

Gymnázium Přírodní škola, o.p.s.
Profilová práce — třída Ný
Vyšší stupeň studia
2021/2022

Oliver Hajný

Tensegrita

Vedoucí práce: Ing. Filip Hložek

Datum odevzdání: 30.6.2022

*Nejdříve bych chtěl poděkovat
všem, kteří mi z prací pomáhali.
Panu učiteli Hložkovi za vedení
práce, a tátovi a mámě za podporu
a pomoc s praktickou prací.*

OBSAH

Úvod.....	4
Tensegrita.....	5
Definice.....	5
Původ	7
Princip a vlastnosti	10
Výskyt a využití	12
V architektuře a umění	12
V robotice.....	15
V biologii	16
V chemii	17
Výroba tensegritní struktury	18
Příprava	18
Modelování	18
Horní deska.....	18
Podstava	19
Vzpěry	20
Tisk	20
Montáž.....	21
Závěr	23
Seznam použitých zdrojů a literatury	24

Úvod

Moje profilová práce pojednává o fyzikálním principu s názvem tensegrita a jeho aplikaci.

Tensegrita vyjadřuje princip uspořádání prvků v soustavě, která je tvořena tahovým kontinuem a diskontinuálním tlakem. Stabilita struktury uspořádané podle tensegrity je zajištěna rovnováhou sil vyvolávajících tlak a napětí ve struktuře. Tensegrita se díky jejím mimořádným vlastnostem dá aplikovat na poměrně velké množství živých i neživých struktur z různých oborů.

Téma práce jsem si zvolil, protože jsem si chtěl vytvořit model využívající tensegritu, a zkoumat její vlastnosti na vlastní oči. Také mě osobně zajímalo, kde všude se dá s tensegritou potkat.

Kvalifikačních nebo jiných prací o tensegritě existuje několik, není však taková, která by v českém jazyce pojednávala ve velkém rozsahu o tensegritě obecně.

Prvním cílem práce je tvorba již zmíněného modelu využívajícího tensegritu, který by byl nevšední a atraktivní a našel uplatnění v domácnosti. Dále to je rešerše o tensegritě, studium tensegrity z hlediska fyziky, historie a jejího využití. Posledním cílem je tyto nabyté vědomosti sepsat v jedné teoretické práci. Celá práce má dva výstupy: teoretickou práci a praktický model.

Tensegrita

Definice

Definovat, co to vůbec tensegrita je, je hodně složité, protože žádná všeobecně uznávaná jednotná definice neexistuje. Anglické slovo tensegrity vymyslel Buckminster Fuller, slavný americký architekt a matematik, a vzniklo spojením dvou anglických slov - *tension* (napětí) a *integrity* (integrita).

Nejjednodušší definice tensegrity podle amerického sochaře Kennetha Snelsona zní:

“Tensegrity is floating compression.”

Dále ji rozvádí:

“Tensegrity describes a closed structural system composed of a set of three or more elongate compression struts within a network of tension tendons, the combined parts mutually supportive in such a way that the struts do not touch one another, but press outwardly against nodal points in a tension network to form a firm, triangulated, prestressed, tension and compression unit.”¹

Podle Snelsona tedy tensegrita označuje soustavu těles pod tlakem v síti tvořené mechanickým napětím. Tohoto typu konstrukce Snelson využíval ve většině svých soch.

Původní definice podle Buckminstera Fullera je nejvíce obecná a dá se aplikovat na širší okruh věcí:

“Tensegrity describes a structural relationship principle in which structural shape is guaranteed by the finitely closed, comprehensively continuous, tensional behaviours of the system and not by the discontinuous and exclusively local compressional member behaviours.”²

Fuller tedy říká, že tensegrita není nějaká strukturální soustava, ale princip strukturálního vztahu v soustavě, podle kterého je strukturální tvar zaručen tahovými vlastnostmi soustavy, a ne jejími tlakovými vlastnostmi.

René Motro ve své definici používá stejné pojmy jako Fuller, avšak vynechává myšlenku o strukturálním tvaru soustavy.

¹ COWCHER, Daniel Thomas. *Design and analysis of geodesic tensegrity structures with agriculture applications* [online]. Swansea: 2015. Diplomová Práce, Swansea University. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/161880274.pdf>

² FULLER, Buckminster. *Synergetics: Exploration in the Geometry of Thinking*. 1975: Macmillan Pub Co. ISBN 978-0020653202

*“Tensegrity system is a system in a stable self-equilibrated state comprising a discontinuous set of compressed components inside a continuum of tensioned components.”*³

Podle této definice by se mezi tensegritní struktury dali zařadit i hydraulické či pneumatické nafouknuté struktury, jako například fotbalový míč. Jeho pevný tvar je zajištěn tím, že stlačený vzduch uvnitř tlačí na napjatou kůži na povrchu míče.⁴

Geodetické kopule, jejichž velkým popularizátorem Fuller byl, také považoval za tensegritní struktury:

*“All geodesic domes are tensegrity structures, whether the tension - islanded compression differentiations are visible to the observer or not.”*⁵

V díle *Synergetics* rozšířil svou definici ještě dál, a to až na hranice metafyziky.⁶

*“The great structural systems of the Universe are accomplished by islanded compression and omnicontinuous tension.”*⁷

*“All structures, properly understood, from the solar system to the atom, are tensegrity structures. Universe is omnidimensional integrity.”*⁸

Veškeré struktury byly podle Fullera uspořádány podle principu tensegrity.

Všechny definice se však shodují v tom, že tensegritní struktura je tvořená navzájem se nedotýkajícími prvky, namáhanými tlakovými silami, v síti mechanického napětí. Nejčastěji se jedná o tyče nebo pruty propojené sítí napnutých lan.

