

**ČVUT V PRAZE – FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA MECHANIKY
132PJ4C**

**ANNELIDA
PARAMETRICKÁ OCELOVÁ LÁVKA:
STATICKÁ ANALÝZA**

VYPRACOVAL: Bc. Jakub Souček
VEDOUČÍ PROJEKTU: Doc. Ing. Jan Zeman, Ph.D.
KONZULTACE: Ing. Ladislav Svoboda, Ph.D.
DATUM: LS 2012/2013

OBSAH

ÚVOD	...3
DIGITÁLNÍ ARCHITEKTURA	...3
ANNELIDA	...4
Nonsá konstrukce	...4
Mostovka	...4
STATICKÉ SCHÉMA	...5
DONKEY	...5
Parametry	...6
Geometrické	...6
Průřezové charakteristiky prvků	...8
Okrajové podmínky	...8
Výstupní parametry	...8
STATICKÁ ANALÝZA A OPTIMALIZACE	...9
Počet polí	...9
Tvar a velikost průřezu konstrukce	..11
Konfigurace segmentů	..12
Průřezové charakteristiky prvků	..12
OPTIMALIZOVANÉ PRŮŘEZY	..13
ANSYS	..15
POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	..15
ZÁVĚR	..16
POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY	..17

ÚVOD

Účelem této práce je analyzovat chování konstrukce parametrické ocelové lávky generované pomocí principů digitální architektury. S využitím výpočetních programů pracujících na bázi metody konečných prvků bude charakterizováno chování části konstrukce a aplikováním této znalosti navržen optimalizovaný tvar. Dále bude konstrukce analyzována z hlediska stability prvků.

DIGITÁLNÍ ARCHITEKTURA

Digitální architektura je poměrně mladým odvětvím, které v současné době zažívá rozkvět. Je to zapříčiněno zejména rozvojem výpočetní techniky během posledních desítek let. Nejde jen o používání systémů CAD (computer aided design), 3D renderovacích programů a textových editorů, ty jen nahradily dřívější formy navrhování. Rozvoj tabulkových procesorů je z tohoto hlediska mnohem přínosnější, protože automatizuje mnoho rutinních úkonů a vytváří vazby a parametry, které značně zjednodušují práci s digitální architekturou.

Rozdíl mezi běžnou a digitální architekturou je v samotném počátku procesu navrhování. Digitální architektura je definována způsobem uvažování, který navrhování provádí. Digitální technologie a postupy se tak dostávají do popředí práce architektů jako nové nástroje, zdroj inspirace nebo také zdroj otázek. Běžná praxe využívá tyto technologie až při zpracování prezentace, projektové dokumentace nebo při realizaci.

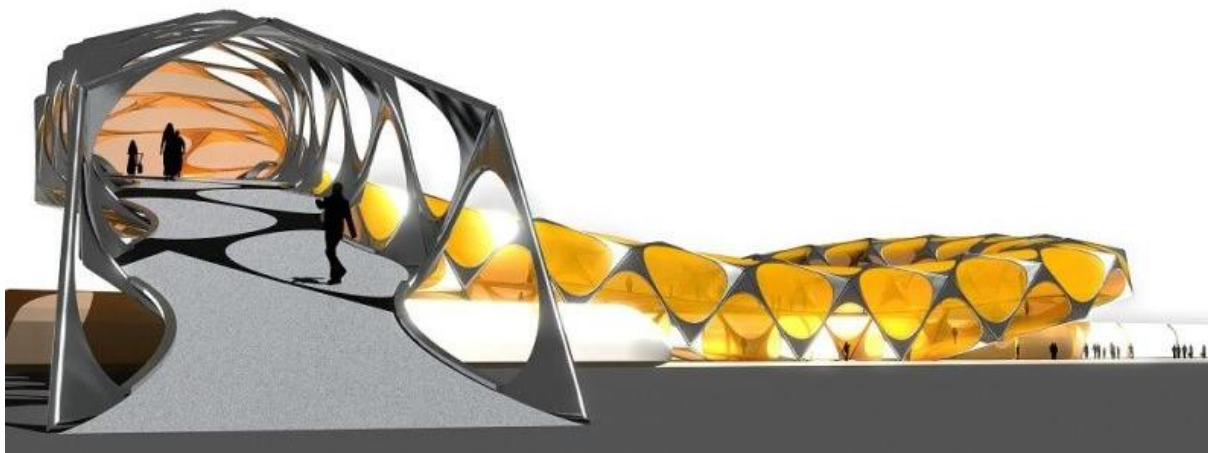
Architektura volných forem či organických tvarů je s pojmem digitální architektura úzce spojena. Prvním důvodem bývají parametry, které do návrhu vstupují; například hodnoty denního osvětlení, které v prostoru plynule přecházejí z větších do menších, nelámou se ani náhle nemizejí. Plynulá změna hodnot těchto parametrů se odráží v plynulém, tekoucím tvaru. Druhým důvodem je fakt, že jakákoliv architektura volných forem se jen stěží obejde bez digitálních technologií. Při stavbě, nebo lépe výrobě budov organických tvarů naleznou uplatnění postupy jako například tzv. File-to-Factory, CNC obrábění, laserové řezání či Rapid Prototyping.



