



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta umění a architektury



Tvarování dřeva prořezáváním a jeho použití v architektuře

Bakalářská práce

Studijní program:

B8208 Design

Studijní obor:

Design prostředí

Autor práce:

Bc. Michaela Bergová

Vedoucí práce:

Ing. arch. Mag. arch. Saman Saffarian

Katedra architektury





Zadání bakalářské práce

Tvarování dřeva prořezáváním a jeho použití v architektuře

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Bergová**
Osobní číslo: A16000031
Studijní program: B8208 Design
Studijní obor: Design prostředí
Zadávající katedra: Katedra umění
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

Tématem bakalářské práce je výzkum technologie tvarování dřeva prořezáváním (anglicky kerf bending). Tato metoda spočívá v tvarování deskových a tyčových materiálů (dřevo, papír, plasty, kovy) pomocí prořezávání a odlehčování. S využitím nadefinovaných geometrických vzorů a jejich kombinací, které jsou do materiálu vyřezány můžeme docílit proměnlivou ohebnost v různých rádiích ohybu do relativně komplexních forem a tvarů.

1. Koncept
2. Vizualizace, fotodokumentace, videodokumentace
3. Průvodní teoretická zpráva v pevné vazbě, včetně zadání práce a prohlášení o autorském právu. Zpráva obsahuje mezi jinými úvod, přehled literatury a zdrojů, výsledky a diskuzi a řídí se specifikacemi v dokumentu „Požadavky na vypracování bakalářské práce – KED“. Zdroje musí být citované dle Směrnice rektora TUL č. 5/2018.
4. Elektronická podoba všech částí bakalářské práce (akceptovatelné formáty pdf, pdf/A).
5. V systému STAG (Moje studium-Kvalifikační práce-Doplnit údaje o práci) vložit veškerá data o práci a soubor obsahující kompletní výkresovou i textovou dokumentaci, průvodní zprávu, technickou zprávu a doplnit související textová pole.

Seznam odborné literatury:

- 1 GUTOWSKI, Sarah Margaret. The bright side of failure: developing a set of lamps from an unsuccessful chair, Master thesis [online]. University of Iowa, 2017.
 - 2 MACKEY, Chris & HOFFER, Brian & MIRANOWSKI, Dave & CRAIN, Tyler. KERF Pavilion [online]. Massachusetts Institute of Technology, 2017.
 - 3 CAPONE, Mara & LANZARA, Emanuela. Parametric Kerf Bending: Manufacturing Double Curvature Surfaces for Wooden Furniture Design [online]. University of Naples Federico II, 2019.
 - 4 GILLKSVIT, Oscar & HENRIKSSON, Victoria & POULSEN, Emil. Digital Wood – Design & fabrication of a full-scale exhibition structure in plywood [online]. Chalmers University of Technology, 2016.
 - 5 FOLTMAN, Andrzej & TALAEI, Ardeshir & ALCALÁ, Luis Arturo Pachecho & PRAJAPAT, Subhash. An Exploration on the Possibility of Double-Curved Wooden Panels Fabrication [online]. Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2019.
- Další bibliografie uvedena v teoretické části z důvody omezené kapacity znaků v systému.

Vedoucí práce:

Ing. arch. Mag. arch. Saman Saffarian
Katedra architektury

Datum zadání práce:

24. února 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

29. května 2020

Ing. arch. MgA. Osamu Okamura
děkan

L.S.

doc. MgA. Jan Stolin
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

28. května 2020

Bc. Michaela Bergová

Poděkování

Ráda bych poděkovala zejména svému vedoucímu bakalářské práce Ing. arch. Mag. arch. Samanu Saffarianovi za jeho vedení poslední dva roky, podporu a obrovskou motivaci při tvorbě této práce., která by bez něj nikdy nevznikla. Dále bych chtěla poděkovat jeho asistentovi Bc. BcA. Janu Kovářičkovi za pomoc s digitální částí a prezentací projektu. Také své mamce a přítelovi, kteří mě po celou dobu mého studia podporují.

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je výzkum technologie tvarování dřeva prořezáváním (anglicky kerf bending). Tato metoda spočívá v tvarování deskových a tyčových materiálů (dřevo, papír, plasty, kovy) pomocí prořezávání a odlehčování. S využitím nadefinovaných geometrických vzorů a jejich kombinací, které jsou do materiálu vyřezány můžeme docílit proměnlivou ohebnost v různých rádiích ohybu do relativně komplexních forem a tvarů.

Autorka pracuje formou iterací digitálních prototypů a jejich fyzických modelů pro ověření meze ohýbání dřeva. Tento proces vytváří zpětnou vazbu pro kalibraci digitálních a následných fyzických modelů. Provedené testy nadefinovaly specifické parametry pro výslednou digitální a fyzickou práci. Výsledkem této činnosti je rozsáhlý katalog znalostí aplikace technologie prořezávání pro tvorbu tvarově náročných prostorových forem.

