

DOKUMENTACE ZÁVĚREČNÉ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA VÝTVARNÝCH UMĚNÍ

FACULTY OF FINE ARTS

ATELIÉR PRODUKTOVÉHO DESIGNU

PRODUCT DESIGN STUDIO

MODULÁRNÍ STRUKTURY

MODULAR STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Holubec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Ondřej Tobola

BRNO 2019

Děkuji panu MgA. Ondřeji Tobolovi za odborné vedení mé bakalářské práce,
panu doc. Ing. arch. Jaroslavu Drápalovi, CSc. z Fakulty Architektury za cenné rady v oblasti
tensegrických konstrukcí,
panu Ing. arch. Jakobovi Novákovi za věcné připomínky a pomoc při zpracování práce.
Za vstřícnost při konzultacích statiky návrhů panu Ing. Ivanu Balázsovi, Ph.D., panu Ing.
Michalu Štrbovi, Ph.D. a panu Ing. Rostislavu Langovi z Fakulty stavební VUT.

OBSAH:

TEXTOVÁ ČÁST	6 - 10
Úvod	6
Cíle	6
Historie tensegrity	7
Návrhový proces	8
Výsledný návrh	9
Závěr	9
Použitá literatura	10
OBRAZOVÁ ČÁST	11 - 19

TEXTOVÁ ČÁST

V této bakalářské práci se zabývám návrhem rekreační zahradní architektury, která bude sloužit jako zastiňovací objekt a bude využívat principy tensegrických struktur.

Úvod

Práce začala zkraje léta 2018, kdy jsem si začal vybírat, kterým tématem se budu v rámci bakalářské práce zabývat. Důležité pro mě bylo téma, které něco přinese nejenom mně, ale i ostatním. Mezi mými návrhy byla domácí králíkárna, zahradní altán, krmítko, houpačka a autorský šperk. Ačkoliv zahradní altán nebyl návrh, který jsem osobně preferoval nejvíc, tak po další konzultaci s vedoucím ateliéru jsme došli k závěru, že téma nabízí spoustu prostoru pro tvorbu a zároveň práce není tak náročná, aby se nedala zvládnout.

Můj nápad postavit zahradní altán pocházel z touhy využít volný prostor, který se nachází na naší zahradě v Bruntále. Tento prostor je v létě většinou nevyužitý, protože tam není, kde se schovat před přímým sluncem. A to je problém zvláště pro mé rodiče, jelikož otec má fototyp 1 a moje maminka má alergii na slunce. Z využití bakalářské práce pro projekt zahradního altánu pro rodiče nakonec sešlo. Ačkoli altán realizovaný bude, tak za úplně jiných podmínek, než jaké jsem si pro svou bakalářskou práci stanovil.

Původně jsem chtěl postavit zahradní altán ve tvaru geodetické kopule, podobné, jaké stavěl Buckminster Fuller. Na práci mě nejvíce lákalo, že je nutné řešit spoustu technických otázek. Po bližším prozkoumání, jaké jsou možnosti ve stavbě geodetické kopule jsem zjistil, že možností, jak takovou kopuli postavit je spousta a také je již spousta řešení, které se těmito možnostem věnují. Čím více jsem téma geodetické kopule zkoumal, tím víc mi bylo jasné, že vymýšlet novou geodetickou kopuli pro mě nemá smysl. A o konkurenci současnému trhu s geodetickými stavebními prvky mi také nešlo (zpočátku jsem ani nevěděl, že takový trh existuje).

Díky mému zájmu o Buckminstera Fullera jsem narazil na jeho žáka Kennetha Snelsona. Jeho tensegrické plastiky mě dovedly k architektuře, která využívá tohoto principu. V tuto chvíli jsem věděl, že o tomto tématu chci vědět více. Zároveň mi byly blízké myšlenky Martina Rajniše, především jeho vztah k udržitelné architektuře. S těmito myšlenkami a snahou nesvazovat se konkrétními výstupy, které z mé práce mohou vzniknout, vytvořil vedoucí ateliéru zadání bakalářské práce, jímž jsou Modulární struktury.

Cíle

Cílem mé bakalářské práce je navrhnout rekreační zastiňovací objekt s kapacitou 4-6 osob, který bude využívat principy tensegrických struktur a zvýšit různorodost uplatnitelnosti tensegrických struktur na malou architekturu. Dále také prozkoumat materiály, které by byly pro daný objekt vhodné a funkční. Zabývat se kompozicí a proporcemi návrhů a v neposlední řadě zohlednit finanční dostupnost projektu.