Obr. 1 a 2 – příklady parametrických konstrukcí

ANNELIDA

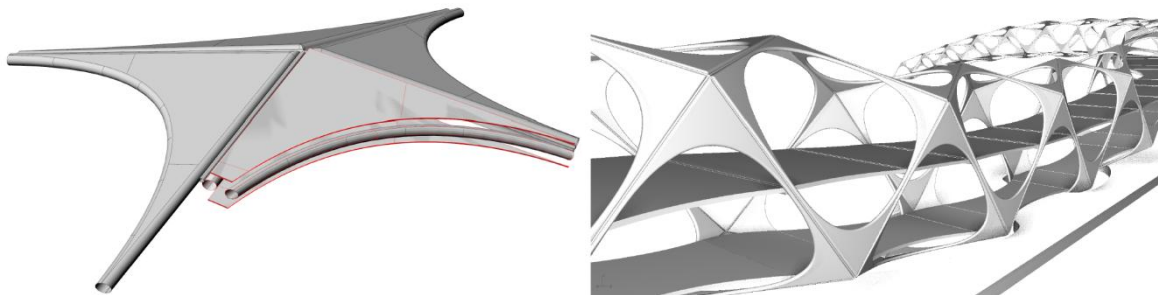
Projekt Annelida je dílem Ing. arch. Lukáše Kurilly, který s využitím aplikace počítačového algoritmu navrhl ocelovou lávku pro pěší. Architektonický model byl vygenerován automaticky pomocí parametrizovaného skriptu. Název konstrukce je odvozen od jejího tvaru (annelida = kroužkovec), lávka je totiž navržena jako soustava segmentů nápadně připomínající červovité živočichy. Lávka je tvořena ze dvou základních prvků: Nosné konstrukce a mostovky.



Obr. 3 – vizualizace parametrické lávky

Nosná konstrukce

Kostra konstrukce je složena z ocelových trubek, kde přímé pruty vytvářejí okrajové hrany opakujícího se geometrického vzoru - segmentu zborceného čtyřúhelníku. Každý vrchol čtyřúhelníku je vyztužen obloukovým náběhem a to ze dvou rovinných plechů a okrajové trubky. Plechy jsou zarovnané s okraji trubek. U spodních segmentů jsou protilehlé konce zborceného čtyřúhelníku propojeny příčnými pruty, které podpírají mostovku a ztužují konstrukci. Segmenty se flexibilně přizpůsobují zakřivenému tvaru konstrukce.



Obr. 4 a 5 – detail styčnicku a model nosné konstrukce

Mostovka

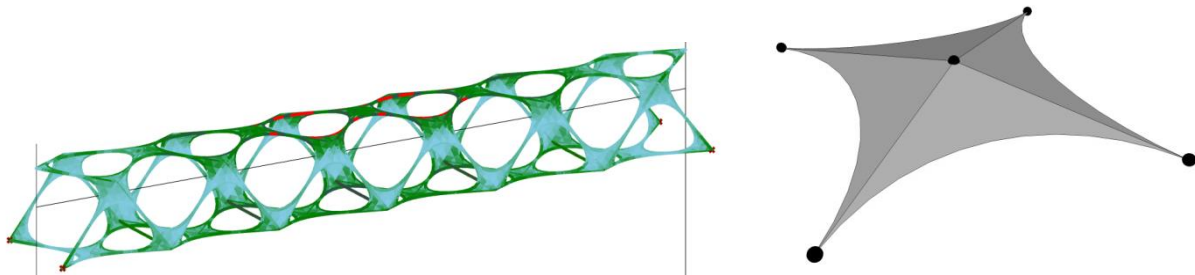
Mostovka je tvořena samostatnou konstrukcí podepřenou příčnými prvky spodní části nosného skeletu. Skladba mostovky v projektu není podrobněji řešena. Lze však

předpokládat, že bude tvořena kovovou konstrukcí o rozponu rovnajícím se velikosti jednoho segmentu lávky. Skladba a hmotnost mostovky je právě tímto parametrem ovlivněna.

STATICKÉ SCHÉMA

Pro účely statické analýzy bude zkoumán padesátimetrový model konstrukce, jejíž statický model je tvořen pomocí do sebe vetknutých rovných a obloukových prutů, které jsou v rozích spojeny ztužujícími plechy. Napjatost na vzniklém modelu bude zásadním způsobem ovlivněna vodící křivkou a způsobem podepření.

Vzhledem k tomu, že se tato práce se snaží charakterizovat chování segmentu konstrukce lávky vycházející z projektu přemostění nádraží (kde je konstrukce navržena jako zakřivená podél vertikální osy), je možné charakter konstrukce přirovnat k prostému nosníku s neposuvnými podporami. Klenbový efekt, který by byl zajištěn neposuvností podpor, nelze v tomto případě zajistit.



Obr. 6 a 7 – statické schéma nosné konstrukce, statické schéma styčnicku

Zatížení je v modelu uvažováno jako rovnoměrné plošné a přepočteno jako bodové působící vždy v místech uložení příčného ztužujícího nosníku. Celkové množství přeneseného zatížení závisí na průřezových rozměrech lávky. Čím širší průřez lávky zvolíme, tím větší zatížení bude přenášet. Tento fakt do jisté míry stěžuje optimalizační proces, protože nelze porovnávat modely o různých průřezech.

Velikost návrhového zatížení zvolena konstantní o velikosti 10 kN/m². Je v ní započteno stálé zatížení konstrukcí mostovky a svislé užité zatížení. Zatížení větrem není uvažováno.

Pro účely výpočtu je použita ocel S355 JRH tvarovaná za tepla. Mez kluzu se pohybuje na hodnotě 355 MPa, objemová hmotnost 7850 kg/m³, modul pružnosti 210 000 MPa,