Dále se tensegritní struktury rozlišují na čisté a nečisté. Za čisté se považují struktury, jejichž tlakové prvky - tyče - se podle definice výše navzájem nedotýkají, zatímco v nečistých tensegritních strukturách jsou spojovány do různých geometrických tvarů.⁹

³ MOTRO, René. *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. Londýn: Kogan Page Limited. ISBN 978-1903996379

⁴ COWCHER, Daniel. *Op. cit.*

⁵ FULLER, Buckminster. *Op. cit.*

⁶ COWCHER, Daniel. *Op. cit.*

⁷ FULLER, Buckminster. *Op. cit.*

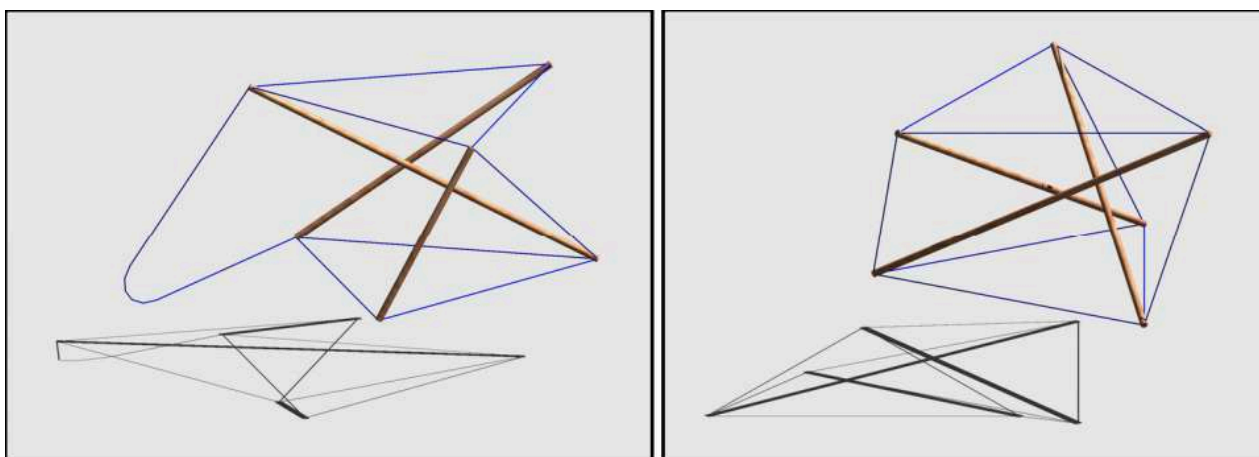
⁸ *Ibid.*

⁹ KOUDELKOVÁ, Věra a Petr KÁCOVSKÝ (ed.). *Veletrh nápadů učitelů fyziky 25: Sborník z konference* [online]. Praha: MatfyzPress 2020. ISBN 978-80-7378-432-4. Dostupné z: https://vnuf.cz/2020/sbornik_VNUF_2020.pdf. Str. 295.

Původ

Původ tensegrity je poměrně kontroverzní a není vůbec jednoznačný. Za vynálezce tensegrity se obecně považují architekti Buckminster Fuller, Kenneth Snelson nebo David Georges Emmerich. Všichni tři si jejich výtvořiny patentovali v 60. letech 20. století, přičemž Fuller získal patent jako první.

Avšak model podobný těm od Fullera, Snelsona nebo Emmericha vytvořil už v roce 1920 lotyšský avantgardní umělec Karl Ioganson. Jeho model “Gleichgewichtkonstruktion” (viz. Obrázek 1) je velice podobný nejjednodušší tensegritní struktuře “Simplex” od Snelsona. Absence předpětí, které je jednou z charakteristik tensegritních struktur, však neumožňuje, aby byl Iogansonův model považován za první vytvořenou tensegritní strukturu.¹⁰

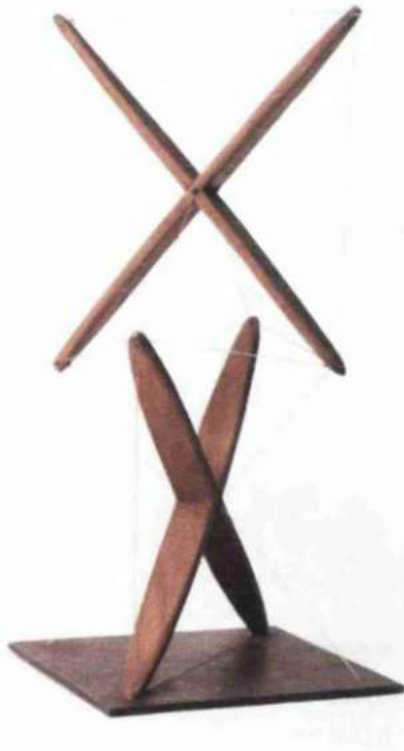


Obrázek 1 - Porovnání “Gleichgewichtkonstruktion” (vlevo) a “Simplex” (vpravo). In: GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín. *Controversial Origins of Tensegrity* [online]. Valencia: 2009. Diplomová práce, Universidad Politecnica de Valencia. Dostupné z: http://www.tensegridad.es/Publications/Controversial_Origins_Of_Tensegrity_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf

Mezi Fullerem a Snelsonem dlouho panovaly osobní rozepře o tom, komu by měly být připsány zásluhy za objevení tensegrity. Poznali se na univerzitě Black Mountain College v USA, Fuller jako nový profesor a Snelson jako student. Ovlivněn tím, co slýchal na Fullerových přednáškách, začal Snelson studovat tří dimenzionální struktury a v roce 1948 vytvořil “X-Piece” (viz. Obrázek 2), strukturu, která splňovala charakteristiky později definované tensegrity, a dá se tak považovat za první člověkem vytvořenou tensegritní strukturu vůbec. Postupně vytvářel další podobné struktury a

¹⁰ GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín. *Controversial Origins of Tensegrity* [online]. Valencia: 2009. Diplomová práce, Universidad Politecnica de Valencia. Dostupné z: http://www.tensegridad.es/Publications/Controversial_Origins_Of_Tensegrity_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf

ukazoval je Buckminsteru Fullerovi. Fullerovi se Snelsonovo dílo okamžitě zalíbilo řekl, že je to přesně to, co už 20 let hledal.¹¹ Také v jeho práci *Tensegrity* zmínil, že Snelson se stal jedním z jeho nejbližších studentů.¹²



Obrázek 2: “X-Piece”, první tensegritní struktura od Snelsona. In: COWCHER, Daniel Thomas. *Design and analysis of geodesic tensegrity structures with agriculture applications* [online]. Swansea: 2015. Diplomová Práce, Swansea University. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/161880274.pdf>

David Georges Emmerich mezitím nezávisle zkoumal Ioganssonovu práci a vytvořil struktury shodné s těmi od Snelsona nebo Fullera.