Historie tensegrity

Počátky tensegrity jsou spjaty s R. B. Fullerem (přednášející na Black Mountain Collage), jeho žákem K. D. Snelsonem (sochař) a francouzským architektem D. G. Emmerichem. Snelson byl první kdo přišel v roce 1948 s prototypem sochy, která byla stabilní díky napnutým lanům a kompresním prutům. Buckminster Fuller byl první kdo tento princip pojmenoval v roce 1955 jako tensegritu (spojení slov "tensional-integrity", Snelson preferuje označení „floating-compression“). Úryvek z dopisu K. Snelsona adresovaného R. Motru ilustrující počínající neshody o autorství mezi B. Fullerem a K. Snelsonem:

„The absorption process began early, even though Bucky penned the following in a letter to me dated December 22, 1949:

"In all my public lectures I tell of your original demonstration of discontinuous - pressure - (com-pressure) and continuous tension structural advantage; - in which right makes light in a prototype structure, the ready reproduction of which, properly incorporated in fundamental structures, may advance the spontaneous good will and understanding of mankind by many centuries. The event was one of those 'It happened' events, but demonstrates how the important events happen where the atmosphere is most favorable. If you had demonstrated this structure to an art audience it would not have rung the bell that it rang in me, who had been seeking this structure in Energetic Geometry. That you were excited by the latter, E.G., into spontaneous articulation of the solution, also demonstrates the importance of good faith of colleagues of this frontier. The name of Ken Snelson [his underline] will come to be known as a true pioneer of the realized good life and good will."

Bucky's warm and uplifting letter arrived about six months after I first showed him my small sculpture. In that it was dated three days before Christmas, I suppose he was in a festive, generous, mood. A year later, January 1951 he published a picture of the structure in Architectural Forum magazine and, surprisingly, I was not mentioned. When I posed the question some years later why he accredited me, as he said, in his public lectures and never in print, he replied, "Ken, old man, you can afford to remain anonymous for a while.""¹

Dle jiného zdroje² se lze dozvědět, že principy tensegrity objevil již lotyšský umělec Karl Johanson roku 1920, to ale K. Snelson popírá, jelikož nešlo o předepjatou konstrukci. Je ale pravděpodobné, že na práci K. Johansona navázal francouzský architekt D. G. Emmerich, který si své první "Construction de reseaux autotendants" nechal patentovat ve stejné době jako Snelson své "Continuous tension, discontinuous compression structures" a Fuller své "Tensile Integrity".

Tenzní struktury s membránami, které tvořil Otto Frei nejsou tensegrity.³

Stejně tak ani „cable domes“ od Davida Geigera, ačkoliv jsou od principů tensegrity odvozeny.³

¹ [From Kenneth Snelson to R. Motro, International Journal of Space Structures, listopad 1990](#)

² [Brian Droitcour. Building Blocks. The Moscow Times. Moskva, MoscowTimes LLC, 18.8.2006](#)

³ [Valentín Gómez Jáuregui. Tensegrity Structures and their Application to Architecture. School of Architecture, Queen's University, Belfast. září 2004](#)

Tři roky po oficiálním objevení principů tensegrity se konal v roce 1953 Festival of Britain. Zde byla vztyčena konstrukce vysoká 91 metrů s názvem Skylon [obr.1], což bylo první použití tohoto principu ve veřejném prostoru.

Mezi poslední současné využití principu tensegrity v architektuře patří Tension pavilon [obr.2] z roku 2016, 99 Failures Pavilon [obr.3] z roku 2013, Moom Pavilon [obr.4] z roku 2011 a Kurilpa Bridge [obr.5] z roku 2009.

Návrhový proces

Návrhový proces jsem začal řešit modularních staveb, jejich tvarů a technických řešení s ohledem na to, co je jejich přínosem. Zajímá mě se o moderní stavební technologie jako je fabric formed concrete, různé typy strukturních přístupů, membránové systémy a zjišťoval užití tensegrických struktur v architektuře, designu a umění. Ze znalostí tensegrických struktur a snahy dosáhnout efektu „vznášející se konstrukce“ potom vychází mé návrhy.

Pro lepší pochopení fungování tensegritů jsem začal vytvářet modely [obr.6], které mi usnadňovaly navrhování a pomáhaly mi částečně si ověřit jejich funkčnost. Následovaly modely, na kterých jsem testoval různé typy předepnuté konstrukce v kombinaci s plachtou. V této fázi vznikly 3 tvarová řešení [obr.7]. Každé z nich jsem dále rozvíjel ve variacích a kompozičních úpravách [obr.8].