Prostorově materiálové kapacity technologie jsou demonstrovány v prototypu v adekvátním měřítku. Výsledným digitálně zpracovaným prototypem je sloup (1:1), který vychází z předchozích studií, dílčích fyzických testů a zanalyzovaných možností ohýbání v návaznosti na prostudované geometrické vzory. Práce dále umožní další vývoj v hledání možností uplatnění metody prořezávání pro komplexnější formy a tvary pro uplatnění v architektuře a produktovém designu.

Abstract

The topic of this bachelor thesis is a research of the technology of shaping wood by pruning called kerf bending. This method consists of shaping plate and bar materials (wood, paper, plastics, metals) by pruning and relieving. Using defined geometrical patterns and their combinations, which are cut into the material, we can achieve variable flexibility in various bending radius into relatively complex forms and shapes.

The author works in the form of iterations of digital prototypes and their physical models to verify the limit of wood bending. This process generates positive feedback for the calibration of digital and subsequent physical models. The tests defined specific parameters for the resulting digital and physical work. The result of this activity is an extensive catalog of knowledge of the application of pruning technology for the creation of shape-intensive spatial forms.

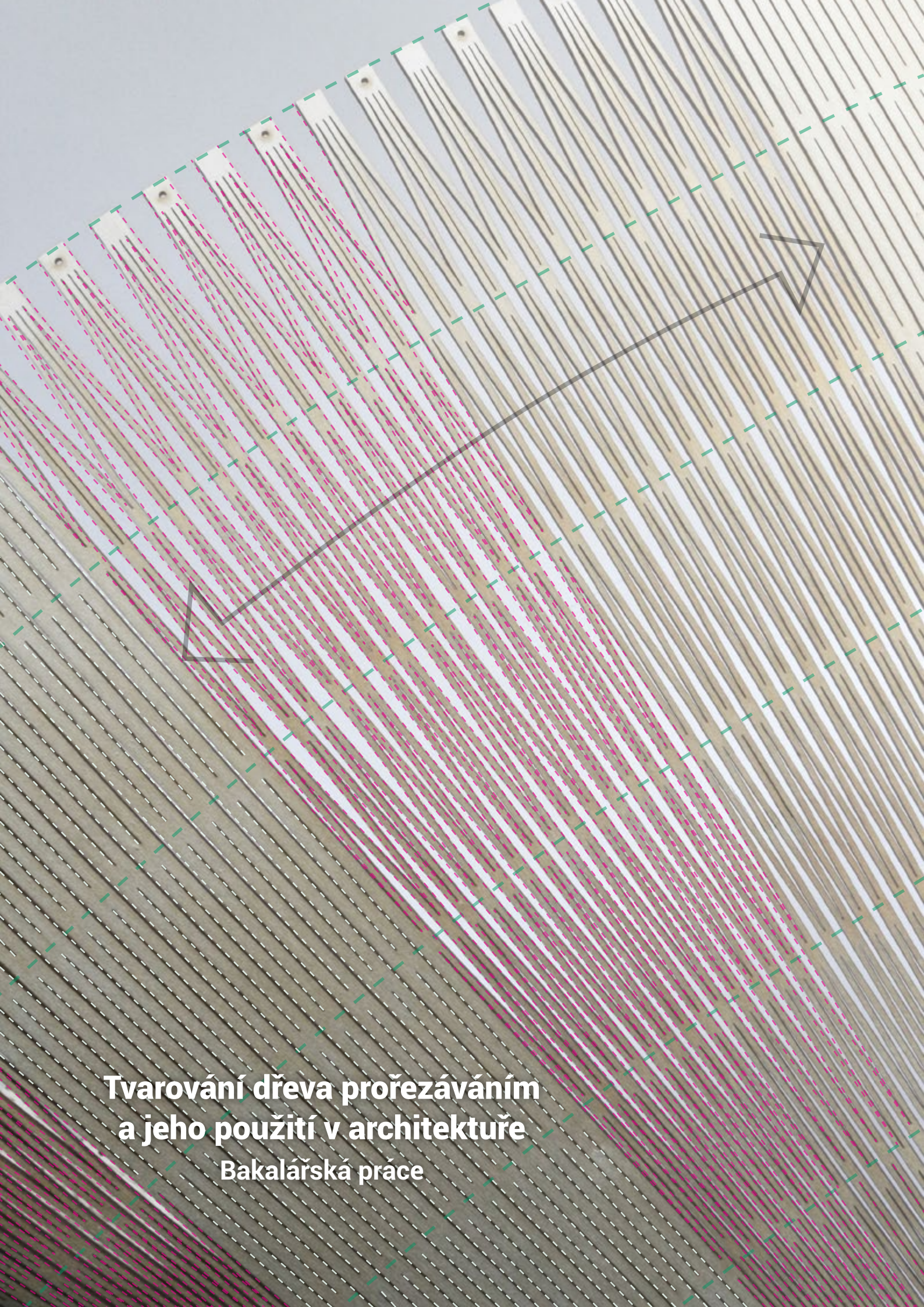
The spatial material capacities of the technology are demonstrated in a prototype on an adequate scale. The resulting digitally processed prototype is a column (1: 1), based on previous studies, partial physical tests, and analyzed bending options in conjunction with studied geometric patterns. The work will also enable further development in the search for the application of the pruning method for more complex forms and shapes for application in architecture and product design.