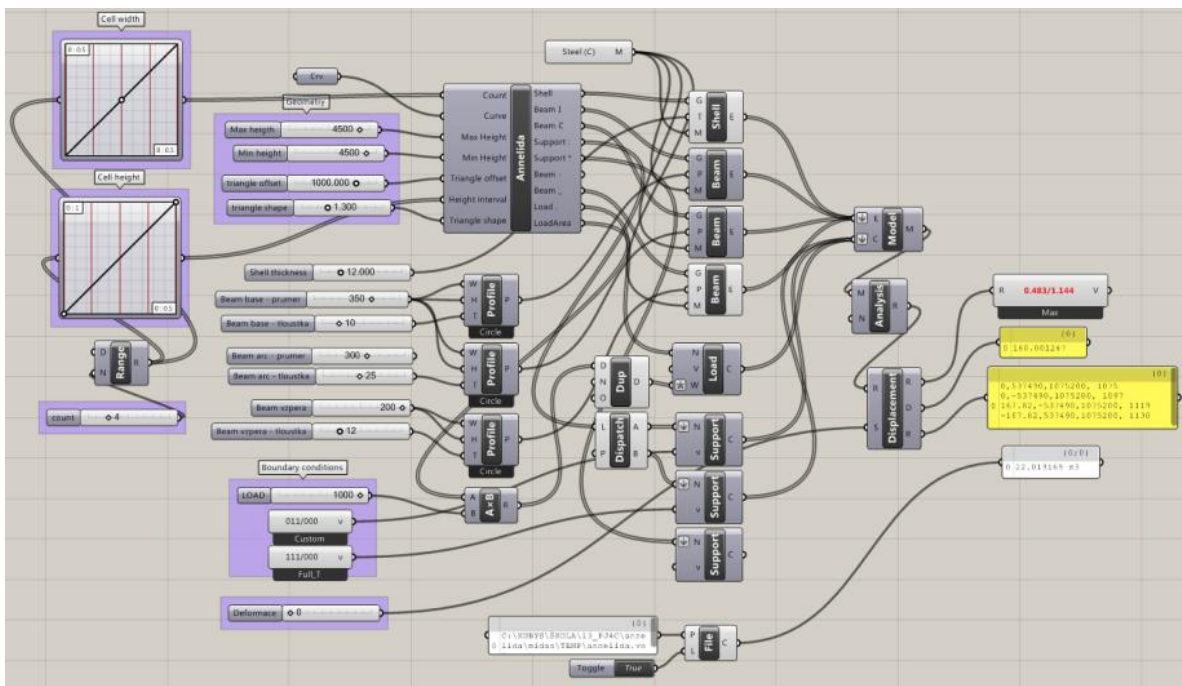
DONKEY

Software, ve kterém probíhá optimalizační část úlohy, se jmenuje Donkey. Jedná se o zásuvný modul (plug-in) 3D programu Rhinoceros, který využívá knihovny Grasshopper pro uplatnění parametrického návrhu. Význam tohoto plug-inu spočívá zejména v jeho schopnosti rychlého uplatnění zpětné vazby. V praxi se jedná o určení základních parametrů, které definují tvar a vlastnosti konstrukce. Tyto parametry lze následně pomocí

jednoduchého uživatelského rozhraní měnit a sledovat okamžité změny tvaru modelu společně s jeho atributy (napjatost, deformace, vnitřní síly, míru využití průřezu, atp.).

Parametry

Uživatelské rozhraní platformy Grasshopper je velice intuitivní. Tvar konstrukce je v něm vyjádřen pomocí skriptu (vytvořený autorem návrhu – Ing. arch. Lukášem Kurillou), který lze operativně měnit pomocí vstupních parametrů. Výsledný tvar je poté poměrně rychle přepočten a graficky vyjádřen v rozhraní programu Rhinoceros.

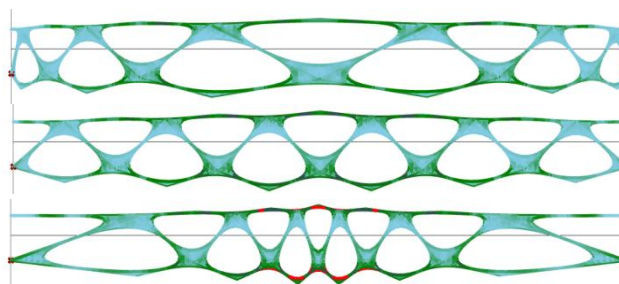


Obr. 8 – uživatelské rozhraní Grasshopperu

Geometrické

- Cell width (Gradace hustoty řazení prvků)

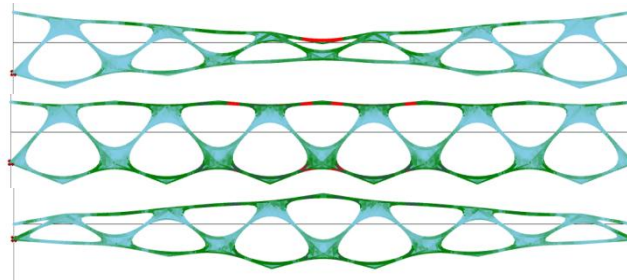
Jak je znázorněno na obrázku (obr. 9), tento parametr vyjadřuje hustotu segmentů směrem od středu konstrukce k podporám. V uživatelském rozhraní lze tento parametr měnit pomocí tvaru křivky vyjadřující míru nerovnoměrnosti segmentů.



Obr. 9 – vliv parametru „Cell width“ na tvar konstrukce

- **Cell height (velikost průřezu)**

Parametr vyjadřuje velikost průřezu lávky tedy výšku a šířku. Jelikož je v programu zatížení definováno jako plošné, nastavení tohoto parametru také ovlivňuje velikost zatížení, které na konstrukci působí. Ve skriptu jej lze měnit pomocí lineární křivky, která vyjadřuje lineární průběh změny velikosti průřezu mezi hodnotami Max height a Min height.



Obr. 10 – vliv parametru „Cell height“ na tvar konstrukce

- **Max height (maximální průřez)**

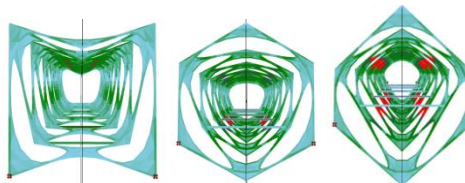
Vyjadřuje hodnotu maximální velikosti průřezu.

- **Min height (minimální průřez)**

Vyjadřuje hodnotu minimální velikosti průřezu.