První variantou bylo použití dvou rámců a jednoho spojovacího prutu. Tuto variantu jsem studoval v různých kompozicích a typech konstrukce. S rozvíjením tohoto konceptu jsem přestal ve chvíli, kdy bylo jasné, že použití tensegrické konstrukce zde nevyvažuje nepraktičnost návrhu, ani plně nevyužívá efekt, který tyto konstrukce nabízejí.

Druhá varianta bylo použití principu Skylonu jako podpůrného sloupu pro stínící plochu. Stejně tak v této variantě jsem se věnoval různým kompozicím a typům zavěšení prvků. Avšak složitost konstrukce zastiňovala samotnou srozumitelnost objektu a v některých částech vytvářela kolizní místa.

Třetí varianta vychází ze základní tří prutové tensegrity [obr.9] (označovaná též: „simplex“ nebo „elementary equilibrium“). Tento tvar jsem upravil tak, že rovné pruty jsou nahrazeny zahnutými tyčemi a ty jsem předepnul pomocí vnitřních vzpěr [obr.10]. Tuto konstrukci jsem doplnil o plachtu ve tvaru zborcené plochy [obr.11]. Následně jsem se snažil odstranit vnitřní vzpěry a to tím, že jsem konstrukci předepnul pomocí vnějších lan [obr.12]. Vznikl tak návrh, který by v reálné velikosti měřil 2,5 m na výšku a 4,3 m v průměru, s podchodovou výškou 2 m [obr.13].

Návrh jsem konzultoval s panem Ing. Rostislavem Langem z Fakulty stavební VUT a pro tento konkrétní projekt by ještě musel vzniknout výpočet stíhu plachty a také detailní výpočet zatížení konstrukce v různých podmínkách. Všechny tři nosné tyče by musely být vetknuty do základu, stejně tak i kotvy pro předpínací lana. Ale v zásadě je tento návrh realizovatelný, ne však v rámci mých finančních možností. Kromě vyšších pořizovacích nákladů je nevýhodou, že zde nejsou uplatněny žádné přírodní materiály, tedy nesouzní s myšlenkami přirozené architektury.

Tento koncept se však stal inspirací pro další návrhy, a to zejména takové, kde je použito více přírodního materiálu [obr.14]. Z těchto modelů jsem vybral ten, kde využívám možnosti tensegrické struktury nejlépe (v rámci předem vytyčených cílů) přičemž stínící plocha přesahuje základy stavby, tedy „dává více, než bere“. Zároveň výsledný návrh zohledňuje cílenou kapacitu 4–6 osob. Dalším krokem byla stavba modelu v měřítku 1:6 (již v konkrétních materiálech) pro přesnější ověření stability konstrukce [obr.15]. Tento model jsem také konzultoval s panem Ing. Rostislavem Langem, který mi doporučil v případě stálé stavby kotvení do betonových kostek.

Výsledný návrh

Konstrukce se skládá ze tří nosných trubek o průměru 80 mm, jež jsou zakotveny v betonu do hloubky 90 cm. Tyto trubky nesou pomocí předepnutých lan konstrukci složenou ze tří trámů (čtvercový průřez, hrana 140 mm) o délce 6 m. Každý z trámů má na obou koncích 4 závěsná oka, za které jsou trámy předepnuty pomocí ocelových lan a napínáků. Na trámech je upevněna stínící plachta.

Základní rozměry: výška: 3,7m; průměr: 5,86m; minimální podchozí výška: 2,2m

Materiály: kov, dřevo, plachta

Kapacita: 4-6 osob

Odhadovaná cena materiálu: 17500,- Kč

Závěr

Vytyčené cíle i přes mnohé proměny a ústupky byly splněny. Jelikož je projekt dimenzovaný empirickým návrhem, další možností, jak na práci navázat je ověřit konstrukci výpočtem metodou konečných prvků. V tomto výpočtu se krom jiného zaměřit na zátěž větrem, sněhem a také dimenzování nosných tyčí namáhaných na ohyb. Tento proces může otevřít nové materiálové a konstrukční možnosti, které potom mohou přinést nečekané výsledky. Zároveň výsledný návrh ve své jednoduchosti nabízí možné využití jako modul (stavební prvek) pro zastínění větších ploch.

Použitá literatura

Motro, René. *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. Londýn: Kogan Page Limited, 2003. ISBN: 1-903996-37-6

PLATKO, Peter. *Oceľ, drevo a sklo v architektúre*. Technická univerzita v Košiciach, 2015. 110s. ISBN: 978-80-553-2129-5

VOLFOVÁ, Miroslava. *Beskydské vize: Letní škola architektury Rožnov 2012*. Praha: Architectura, 2013. ISBN: 978-80-904484-7-6.