Fuller mezitím spolu se svými studenty vymýšlel další struktury a pokoušel se aplikovat tensegritu na geodetické kopule. Postupem času si začal přivlastňovat objev tensegrity, i když zpočátku uznával jako objevitele také Snelsona. Pojem tensegrita Fuller vymyslel v roce 1955, je dost možné, že právě tak si chtěl objev více přisvojit.¹³

¹¹ *Ibid.*

¹² FULLER, Buckminster Richard. *Tensegrity* [online]. 1961. Dostupné z: <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnotes/fpapers/tensegrity/tenseg01.html>

¹³ GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín. *Op. Cit.*

V roce 1959 v Muzeu moderního umění v New Yorku (MOMA) Fuller pořádal výstavu jeho práce, kde mimo jiné představil např. tensegritní stožár. Snelson tehdy trval na tom, aby byl veřejně přiznán jeho přínos k objevení a zkoumání tensegrity. Konkrétně tensegritní stožár, který Snelson nazýval spíše tensegritní věž (jmenuje se tak také jeho nejznámější dílo - "Needle tower"), byl také z velké části objeven díky němu. Fuller pod nátlakem Snelsonův podíl přiznal, ale stále si myslel, že největší posun v objevu a výzkumu tensegrity učinil on sám.¹⁴

*"Kdo vynalezl tensegritu? Je patrné, že odpověď tak patrná není. Podle mě původ tensegrity pramení ze synergie vytvořené oběma osobami, studentem a profesorem."*¹⁵

Jak Fuller, tak Snelson (a mezitím také Emmerich) zkoumali nadále tensegritu, avšak každý to pojmul trochu jinak. Snelson preferoval před složitým fyzikálním a matematickým přístupem přístup umělecký a soustředil svou práci na sochařský a estetický aspekt, zatímco Fuller a Emmerich hledali skrze vědecké experimenty možné aplikace tensegrity na architekturu a inženýrství.¹⁶

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ *Ibid.* (Vlastní překlad, upraveno)

¹⁶ *Ibid.*

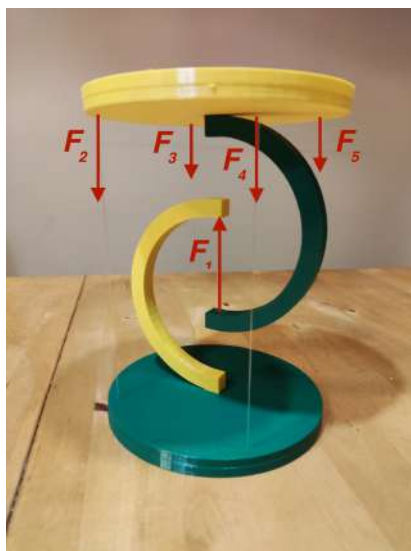
Princip a vlastnosti

“Prvky nesoucí tah v těchto strukturách – ať už jde o Fullerovy (geodetické) kopule nebo Snelsonovy sochy – mapují nejkratší cesty mezi sousedními prvky (a jsou tedy podle definice uspořádány geodeticky). Tažné síly se přirozeně přenášejí na nejkratší vzdálenost mezi dvěma body, takže prvky v tensegritních strukturách jsou přesně umístěny tak, aby co nejlépe odolávaly napětí. Z tohoto důvodu nabízejí tensegritní struktury maximální pevnost za daného množství stavebního materiálu.”¹⁷

Kromě vysoké pevnosti vykazují tensegritní struktury i vysokou pružnost, a to při zachování relativně nízké hmotnosti. Struktury jsou také velmi stabilní, zhroutnou se pouze v případě, že napětí na lanech povolí anebo se ohnou tlakové prvky (tyče). Předpětí však umožňuje, aby síť lan byla stále napjatá a celistvost struktury udržována.

Tensegritní struktury dokážou zdánlivě “popírat gravitaci”. Ve skutečnosti se jedná pouze o aplikaci základních fyzikálních zákonů.

Na tyče působí samozřejmě tíhová síla a navzájem na sebe působí ještě určitou tlakovou silou. Lana jsou mezi nimi napnutá a jsou tedy pod určitým napětím. Aby mohla část struktury “levitovat”, musí být napětí na lanech v rovnováze se silami působícími na tyče.¹⁸



Obrázek 3: Schéma sil působících na napnutá lana v tensegritní struktuře. Soukromý archiv.

¹⁷ INGBER, Donald E. The Architecture of Life. *Scientific American* [online]. Springer Nature, leden 1997, vol. 278, s. 48-57 [cit. 25.6.2022]. ISSN 0036-8733. Dostupné z: <https://www.rolfyoga.com/PDF/Ingber-ArchitectureOfLife.pdf> (Vlastní překlad)

¹⁸ KOUDELKOVÁ, Věra a Petr KÁCOVSKÝ. *Op. cit.*

Princip se dá také vysvětlit rozkladem sil. Na obrázku 3 jsou vidět síly, kterými jsou lana v tensegritní struktuře napínána. Síla F_1 působí proti tíhové síle horního tělesa, které se nachází ve vratké rovnovážné poloze. Jeho převrácení zabraňují síly F_2, F_3, F_4 a F_5 , kterými jsou napínána další čtyři lana. Pro síly F_1, F_2, F_3, F_4 a F_5 platí:

$$F_1 = F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

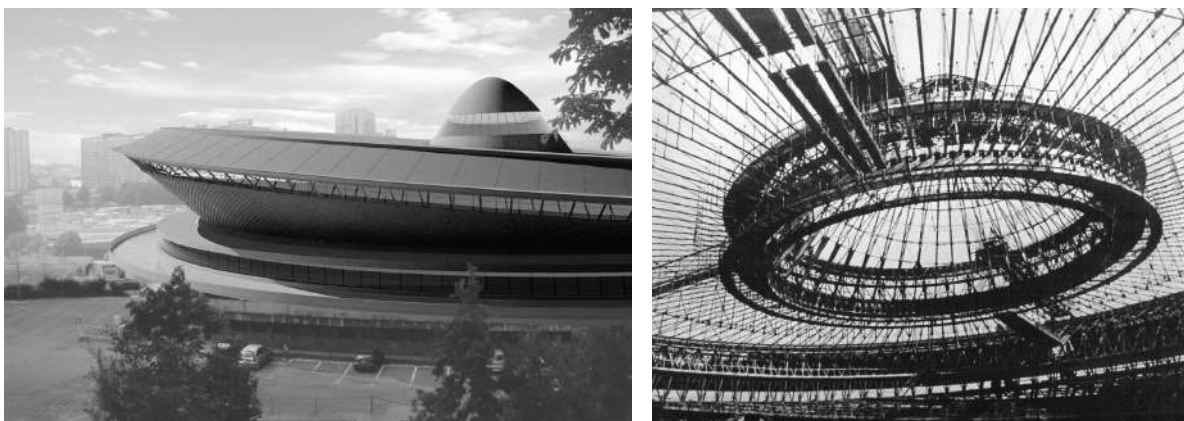
Výskyt a využití

S tensegritou se můžeme setkat ve velkém množství oborů, a to jak ve strukturách vytvořených člověkem, tak i ve strukturách přírodních.

V architektuře a umění

Tensegrita byla v historii několikrát využita při stavbě velkých hal, stadionů nebo mostů.