- **Triangle offset (zdvih trojúhelníku)**

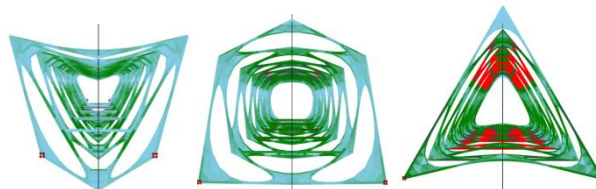
Mění tvar průřezu – vyjadřuje odchylku horního a spodního vrcholu segmentu od hexagonálního tvaru.



Obr. 11 – vliv parametru „Triangle offset“ na tvar průřezu konstrukce

- **Triangle shape (tvar trojúhelníku)**

Mění tvar průřezu.



Obr. 12 – vliv parametru „Triangle shape“ na tvar průřezu konstrukce

- **Count (počet segmentů v konstrukci)**

Určuje počet segmentů

Průřezové charakteristiky prvků

- **Shell thickness (tloušťka plechů)**
V modelu jsou dva plechy spojující okraje rovných a obloukových prutů nahrazeny jedním plechem o dvojnásobné tloušťce.
- **Parametry měnící průřezové charakteristiky prutů:**
 - Beam base - průměr (průměr rovných prutů)
 - Beam base – tloušťka (tloušťka stěny rovných prutů)
 - Beam arc – průměr (průměr obloukových prutů)
 - Beam arc – tloušťka (tloušťka stěny obloukových prutů)
 - Beam vzpera (průměr příčné vzpěry)
 - Beam vzpera – tloušťka (tloušťka stěny příčné vzpěry)

Okrajové podmínky

- **Curve (křivka)**
Určuje vodící křivku, podle které je lávka konstruována. Lze volit mezi obloukem o vzepětí h nebo vodorovným nosníkem. Pro účely analýzy bude použit model prostého nosníku.
- **Load (velikost zatížení)**
Tímto parametrem lze měnit velikost rovnoměrného spojitého zatížení, které je skriptem přepočítáno do bodového.
- **Uvolnění v podporách:**
Pro účely optimalizace byl vybrán model prostého nosníku s kloubovými podporami, z nichž je jedna posuvná ve směru x .

Výstupní parametry

Výstupní hodnoty, ze kterých lze vycházet pro účely optimalizace, jsou:

- **Míra využití průřezu (E)**
Vyjadřuje poměr mezi maximálním napětím a návrhovou hodnotou meze kluzu použitého materiálu. Graficky je v prostředí Rhinoceros vyjádřen odstínem zelené a červené barvy.
$$E = \frac{\sigma_{\max}}{f_y}$$
- **Maximální průhyb (δ_{\max})**
Velikost průhybu nelze porovnávat s kritériem maximálního průhybu uvedeného v ČSN.

- **Objem modelu konstrukce (V)**
Ze kterého lze získat hmotnost (M).
 $M = V \cdot \rho_{\text{ocel}} = V \cdot 7850 \text{ [kg]}$
- **Reakce v podporách (F_x, F_y, F_z)**

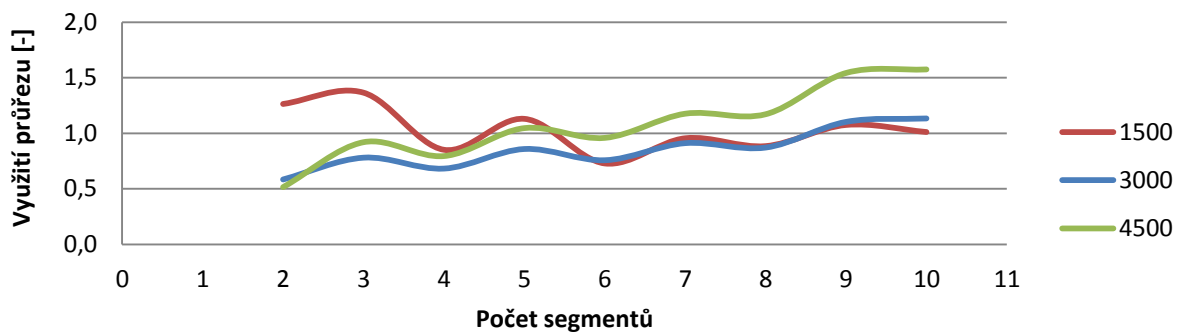
STATICKÁ ANALÝZA A OPTIMALIZACE

Proces optimalizace v tomto případě zahrnuje mnoho parametrů, které ovlivňují konečnou napjatost konstrukce. Účelem této práce je najít trendy parametrů, jejichž vzájemná konfigurace je pro daný tvar výhodným řešením. Bylo by velice obtížné popsat každý z těchto trendů pomocí funkce, které by tvořily vstupní zadání pro multikriteriální optimalizační proces. Proto bude zvolen postup, během kterého budou zkoumány vždy jednotlivé parametry konstrukce a hledána jejich výhodná konfigurace. Kombinací těchto konfigurací bude poté vytvořena množina vhodných řešení.

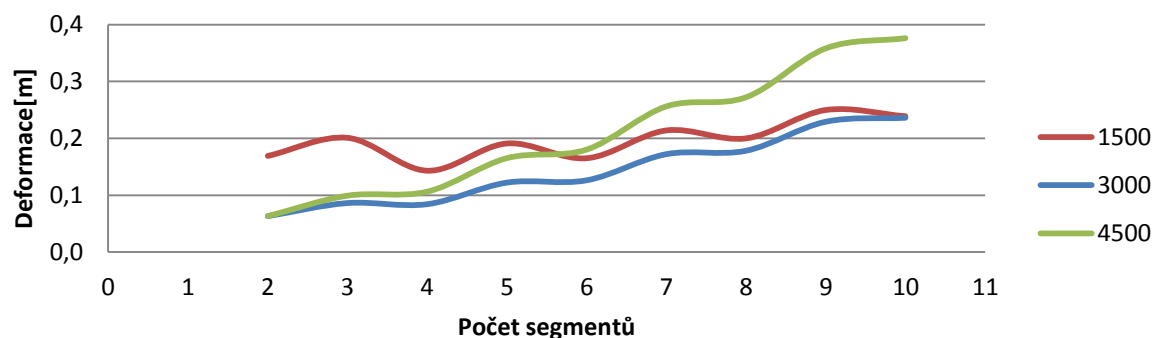
Počet polí

Při určování optimálního počtu segmentů v konstrukci byl nejdříve zvolen maximální počet polí (10), pro který byla konstrukce konfigurována tak, aby byl materiál na hranici únosnosti. Poté se při zachování této konfigurace měnil počet polí a zaznamenávaly výstupní parametry (průhyb, míra využití průřezu a celková hmotnost konstrukce). Tento postup byl zvolen pro 3 různé velikosti průřezů – parametr „height“ nastavený na 1500, 3000 a 4500.