FULLER, R. Buckminster. *Inventions: the patented works of R. Buckminster Fuller*. New York: St. Martin's Press, 1983. ISBN 0-312-43477-4.

SNELSON, Kenneth. Kenneth Snelson; Art and Ideas [online], 2013. Dostupné z: [http://kennethsnelson.net/KennethSnelson Art And Ideas.pdf](http://kennethsnelson.net/KennethSnelson%20Art%20And%20Ideas.pdf)

FRIEDMAN, Amy. *Kenneth Snelson and the Science of Sculpture in 1960s America*. ProQuest LLC, 2012. Dostupné z: <http://www.thermopylae.com/dissertation.pdf>

BURKHARDT, Robert. *Practical Guide to Tensegrity Design* [online], 2008. Dostupné z: http://www.angelfire.com/ma4/bob_wb/tenseg.pdf

JÁUREGUI, Valentín. *Tensegrity Structures and their Application to Architecture* [online], 2004. Dostupné z: [http://www.tensegridad.es/Publications/MSc_Thesis-Tensegrity Structures and their Application to Architecture by GOMEZ-JAUREGUI.pdf](http://www.tensegridad.es/Publications/MSc_Thesis-Tensegrity_Structures_and_their_Application_to_Architecture_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf)

PARS, Marcelo. *Tensegrity* [online]. Dostupné z: <http://www.tensegriteit.nl/index.html>

TACHI, Tomohiro. *Interactive Freeform Design of Tensegrity* [online]. Vídeň: Springer-Verlag, 2013. Dostupné z: <https://cdn.instructables.com/ORIG/FO8/VJOI/IEVUV0CW/FO8VJOIIEVUV0CW.pdf>

SNELSON, Kenneth. *Tensegrity & Structure: Tensegrity, Weaving And The Binary World* [online]. Dostupné z [http://kennethsnelson.net/Tensegrity and Weaving.pdf](http://kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf)

ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 36, Issue 6, November 2017. *Position-Based Tensegrity Design*. New York: ACM, 2017. Dostupné z: <https://cims.nyu.edu/gcl/papers/Tensegrity-2017.pdf>

OBRAZOVÁ ČÁST



Obr.1 – Skylon, Festival of Britain 1951 autoři: Hidalgo Moya, Philip Powell a Felix Samuely, (autor fotografie: Millar & Harris)



Obr.2 - Tension pavilon z roku 2016, Vision exposition in Olympia London, autor: Structure Mode, (autor fotografie: Agnese Sanvito)



Obr.3 - 99 Failures Pavilion z roku 2013, University of Tokyo Digital Fabrication Lab, autor: Ana Luisa Soares (Autor fotografie: University of Tokyo)



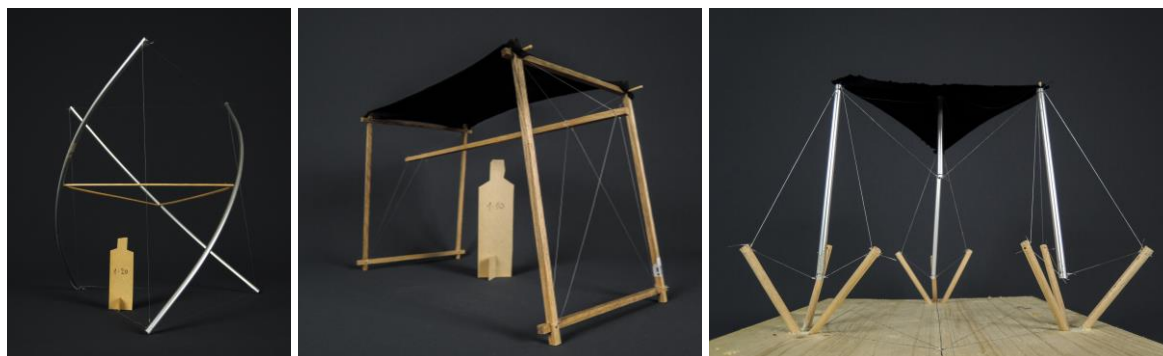
Obr. 4 - Moom Pavilion z roku 2011, Tokyo, Japonsko, autor: Kazuhiro Kojima (autor fotografie: Kazuhiro Kojima)