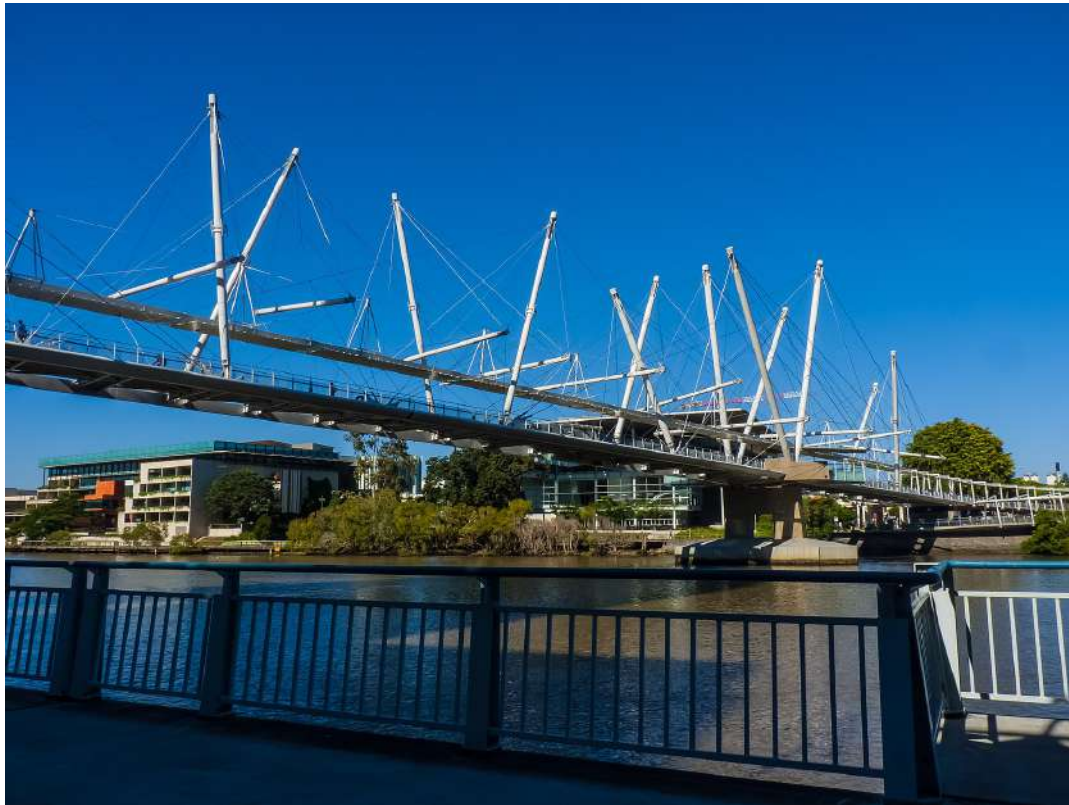
V případě stadionů nebo arén má tensegrita význam hlavně umělecký, jelikož se nejčastěji používá pro dosažení visutých střech. Jednou z prvních postavených staveb takto využívajících tensegritu je víceúčelová aréna *Spodek* (viz. Obrázek 4) v Katovicích. Její design zahrnuje masivní vznášející se střechu, která je držena pomocí komplexního systému kabelů (viz. Obrázek 5). Její inženýr Wacław Zalewski se podílel dále na stavbě Varšavského supermarketu *Supersam*, jehož unikátní střecha se také vznášela a byla stabilní díky tensegritě. *Supersam* byl v roce 2006 zdemolován. Mezi další slavné budovy patří *Olympijská gymnastická aréna v Soulu* nebo *Georgia Dome* v Atlantě, který byl však v roce 2017 také zdemolován.



Obrázek 4 a 5: W. Zalewski, Jeff Anderson, David Foxe. *Spodek, Katowice, Polsko. Exteriér (vlevo) a detail konstrukce střechy (vpravo)*. In: <https://structurae.net/en/structures/spodek/media>

V tensegritních mostech hraje tensegrita naopak roli velmi praktickou. Vlastnosti tensegritních struktur jako je mimořádná síla a pružnost společně s nízkou hmotností jsou pro konstrukci mostů ideální. Ukázkovým příkladem je největší tensegritní most na světě *Kurilpa Bridge* (viz. Obrázek 6) v Brisbane v Austrálii. Díky síle tensegrity bylo možné zkonstruovat velmi tenkou mostovku, a

tudíž také zkrátit rampu, která by jinak zasahovala dál do významného parku Kurilpa Point Park.¹⁹ Tensegrita se však vyskytuje i dalších mostech, např. *Golden Gate Bridge* nebo *Brooklyn Bridge*, kde napnuté kabely nesou tělo stavby.



Obrázek 6: John Robert McPherson. *Kurilpa Bridge from Bicentennial Bikeway Brisbane*, 15.9.2011. In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kurilpa_Bridge_from_Bicentennial_Bikeway_Brisbane_P1170755.jpg

Schopnost tensegritních struktur zdánlivě levitovat a chvilkově “ohromit” pozorovatele je ideální na tvorbu zajímavých uměleckých děl. Velké množství tensegritních soch vytvořil již dříve zmíněný architekt Kenneth Snelson. Nejčastěji tvořil takzvané čisté tensegritní struktury sestavené pouze z identických tyčí a lan. Mezi jeho nejznámější díla patří např. sochy *Soft Landing* (Denver, USA) a *Needle Tower* (Washington, D.C., USA).

Již dříve zmíněné geodetické kopule sice nejsou tensegritní struktury, ale sdílejí s nimi některé podobné vlastnosti. Geodetické kopule byly Fullerovým oblíbeným tématem a byl jejich velkým popularizátorem. Kopule jsou velmi praktické, protože dokážou uzavřít relativně velký prostor s

¹⁹ Cox Rayner + Arup complete worlds largest tensegrity bridge in Brisbane. In: World architecture news [online]. 13.10.2009 [cit. 23.6.2022]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20091017061217/http://www.worldarchitecturenews.com/index.php?fuseaction=wanappln.projectview&upload_id=12507

