M
Vrcholový (5T)	-91,50	-88,61	2,82	2,53	8,11	7,24
3T	-95,75	-84,78	1,17	0,97	6,35	6,04
1T	-159,94	-149,25	1,37	1,41	5,5	6,50

**T značí segment, číslováno zdola zleva (tj.5T je vrcholový), v každém segmentu porovnávány vyšší hodnoty vstupující do dolního uzlu

Rozdíl mezi vypočtenými hodnotami je většinou do deseti procent, což je při použití různých přístupů k teorii pružnosti a odlišných diskretizací metody konečných prvků přijatelná chyba. Předpokládáno bylo dosažení chyby menší, cca do pěti procent. Tento nárůst je pravděpodobně způsoben mírně odlišným modelováním zatížení.

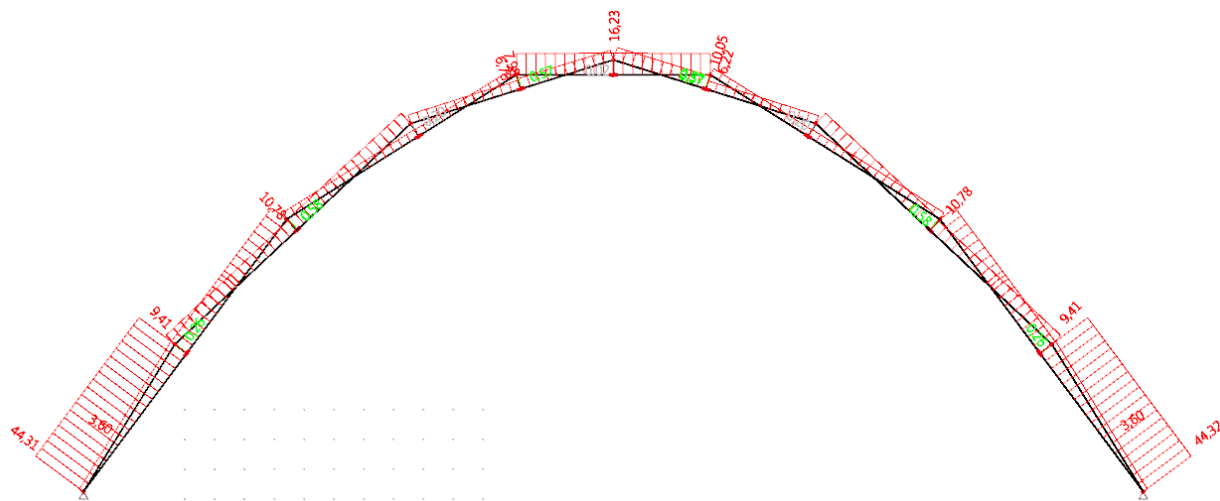
PEVNOST

Posouzení pevnosti je v obou programech znázorněno hodnotou míry využití průřezu. Hodnoty získané z těchto dvou programů za daných podmínek si vzájemně odpovídají.



STABILITA

Posouzení stability není programem Donkey provedeno. Z posouzení pomocí programu Scia Engineer vyplývá, že zvolený průřez nevyhoví. Je nutné vzít v úvahu, že konstrukce je podepřena v příčném směru a tato skutečnost není v modelu zohledněna. Pro posouzení stability by tedy bylo potřeba upravit model konstrukce. I přesto je možné, že by průřez nevyhověl. V takovém případě by bylo nutné zvětšit průřez.



ZÁVĚR

Pro obloukovou konstrukci na motivy mostu Leonarda da Vinci byla provedena optimalizace. Bylo zjištěno, že konstrukce může být při správném tvarovém řešení velmi efektivní a na relativně velké rozpětí stačí malé průřezy prutů. Touto předběžnou analýzou bylo vyhodnoceno několik vhodných variant doporučených k podrobnému návrhu, do něhož by musel být zahrnut i návrh na zatížení větrem a požárem. Bylo předvedeno, že výsledky stanovené pomocí Donkey jsou srovnatelné s výsledky z programu Scia Engineer.

ZDROJE

- [1] <http://www.studioflorian.com/projekty/171-martin-cisar-mestska-sportovni-hala-v-kutne-hore>
- [2] <http://donkey.igend.cz/>
- [3] <http://midas.igend.cz/>
- [4] Bittnar, Z., Šejnoha, J.. *Numerické metody mechaniky*. Vyd.1. Praha: ČVUT, 1992.
- [5] <http://www.archtex.cz/cs/index.html>
- [6] <http://www.earch.cz/clanek/5123-princip-foliovych-fasad-vlastnosti-obalky-z-etfe-folie.aspx>

OBRÁZKY

- 1 <http://www.leonardo-da-vinci-models.com/selfsupportingbridge.html>
- 2 <http://mech.fsv.cvut.cz/~da/MPO-TIP-iGenD/publikace/ADES.pdf>

PŘÍLOHA 1

VNITŘNÍ SILY VYPOČTENÉ PROGRAMEM

$$N = -89,60 \text{ kN}$$

$$V = 2,5263 \text{ kN}$$

$$M = 7,24 \text{ kNm}$$

MÍRA VYUŽITÍ KONSTRUKCE

VYPOČTENÁ PROGRAMEM 0,432

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

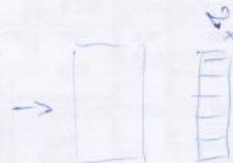
$$A = 912 \cdot 925 = 0,03 \text{ m}^2$$

$$W = \frac{bh^3}{6} = \frac{912 \cdot 0,925^3}{6} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$



TLAK

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{-89,60}{0,03} = -2959,6 \text{ kPa}$$



OHYB

$$\sigma_x = \frac{M_{max}}{W} = \frac{7,24}{1,25 \cdot 10^{-3}} = 5792,28 \text{ kPa}$$



SMYK

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} = \frac{3}{2} \frac{2,526}{0,03} = 126,3 \text{ kPa}$$



KRITICKÉ PRŮŘEZY

KRAJNÍ VÝKONA - EXTREM OHYB

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sigma^2 + 6\tau^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2(-2959,6 - 5792,28)^2} = 8746 \text{ kPa}$$

STŘED PRŮŘEZU - EXTREM SMYK

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2 \cdot 2959,6^2 + 6 \cdot 126,3^2} = 2961,7 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow \sigma_{eq, max} = 8746$$

$$\Rightarrow \mu_{rel} = \frac{8746}{20000} = 0,437 = 0,437 \text{ (Z PROGRAMU)}$$