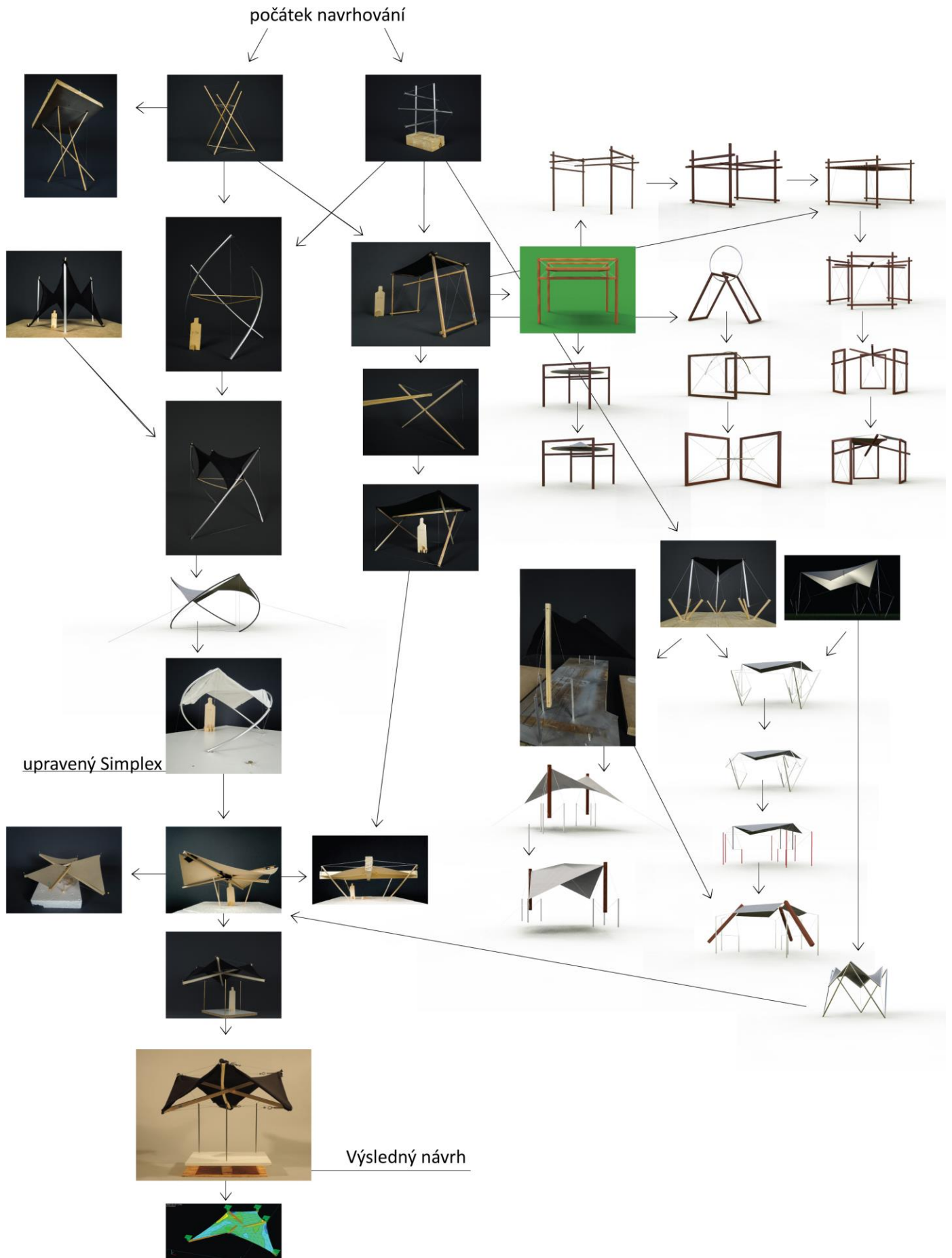
Obr.5 - Kurilpa Bridge z roku 2009, Tank Street, Brisbane, Queensland 4000 Australia, autor: Cox Rayner Architects with Arup (autor fotografie: Christopher Frederick Jones)



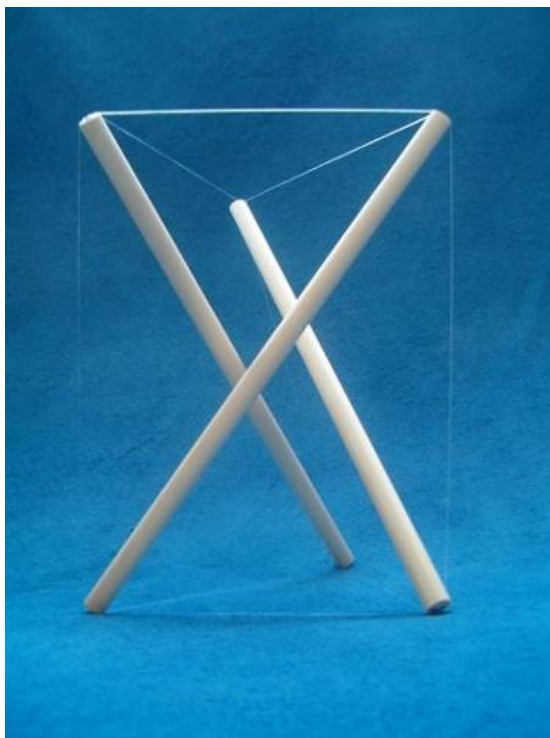
Obr.6 – Tensegrický pravidelný dvacetistěn