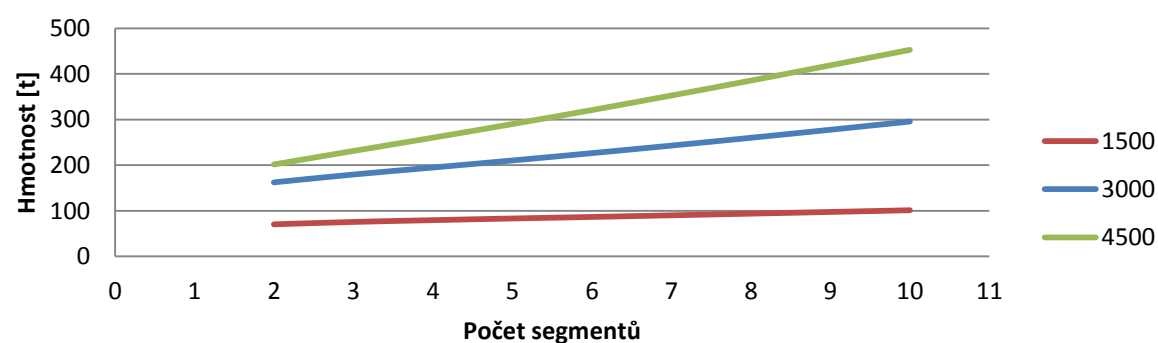
VYUŽITÍ PRŮŘEZU



DEFORMACE



HMOTNOST



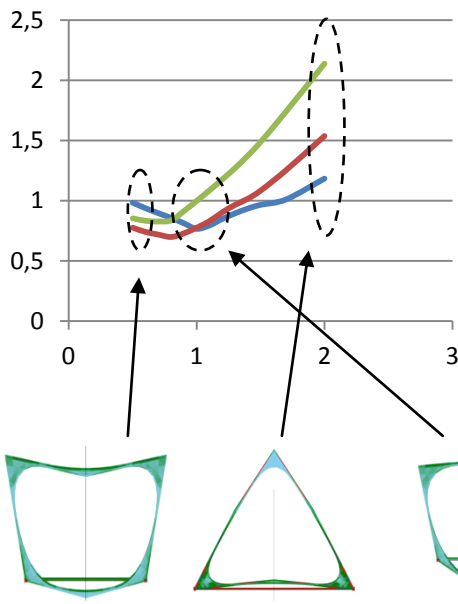
Jak je patrné z grafů využití průřezu a deformace, celková napjatost je ovlivněna počtem segmentů. Konstrukci lze přirovnat k nosníku, který je rovnoměrně zatížen svislým zatížením, maximum ohybového momentu a tedy i maximum napětí vzniká uprostřed rozpětí. Volíme-li sudý počet segmentů, pak se uprostřed vždy objeví příčná vzpěra, která ztužuje celý segment a lépe vzdoruje namáhání. Nosníkový efekt je dobře znatelný na grafu maximální deformace, kde vyšší průřezy vzdorují zatížení efektivněji, kvůli většímu ramenu vnitřních sil.

Dále lze z grafů vyčíst trend snižování hmotnosti konstrukce s počtem segmentů. Styčníky totiž tvoří značnou část celkové hmotnosti nosné konstrukce lávky. Snižováním počtu segmentů se lineárně snižuje i zatížení vlastní tíhou. Nelze ale říci, že optimálního tvaru lávky dosáhneme při navržení dvou segmentů. Počet segmentů má totiž zásadní vliv na rozpon konstrukce mostovky a potažmo i její hmotnost. Tento fakt však není zahrnut do výpočetního modelu, kde je zatížení vlastní tíhou mostovky určeno konstantní hodnotou. Stejně tak při volbě menšího počtu polí narůstá délka a štíhlost rovných prutů, což v důsledku může znamenat snížení únosnosti a efektivity konstrukce.

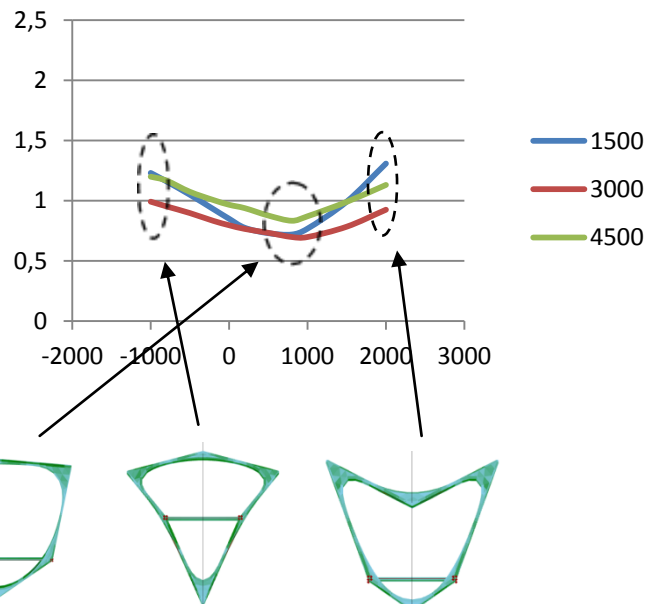
Tvar a velikost průřezu konstrukce

Příčný tvar průřezu lze ovlivnit parametry „triangle shape“ a „triangle offset“. Obdobným způsobem jako u určování výhodného počtu polí byla nejdříve navržena konstrukce na mezi únosnosti a poté při změně zkoumaných parametrů zaznamenány výstupní parametry pro 3 různé velikosti průřezů.