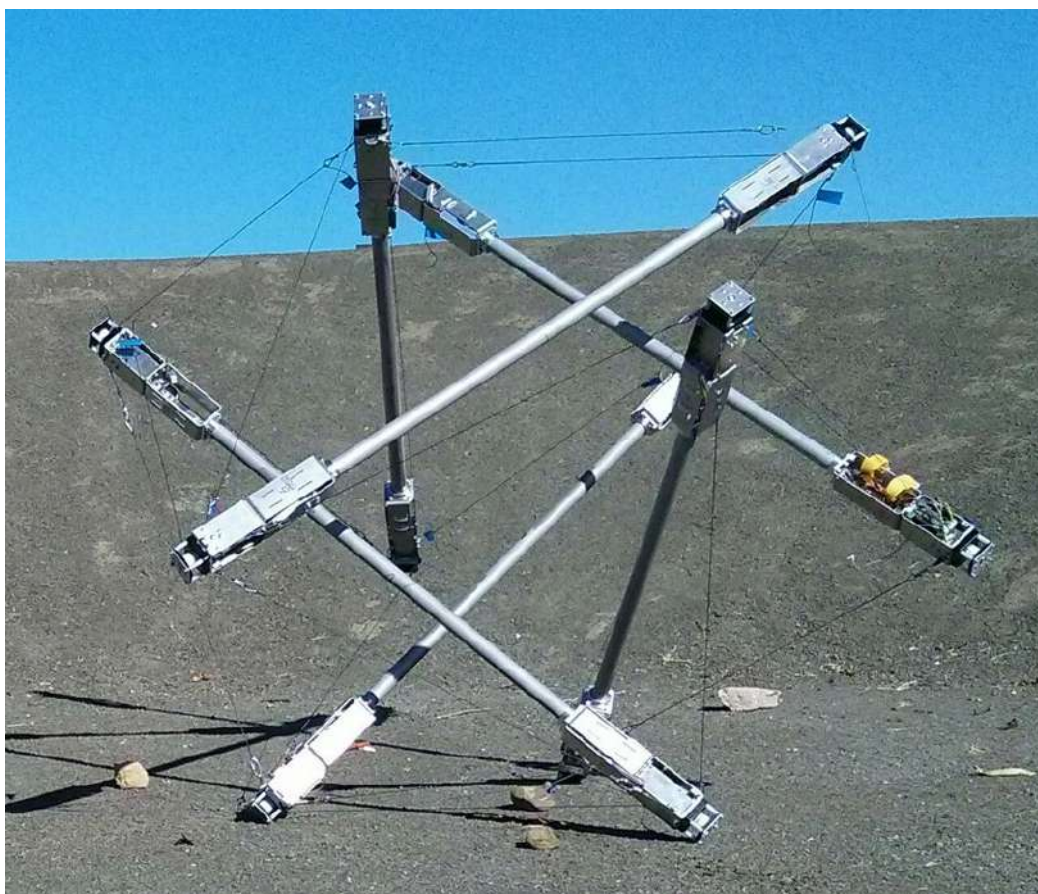


Obrázek 7: Cédric Thévenet. *Biosphère Montréal*, 12.10.2001. In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Biosph%C3%A8re_Montr%C3%A9al.jpg

malou spotřebou výrobního materiálu. Mohou být využity jako ochranné struktury pro skladovací prostory, pavilony, jako zastřešení měst kvůli kontrole prostředí (koncept *Domed city*) nebo přímo jako obyvatelné prostory pro lidi (geodetické kopule pro rekreační ubytování se hojně nachází v jižní Africe). Struktury jsou lehké a vysoce stabilní, a to díky vyrovnávání tlaku a napětí a způsobu, jakým jsou síly ve struktuře rozloženy a přenášeny, který je velmi podobný tomu v tensegritních strukturách.²⁰ To je nejspíš jeden z důvodů, proč Buckminster Fuller a další zkoušeli aplikovat tensegritu právě na konstrukci geodetických kopulí.

Geodetická kopule kolem francouzského Biosférického Muzea Životního Prostředí (viz. Obrázek 7), kterou Fuller navrhl, měla být původně tensegritní; z finančních a časových důvodů však byla vybudována pouze obyčejná geodetická kopule.

²⁰ COWCHER, Daniel. *Op. cit.*



Obrázek 8: Andrew P. Sabelhaus. *SUPERball, fully assembled, in the NASA Ames Research Center Roverscape*. In: Andrew P. SABELHAUS, Jonathan BRUCE, Ken CALUWAERTS, Pavlo MANOVI, Roya Fallah FIROOZI, Sarah DOBII, Alice M. AGOGINO, Vytas SunSpiral. *System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot* [online]. Červen 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282381177_System_design_and_locomotion_of_SUPERball_an_untethered_tensegrity_robot

V robotice

Vysoká odolnost tensegritních struktur proti vnějším silám je ideální pro roboty sloužící k prozkoumávání neznámých míst, např. povrchu cizí planety. Přesně takovým robotem je např. *NASA Super Ball Bot* (viz. Obrázek 8). Vnější tvar robota odpovídá tensegritnímu dvacetistěnu, konkrétně Jessenovu dvacetistěnu, a uprostřed se nachází zařízení pro sběr dat. Na povrch planety by mohl být shozen bez pomoci padáku díky jeho pružnosti zajištěné tensegritní konstrukcí - robot se od povrchu odrazí. Pohybuje se zkracováním, respektive prodlužováním napnutých lan.²¹

²¹ Super Ball Bot. In: *NASA.gov* [online]. 20.9.2014 [cit. 24.6.2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/super-ball-bot>

Tato schopnost tensegritních struktur měnit svůj tvar kontrakcí nebo prodloužením tažných prvků otevírá dveře futuristickým inženýrským projektům jako jsou deformovatelné mosty nebo letadla s křídly umožňujícími změnu tvaru.²²

V biologii

Tensegrita se dá aplikovat i na biologické struktury v živých organismech, a to na téměř všech velikostních měřítkách. V makroskopickém měřítku jsou kosti v lidském těle táhnuty proti směru tíhové síly a stabilizovány napjatými svaly, šlachy a vazy (fungují podobně jako lana v tensegritních sochách od Snelsona).²³

Principy tensegrity se nachází i na buněčné úrovni. Největším badatelem v tomto oboru je Donald Ingber, molekulární biolog a bioinženýr. Ingber vyvinul teorii o tom, jak může být systém cytoskeletových struktur v eukaryotické buňce vymodelován pomocí tensegrity. Cytoskelet je systém, který se skládá z proteinových vláken (mikrofilamentů), intermediárních filamentů a tubulů (mikrotubulů). Tensegritní model buňky pracuje s teorií, že celá buňka je tensegritní struktura.