Obr.7 – Zleva: upravený Simplex tvořený oblými tyčemi s vnitřním předepnutím, propojení rámu - „falešná tensegrita“, využití principu Skylonu jako podpěrného sloupu



Obr.8 – Návrhový proces



Obr.9 – Simplex (autor modelu: Marcelo Pars, zdroj: <http://www.tensegriteit.nl>)



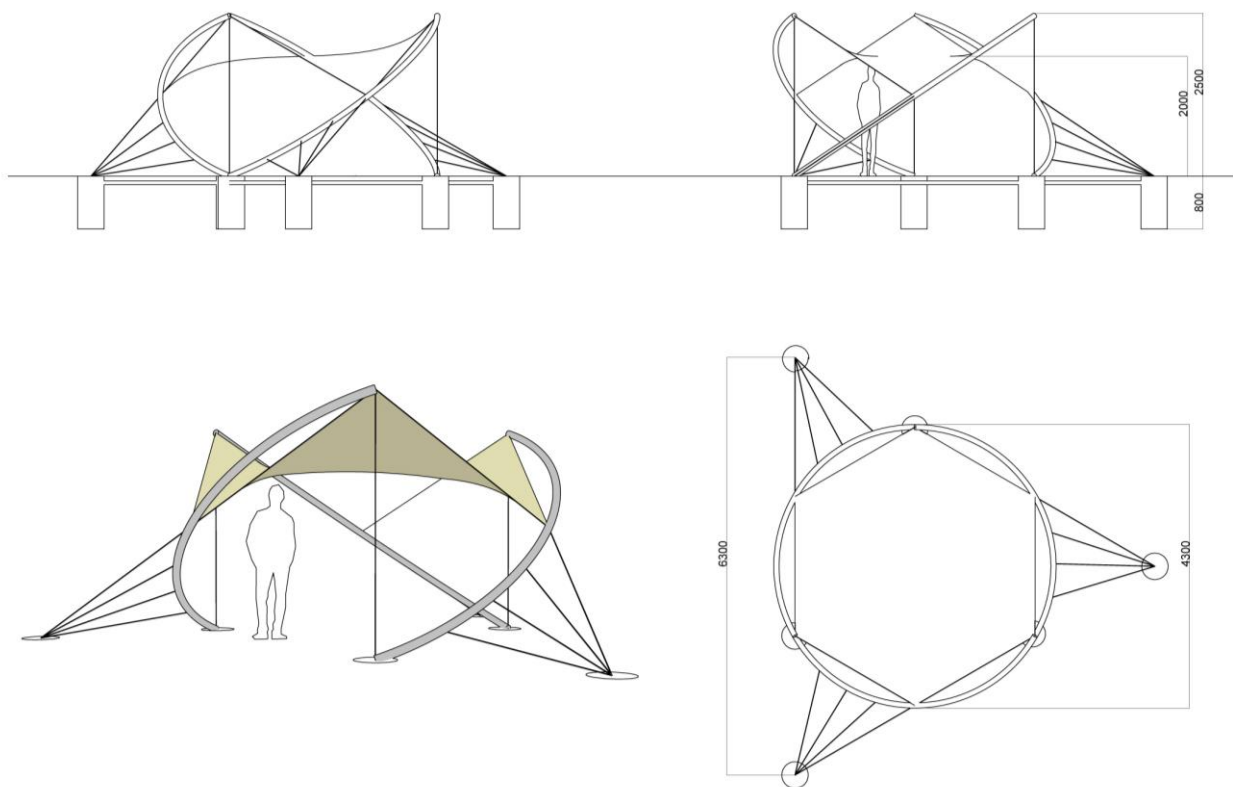
Obr.10 – Zleva: Upravený Simplex s vnitřními vzpěrami, půdorys