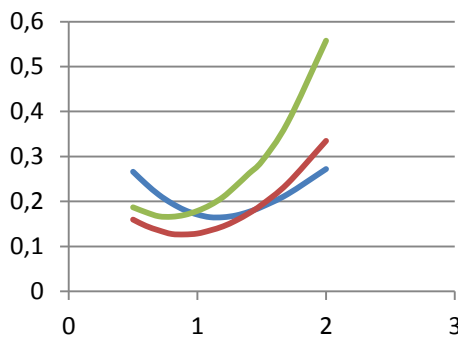
VYUŽITÍ PRŮŘEZU [-] tr. shape



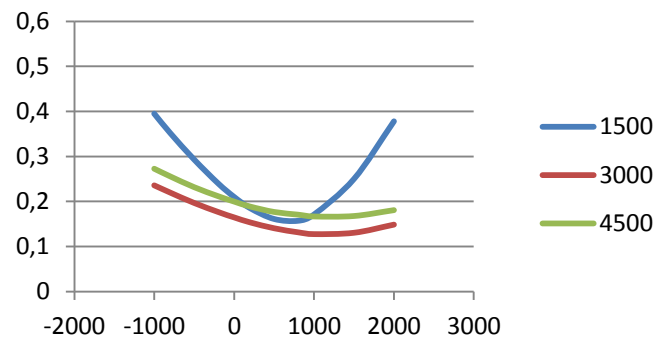
tr. offset



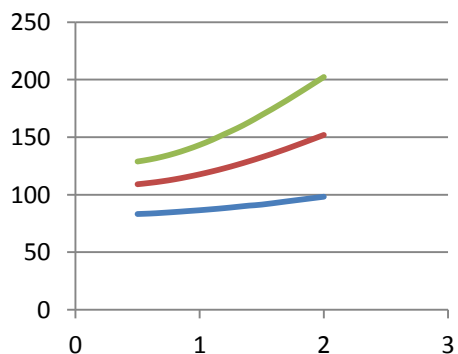
DEFORMACE [m] tr. shape



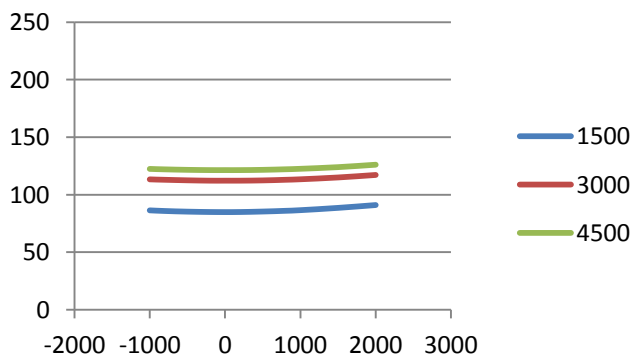
tr. offset



HMOTNOST [t] tr. shape



tr. offset



Z grafů je patrné, že pro určitou hodnotu parametrů dosahuje funkce využití průřezu minimální hodnoty. Při bližším zkoumání tvaru průřezu lze ukázat, že tato hodnota nastává pro průřez připomínající tvar mezi obdélníkem a šestiúhelníkem. Jakákoli odchylka od tohoto tvaru znamená zvýšení napjatosti. Zejména při změně parametru „triangle offset“ dochází k podstatnému kolísání napjatosti v průřezu při zachování téměř konstantní hodnoty hmotnosti modelu.

Velikost průřezu lávky je v první řadě dána architektonickými požadavky na průchodnost a kapacitu. Vstupní parametry dovolují volit velikost průřezu tak, že lze měnit jeho hodnotu na krajích a uprostřed rozpětí. Takto lze vytvořit tři základní varianty tvaru:

- neměnná velikost průřezu po délce lávky
- průřez větší uprostřed rozpětí lávky
- průřez větší na krajích

Vzhledem k tomu, že rozdílný průřez znamená i rozdílné vnější zatížení, není snadné tyto varianty mezi sebou objektivně porovnat. Při bližším zkoumání modelu se ale ukazuje, že vhodnější je volba tvaru, kde je průřez větší u podpor větší než uprostřed rozpětí. Tento fakt je způsoben zejména zmenšenou hodnotou vnějšího zatížení uprostřed rozpětí, což má za následek i celkové zmenšení napjatosti.

Konfigurace segmentů

Jak bylo již zmíněno výše, rozmístění segmentů po délce je má podstatný vliv na napjatost prvků. Vzhledem k tomu, že styčníky tvoří tuhou, ale zároveň méně využitou a hmotnou část konstrukce, je výhodnější jejich rozmístění volit tak, aby jejich četnost klesala směrem ke středu rozpětí. Uplatněním nosníkového principu lze ukázat, že je tato konfigurace vhodnější i z hlediska distribuce smykových sil v oblasti podpor.

Průřezové charakteristiky prvků

Veškeré nosné prvky konstrukce jsou namáhané osovou silou a ohybem. Z tohoto důvodu by bylo vhodné volit pro pruty co největší průřez a zároveň co nejtenčí plech. Takto navržená konstrukce však naráží na lokální stabilitní problémy a estetické požadavky, které preferují štíhlejší prvky, aby lávka působila subtilním dojmem. Z konstrukčních důvodů je vhodné volit shodný průměr rovných a obloukových prutů, zjednoduší se tím montáž ztužujících plechů. Tloušťka stěny prutů ale může být rozličná. Ukazuje se totiž, že obloukové pruty jsou více namáhané než pruty rovné.