Tažné síly vyvolávající napětí působí v tensegritním modelu buňky na mikrofilamenta a intermediární filamenta. Tyto síly jsou vyváženy tlakovými silami, které působí na mikrotubuly. Předpětí stabilizující tensegritní struktury je v buňce zajištěno kontraktiním aktomyosinem (aktinomyosinový komplex) který je součástí mikrofilament. ²⁴

Pokud je buňka matematicky vymodelována jako tensegritní struktura, procesy jako změna tvaru buňky při reakci na vnější tlak nebo interakci se substráty odpovídají chování skutečné buňky a je možné je dále zkoumat.²⁵ Stejně tak další geometrické vzorce vyskytující se v živých organismech mohou být pochopeny aplikováním principu tensegrity na soubory molekul, proteinů nebo orgánů.

²² University of California - San Diego. Strings As Structural Elements? Engineers Devise Mathematics For New Age Structures. In: *ScienceDaily* [online]. 6.4.2006 [cit. 28.6.2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2006/04/060406230835.htm>

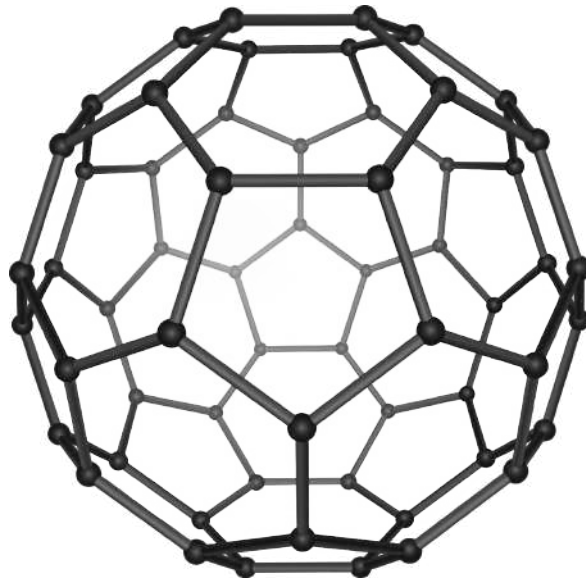
²³ INGBER, Donald E. *Op. cit.*

²⁴ VONDREJS, Vladimír. Tensegrity ve vědě, technice a umění. In: *Dialog Science and Art* [online]. [cit. 25.6.2022]. Dostupné z: <http://sciart-cz.eu/pdf/Vondrejscz.pdf>

²⁵ INGBER, Donald E. *Op. cit.*

Je možné, že biologické systémy organizované podle principu tensegrity jsou upřednostňovány v přirozeném výběru, jelikož interakce tlaku a napětí v tensegritních strukturách minimalizuje potřebný materiál k udržení stability a pevnosti struktury.²⁶

V chemii



Obrázek 9: 燃灯. *C60 Molecule*, 29.5.2022.
In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C60_Molecule.svg

Fullereny jsou relativně novou syntetickou formou uhlíku připomínající tvarem kouli. Nejstabilnější známý fullerén má podobu komolého dvacetistěnu s 60 uhlíky ve vrcholech (viz. Obrázek 9). Fullereny jsou neobyčejně odolné vůči vnějším fyzikálním vlivům. Čisté fullereny fungují jako izolátory a po přidání atomů alkalických kovů se stávají supravodivými. Protážené fullereny, uhlíkové nanotrubičky, jsou mimořádně pevná vlákna s vodivými vlastnostmi.²⁷

Fullereny jsou pojmenovány po Buckminster Fullerovi, protože připomínají jeho geodetické kopule. A stejně jako u geodetických kopulí je jejich struktura uspořádána tak, aby minimalizovala hmotu a spotřebu energie pomocí vyrovnání napětí a tlaku - pomocí tensegrity.²⁸

²⁶ SKELTON, Robert E., ROSARIO Montuori a Vincenza PECORARO. Globally stable minimal mass compressive tensegrity structures. *Composite structures*. Volume 141, 2016, s. 346-354. ISSN 0263-8223. Citováno v: Tensegrity [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Posl. aktualizace: 17.6.2022 [cit. 26.6.2022]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tensegrity>

²⁷ VONDREJS, Vladimír. *Op. cit.*

²⁸ INGBER, Donald E. *Op. cit.*

Výroba tensegritní struktury

Příprava

Měl jsem za cíl vyrobit tensegritní strukturu, která by měla nějaké využití v domácnosti. Po uvážení jsem zvolil stojan s talířkem, na který se dá umístit květináč. Funkci má tedy hlavně dekorativní.

Dalším problémem byla volba výrobního materiálu. Při vymýšlení záměru práce jsem měl na mysli dřevo, ale postupem času jsem došel k závěru, že nejlepší volbou bude plast jako filament v 3D tiskárně. Proces tisku je poměrně rychlý a nabízí tím pádem možnost model vyrobit vícekrát, aby byl co nejdokonalejší. Konkrétně jsem zvolil filament PETG, protože má dobré tiskové vlastnosti (stejně jako nejpoužívanější PLA), ale vykazuje větší pružnost a menší křehkost, je proto vhodný na tisk mechanicky namáhaných částí. Tudiž je ideální pro tisk tensegritního modelu, který bude muset unést ještě váhu květináče.

Jako tažný prvek jsem měl v plánu použít průhledné silonové vlákno, aby byl co nejméně viditelný. To na první pohled vyvolá dojem, že stojan popírá gravitaci.

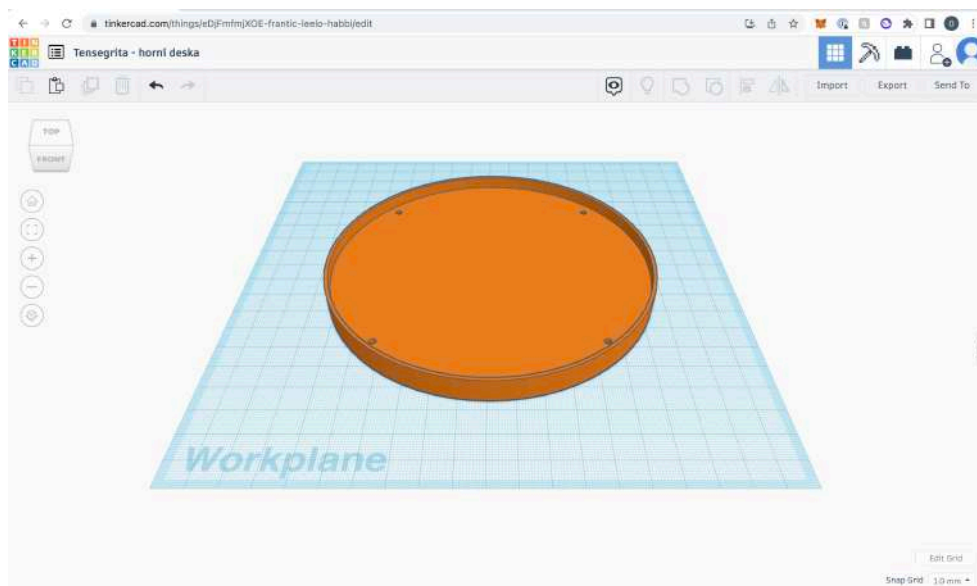
Modelování

K 3D modelování jsem používal bezplatný online program Tinkercad, protože má velmi uživatelsky přívětivé rozhraní. Tinkercad nabízí poměrně málo funkcí oproti jiným více profesionálním programům, ale na modelování mého stojanu stačí pouze základní geometrická tělesa a k tomu je Tinkercad ideální.