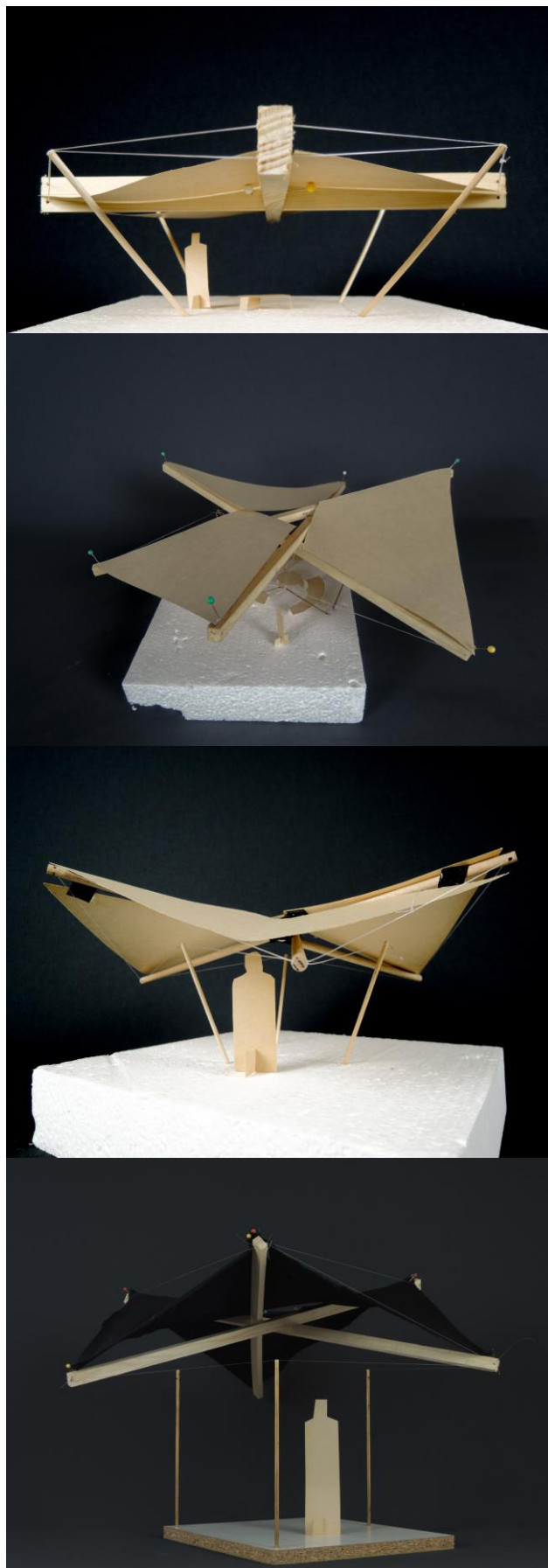
Obr.11 – Upravený Simplex varianta s plachtou ve tvaru zborcené plochy



Obr.12 – Upravený Simplex předeprnutý pomocí lan



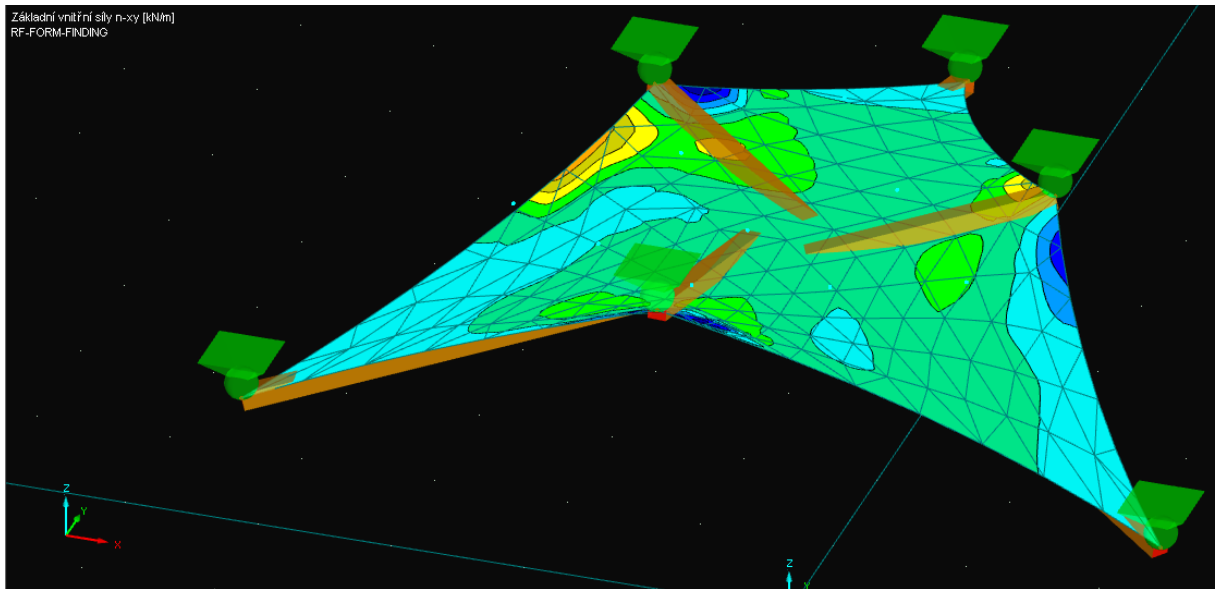
Obr.13 – Upravený Simplex předeprnutý pomocí lan - Vizualizace