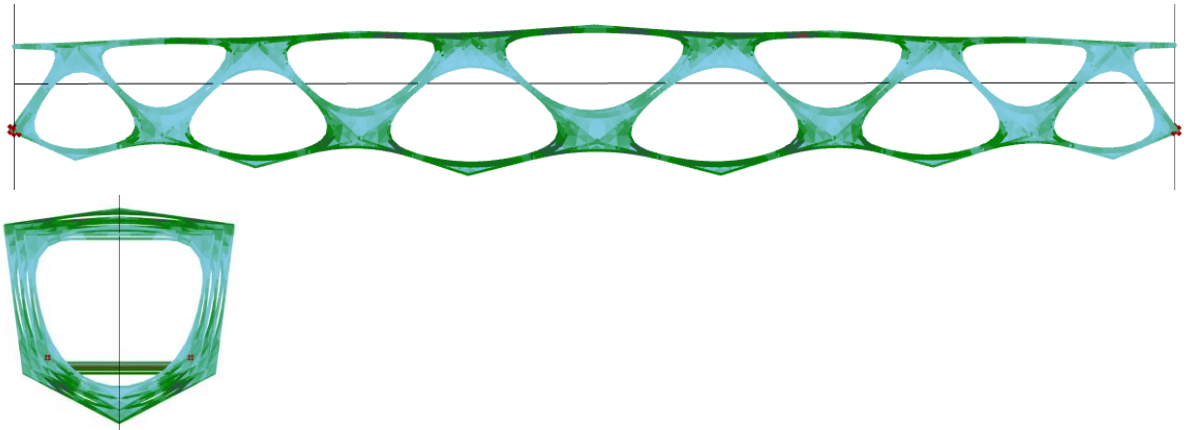
Tloušťka ztužujících obloukových plechů je omezena konstrukčními zásadami. Předpokládá se, že spoj plechu a trubky bude realizován koutovými svary, které musí splňovat podmínku minimálního kolmého průřezu – $a = 3 \text{ mm}$. Znamená to volit plechy o minimální tloušťce 5 mm (10 mm pro výpočetní model).

OPTIMALIZOVANÉ PRŮŘEZY

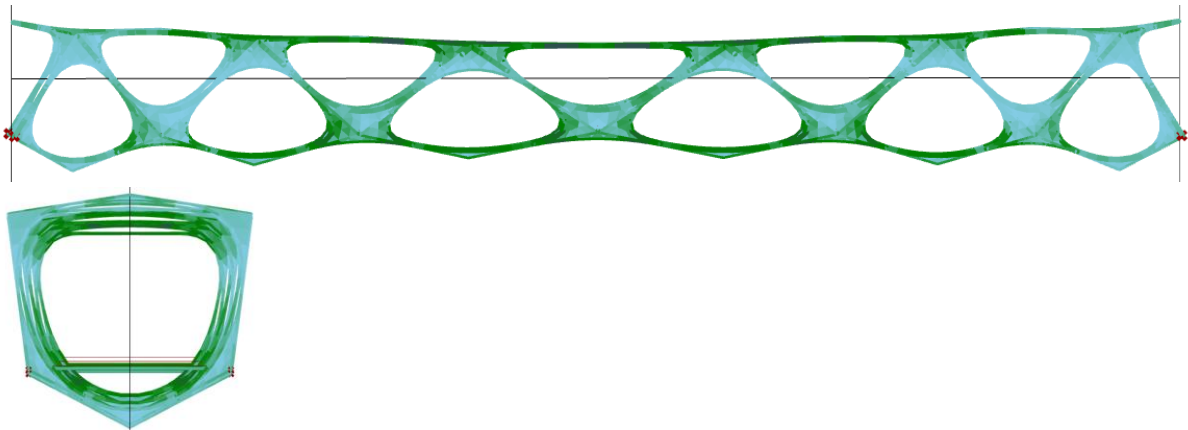
Uplatněním výše popsaných poznatků byly navrženy staticky výhodné tvary konstrukce lávky.

Tvar konstrukce		tvar 1	tvar 2	tvar 3
	rozpětí	50 m	50 m	50 m
	počet segmentů	6	6	4
	gradace hustoty průřezu	ano	ano	ano
	velikost průřezu uprostřed	4000	3000	4500
	velikost průřezu na kraji	3000	4000	4500
	zdvih trojúhelníku	800	800	800
	tvar trojúhelníku	0,8	0,8	0,75
Průřezové charakteristiky prvků				
	tloušťka plechů	12 mm	10 mm	10 mm
	průměr rovných prutů	350 mm	340 mm	350 mm
	tloušťka stěny rovných prutů	8 mm	8 mm	7 mm
	průměr obloukových prutů	350 mm	340 mm	350 mm
	tloušťka stěny obloukových prutů	15 mm	15 mm	13 mm
	průměr příčné vzpěry	120 mm	120 mm	120 mm
	tloušťka stěny příčné vzpěry	10 mm	10 mm	10 mm
Okrajové podmínky				
	vodící křivka	vodorovná	vodorovná	vodorovná
	velikost zatížení	10 kN/m ²	10 kN/m ²	10 kN/m ²
	uvodnění v podporách	111/011	111/011	111/011
Výstupní parametry				
	míra využití průřezu	0,996	0,979	0,999
	maximální průhyb	0,203 m	0,202 m	0,179 m
	hmotnost	112,9 t	107,5 t	92,0 t