Bylo potřeba vymodelovat čtyři částí modelu. Horní desku, spodní podstavec a dvě obloukové vzpěry.

Horní deska

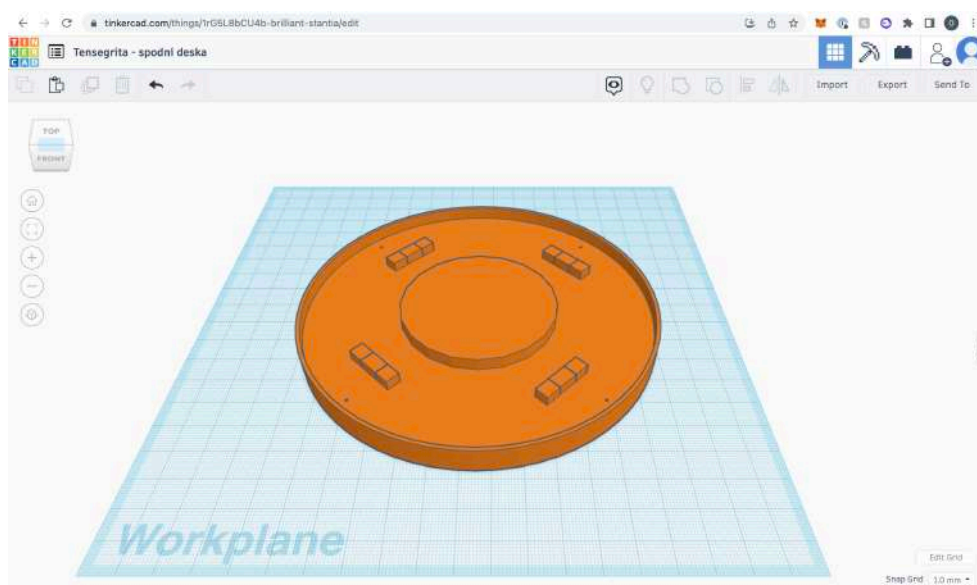
Horní deska je poměrně jednoduchá. Jedná se o válec o výšce 5 mm a průměru 13 cm, na kterém je posazen rám o výšce také 5 mm a tloušťce 2 mm. Zespoda desky je díra se čtvercovým průřezem s délkou strany 1 cm, která je hluboká 4 mm. Do ní bude zasazena jedna oblouková vzpěra. V ploše desky se nachází ještě čtyři kruhové průřezy o průměru 1 mm, které slouží k provléknutí silonového vlákna. Na obrázku 10 je vidět hotový model desky v programu Tinkercad.



Obrázek 10: 3D model horní desky. Soukromý archiv

Podstava

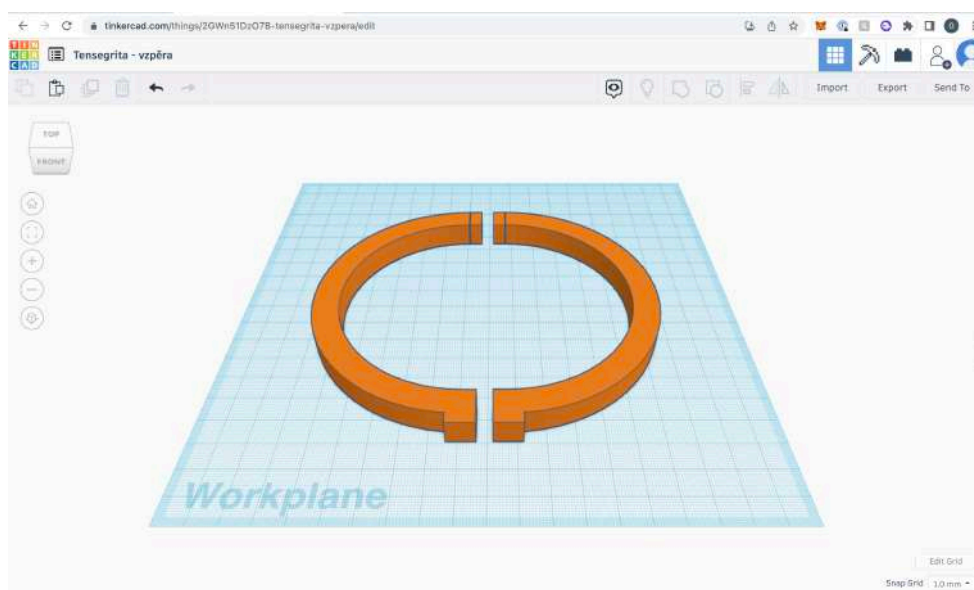
K modelování podstav jsem použil již vytvořený model horní desky. Doplnil jsem ho o válec uprostřed kvůli zvýšení stability a o malé kvádry se zářezy o šířce 0,4 mm, do kterých se dá zaseknout vlákno. Na obrázku 11 je hotová podstava v Tinkercadu.



Obrázek 11: 3D model spodní podstavy. Soukromý archiv

Vzpěry

Vzpěry jsou v podstatě dva identické oblouky kružnice o poloměru 6 cm. Šířka a hloubka je 1 cm. Na jedné straně oblouku je výstup vysoký 4 mm se čtvercovým průřezem o délce strany 1 cm, který se zasadí do podstavy, respektive talířku. Na opačné straně oblouku se nachází průřez o průměru 1 mm k provléknutí vlákna, kterým se vzájemně spojí obě vzpěry. Hotové vzpěry můžete vidět na obr. 12.



Obrázek 12: 3D model obloukových vzpěr. Soukromý archiv

Tisk

Hotové modely jsem nahrál do programu PrusaSlicer, který je exportuje ve formě G-kódu, podle kterého 3D tiskárna následně tiskne. O samotný tisk se postarala tiskárna Original Prusa i3 MK3S+. Jako filament byl použit již zmíněný Prusament PETG a tloušťka vrstvy byla nastavena na 0,3 mm. Ukázalo se, že tato tloušťka nestačila na tisk dírek na provlečení vlákna, které byly zanesené a nedokonalé, a musel jsem ji změnit na 0,2 mm. Tato tloušťka vrstvy byla ideální. Kvůli nedokonalostem, které se běžně vyskytují při 3D tisku, jsem musel tisk u každé části modelu několikrát opakovat. Na obr. 13 Jsou k vidění všechny vytisknuté části.