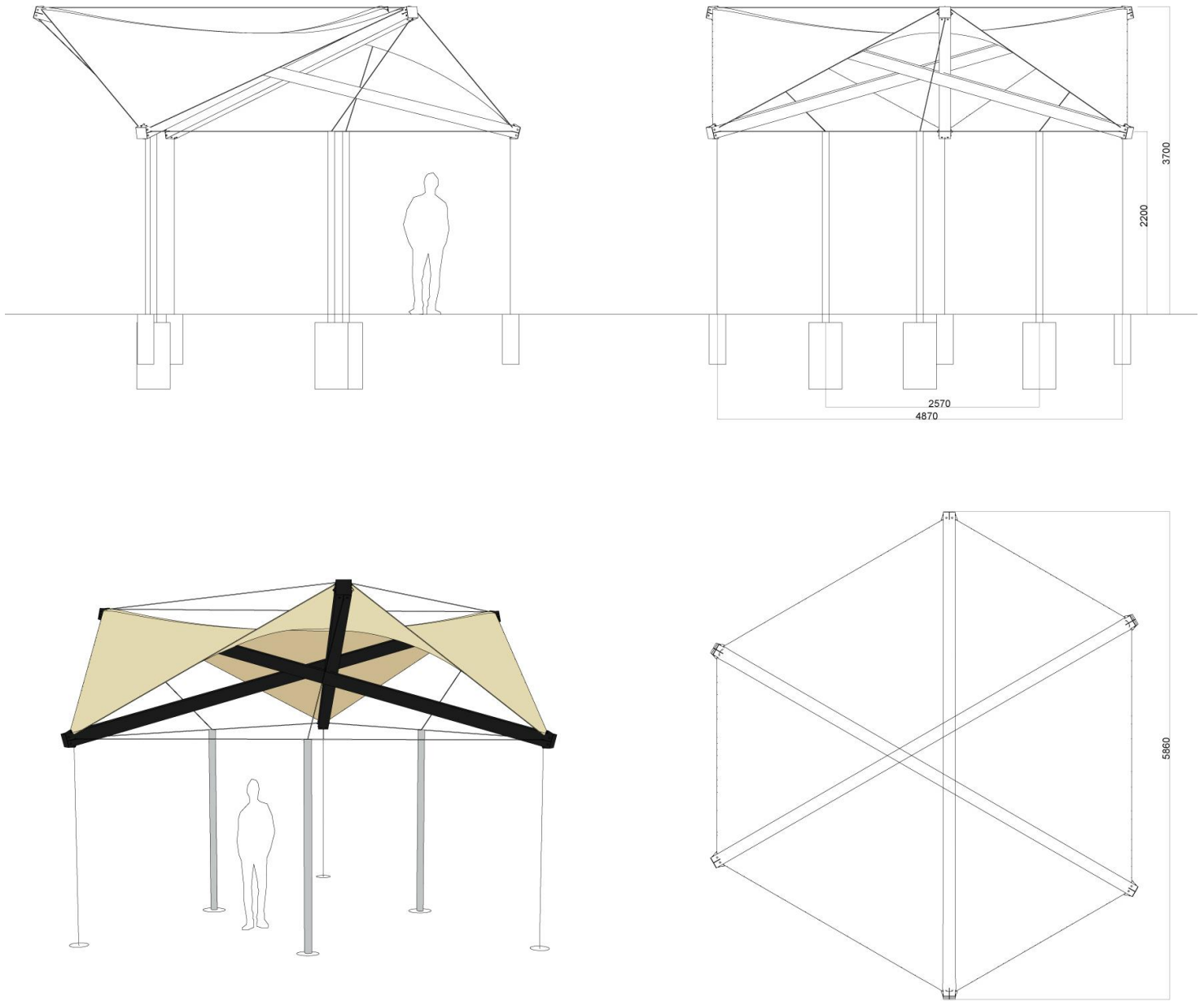
Obr.14 - Návrhy, které vznikaly po „Simplexu“



Obr.15 – Model výsledného návrhu



Obr.16 – Výpočet tvaru a střihu stínící plachty v programu Dlubal RFEM 5.18



Obr.17 Výsledný návrh