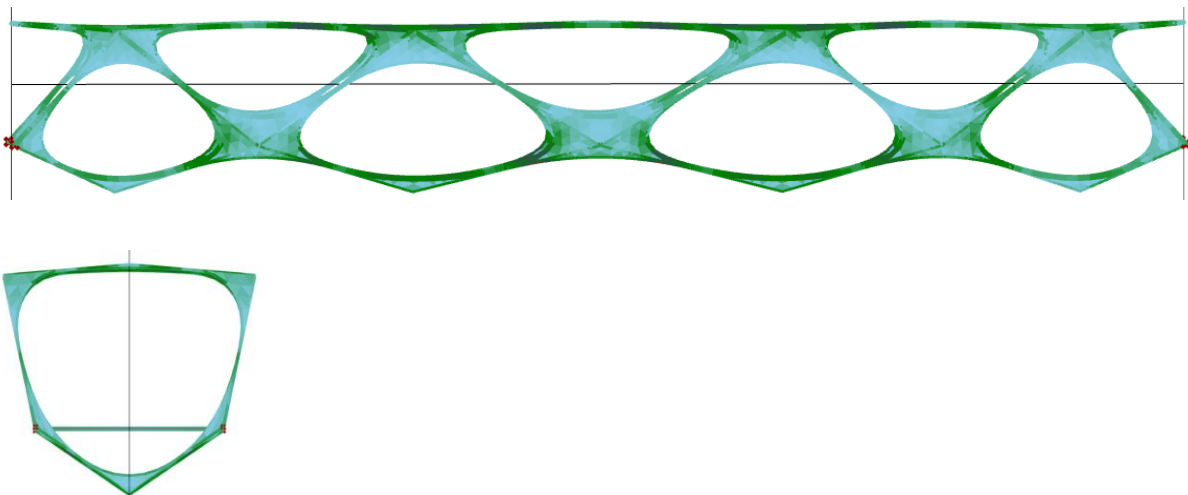
TVAR 1



TVAR 2



TVAR 3



ANSYS

Pro korekci a kontrolu výstupů z rozhraní Donkey lze použít program ANSYS®. V něm následně probíhá i výpočet stability konstrukce. ANSYS® (společnost ANSYS, Inc.) je univerzální výpočetní nástroj využívající metody konečných prvků pro tvorbu rozličných výpočetních modelů. Lze pro něj najít širokou řadu uplatnění od statických a dynamických výpočtů přes modelování tekutin a hydrodynamických výpočtů až po modelování elektromagnetických polí.

Vstupní údaje pro ANSYS jsou generovány plug-inem Donkey přes zadávací soubor „annelida.ansys.in“, který obsahuje příkazy pro utilitu Mechanical APDL (rozhraní aplikace ANSYS). Zadávací soubor je potřeba poupravit podle toho, zda je určen pro výpočet stability nebo výpočet statiky. Dále je třeba změnit znaménko u gravitačního zrychlení, které má pro ANSYS opačný smysl. Výstupní informace důležité pro korekci výsledků jsou: maximální průhyb a koeficient stability (pokud je vyšší než 1, pak nemá stabilita vliv na únosnost konstrukce). Tyto hodnoty jsou poté porovnány s výstupy z Donkey.



Obr. 13 – model tvaru 1 v programu ANSYS

Pro účely statické a stabilitní analýzy jsou prutové prvky zvoleny jako BEAM188 (element type) – výpočetní model pracující na principu Timoshenkovy prutové teorie. Plošné prvky jsou modelovány jako SHELL181 – výpočetní model čtyřbodového segmentu s šesti stupni volnosti (posun x , y , z a rotace kolem osy x , y , z).

POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky zkoumaných veličin pro optimalizované tvary. Vzhledem k tomu, že Donkey není schopen počítat stabilitu plošných prvků, byl porovnán i prutový model (bez vlivu ztužujících plachů).

	DONKEY				ANSYS			
	STATIKA		STABILITA		STATIKA		STABILITA	
	DEFORMACE [m]		KOE. STABILITA		DEFORMACE [m]		KOE. STABILITA	
	PRUT	CELEK	PRUT	CELEK	PRUT	CELEK	PRUT	CELEK
TVAR 1	0,461	0,203	2,006	-	0,519	0,218	2,124	2,697
TVAR 2	0,425	0,202	3,460	-	0,476	0,220	3,705	4,582
TVAR 3	0,491	0,179	3,650	-	0,559	0,193	3,951	5,851

	ODCHYLKA V %			
	STATIKA		STABILITA	
	DEFORMACE [m]		KOEf. STABILITY	
	PRUT	CELEK	PRUT	CELEK
TVAR 1	12,6	7,4	5,9	-
TVAR 2	12,0	8,9	7,1	-
TVAR 3	13,8	7,8	8,2	-

Z tabulky vyplývá, že výsledky odchylka výsledků statické analýzy mezi programy Donkey a ANSYS je maximálně 14% pro prutový model a 9% pro model se započítáním ztužujících plechů. Výstupy z Donkey jsou optimističtější. Naopak stabilita u prutového modelu vyháží v Donkey pesimističtěji, než v ANSYSu, a to cca o 9%. Dále se ukazuje, že stabilita plošných i prutových prvků nemá vliv na celkovou únosnost. Použití styčnickových plechů přispívá ke stabilitě konstrukce.

ZÁVĚR

Tato práce ověřila schopnost plug-inu Donkey operativně analyzovat parametrické konstrukce. Pomocí tohoto nástroje byla provedena statická analýza parametrické lávky a tyto znalosti byly dále použity pro návrh staticky výhodných tvarů konstrukce. Následně byla provedena korekce výsledků v programu ANSYS se zohledněním lokální a globální stability.

POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY

<http://www.digiarch.cz/210-13-clanky-digitalni-architektura.aspx>

<http://www.studioflorian.com/projekty/63-lukas-kurilla-annelida>

Mechanická odezva tvarově složitých konstrukcí v prostředí integrovaného návrhu - STAVEBNÍ OBZOR 5/2011

http://www.sharcnet.ca/Software/Fluent13/help/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html

http://ans2.vm.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-181.htm

<http://www.konstrukce.cz/clanek/rhino-v-architekture-a-stavebnictvi/>

Analýza konstrukce navržené pomocí principů digitální architektury – Sobotková M.; 16/06/2008