Obrázek 13: *Vytisknuté části modelu.* Soukromý archiv

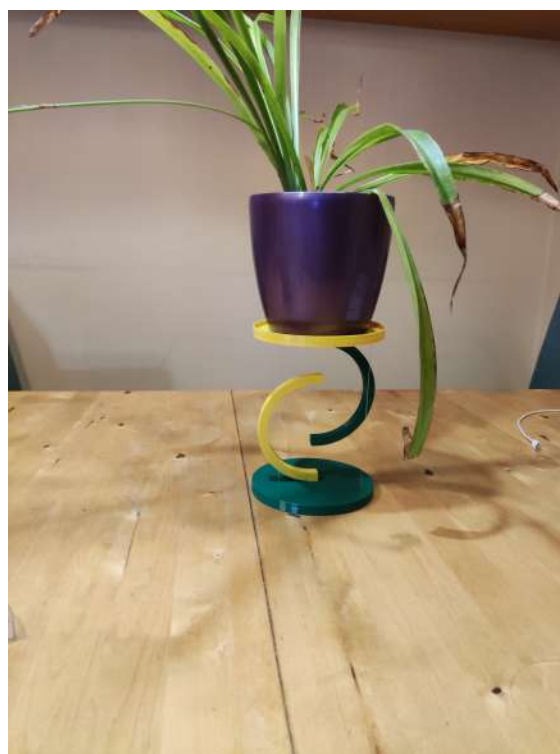
Montáž

První krok při montáži bylo spojit obloukové vzpěry s podstavou a talířkem. Vzpěry držely po zacvaknutí skvěle ale pro zvýšení stability jsem do děr v podstavě a talířku nanesl rychle tvrdnoucí sekundové lepidlo.

Při napínání vláken se ukázalo, že nejlepší postup je nejdříve napnout vlákno, jehož síla působí proti tíhové síle horní části modelu. To znamená vlákno uprostřed, které spojuje obě vzpěry. Po napnutí prostředního vlákna bylo potřeba napnout zbylá čtyři mezi podstavou a talířkem. Protáhl jsem jednotlivá vlákna skrz díry naproti sobě a na koncích u talířku jsem je zajistil uzly. Na druhém konci jsem vlákna provizorně zasekl do zářezů v podstavě. Zbývalo už jenom napínat jednotlivá vlákna, dokud nebude horní část struktury stát vodorovně. Přebytné vlákno jsem odštíhl a zajistil dvojitým zaseknutím do zářezů (viz. Obr. 14). Hotový stojan je zachycen na Obr. 15 a na Obr. 16 je zatížen květináčem.



Obrázek 14: *Vlákno zaseknuté v zářezech.*
Soukromý archiv



Obrázek 15 a 16: *Hotový stojan (vlevo), Stojan zatížený květináčem (vpravo).* Soukromý archiv

Závěr

Během práce jsem výrazně rozšířil své vědomosti o tensegritě. O jejím objevu, historii, principu a využití. Vše jsem sepsal do jedné teoretické práce s názvem *Tensegrita*. Práce se týká mnoha témat, se kterými však pracuje pouze povrchově a nezabíhá do podrobností. Slouží tak jako úvod do tématu tensegrita, a je určena především tomu, kdo je s tématem jen málo obeznámen. Existuje mnoho prací, které se více podrobně věnují konkrétnějším tématům, jako je využití v určitém oboru ap.

Podařilo se mi vyrobit stojan na květináč, který působí atraktivně, a to díky tensegritě. Jednotlivé části jsou vytisknuté na 3D tiskárně a spojeny pomocí silonového vlákna. Popis postupu práce může sloužit jako inspirace při výrobě vlastní tensegritní struktury.

Seznam použitých zdrojů a literatury

COWCHER, Daniel Thomas. *Design and analysis of geodesic tensegrity structures with agriculture applications* [online]. Swansea: 2015. Diplomová Práce, Swansea University. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/161880274.pdf>

FULLER, Buckminster. *Synergetics: Exploration in the Geometry of Thinking*. 1975: Macmillan Pub Co. ISBN 978-0020653202

MOTRO, René. *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. Londýn: Kogan Page Limited. ISBN 978-1903996379

KOUDELKOVÁ, Věra a Petr KÁCOVSKÝ (ed.). *Veletrh nápadů učitelů fyziky 25: Sborník z konference* [online]. Praha: MatfyzPress 2020. ISBN 978-80-7378-432-4. Dostupné z: https://vnuf.cz/2020/sbornik_VNUF_2020.pdf.

GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín. *Controversial Origins of Tensegrity* [online]. Valencia: 2009. Diplomová práce, Universidad Politecnica de Valencia. Dostupné z: http://www.tensegridad.es/Publications/Controversial_Origins_Of_Tensegrity_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf

INGBER, Donald E. The Architecture of Life. *Scientific American* [online]. Springer Nature, leden 1997, vol. 278, s. 48-57 [cit. 25.6.2022]. ISSN 0036-8733. Dostupné z: <https://www.rolfyoga.com/PDF/Ingber-ArchitectureOfLife.pdf>

Cox Rayner + Arup complete worlds largest tensegrity bridge in Brisbane. In: *World architecture news* [online]. 13.10.2009 [cit. 23.6.2022]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20091017061217/http://www.worldarchitecturenews.com/index.php?fuseaction=wanappln.projectview&upload_id=12507

Super Ball Bot. In: *NASA.gov* [online]. 20.9.2014 [cit. 24.6.2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/super-ball-bot>

University of California - San Diego. Strings As Structural Elements? Engineers Devise Mathematics For New Age Structures. In: *ScienceDaily* [online]. 6.4.2006 [cit. 28.6.2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2006/04/060406230835.htm>

VONDREJS, Vladimír. Tensegrity ve vědě, technice a umění. In: *Dialog Science and Art* [online]. [cit. 25.6.2022]. Dostupné z: <http://sciart-cz.eu/pdf/Vondrejscz.pdf>

SKELTON, Robert E., ROSARIO Montuori a Vincenza PECORARO. Globally stable minimal mass compressive tensegrity structures. *Composite structures*. Volume 141, 2016, s. 346-354. ISSN 0263-8223. Citováno v: Tensegrity [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Posl. aktualizace: 17.6.2022 [cit. 26.6.2022]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tensegrity>