Klíčová slova: dřevo, tvarování dřeva, prořezávání dřeva, digitální dřevo, výzkum, nové technologie, architektura

Keywords: wood, kerf bending, digital wood, research, new technologies, architecture

OBSAH

1	Úvod	2-3		
2	Princip metody a její vývoj	4-9		
2.1	Druhy a princip ohybu	4		
2.2	Příklady z prvotního využití metody	5		
2.3	Vliv směru vláken na ohyb materiálu	6-8		
2.4	Kalibrace digitálních a fyzických modelů	9		
3	Současné referenční projekty	10-21		
3.1	Pavilion Nautilé Sylvestre v Belgii	10-11		
3.2	Dukta Flexible Wood	11-13		
3.2.1	Koncertní hala Toni Areal ve Švýcarsku	12		
3.2.2	Spinneyback Studio	13		
3.3	Akademické projekty	14-21		
3.3.1	Geodetická kupole / <i>Geodesic dome</i>	14		
3.3.2	Parametrický živoucí vzor / <i>Parametric Living Hinge</i>	14		
3.3.3	Zakřivené skládání / <i>Curved Crease Folding</i>	15		
3.3.4	Výplně na míru / <i>Tailored Infill</i>	16		
3.3.5	Anatomie ruky / <i>Hand Anatomy</i>	16		
3.3.6	Prořezávané pavilony / <i>Kerf Pavilions</i>	17		
3.3.7	Zakřivené ohýbání / <i>Curved-line Bending</i>	18		
3.3.8	Flexibilita plošných materiálů / <i>Flexibility of Planar Materials</i>	19		
3.3.9	Parametrický ohyb prořezáváním / <i>Parametric Kerf Bending</i>	20		
3.3.10	Akustický dřevěný vlnitý podhled / <i>Wooden Waves Acoustic Ceiling</i>	21		
4	Katalog fyzických a digitálních prototypů	22-43		
4.1	Liniové otevřené vzory	22-34		
4.1.1	Jednoduchý čárový vzor / <i>Simple Lattice Hinge</i>	22-26		
4.1.2	Parabolický hyperboloid a aplikace tří vzorů	27-29		
4.1.3	Hexagonální model	30		
4.1.4	Vzory vln a kalibrace fyzického s digitálním modelem	31-33		
4.1.5	Křížové vzory / <i>Crosses patterns</i>	34		
4.2	Liniové uzavřené vzory	35-40		
4.2.1	Trojúhelníkové vzory a jejich variace / <i>Triangular patterns</i>	35-37		
4.2.2	Vlny, kruhy, obdélníky	38-39		
4.2.3	Hvězdicový vzor	40		
4.3	Kombinace vzorů	40-43		
4.3.1	Experiment s překreslením vzoru anatomie ruky	43		
5	Praktická část	44-67		
5.1	První fyzický model sloupu	44-49		
5.1.1	První prototypy	45-46		
5.1.2	Vývoj finálního prvního prototypu	47-48		
5.1.3	Ponaučení pro další prototypy	49		
5.2	Parametrizace vzorů pomocí Grasshopperu	50-51		
5.3	Nové digitální prototypy	52-55		
5.3.1	Trojúhelníkové skládání	52		
5.3.2	Geometrické vrstvení, jeho princip a výhody	52-53		
5.3.3	Možné varianty	54-55		
5.4	Finální varianta a její vývoj z předchozích prototypů	56-65		
5.4.1	Analýza křivosti tvaru	57		
5.4.2	Možné způsoby panelizace	58-59		
5.4.3	Tvorba vzorů panelů	60-61		
5.4.4	Napojování panelů	62-63		
5.4.5	Technická výkresová dokumentace	64-65		
5.4.6	Časová náročnost provedení	65		
5.4.7	Užité prostředky k výrobě.....	65		
5.5	Variace hmotového uspořádání	66-67		
6	Závěr	68		
7	Výhled do budoucna	69		
8	Seznam použité literatury a zdrojů	70		
9	Seznam obrázků	71-73		
10	Přílohy	74		



Tvarování dřeva prořezáváním a jeho použití v architektuře

Bakalářská práce

1 Úvod

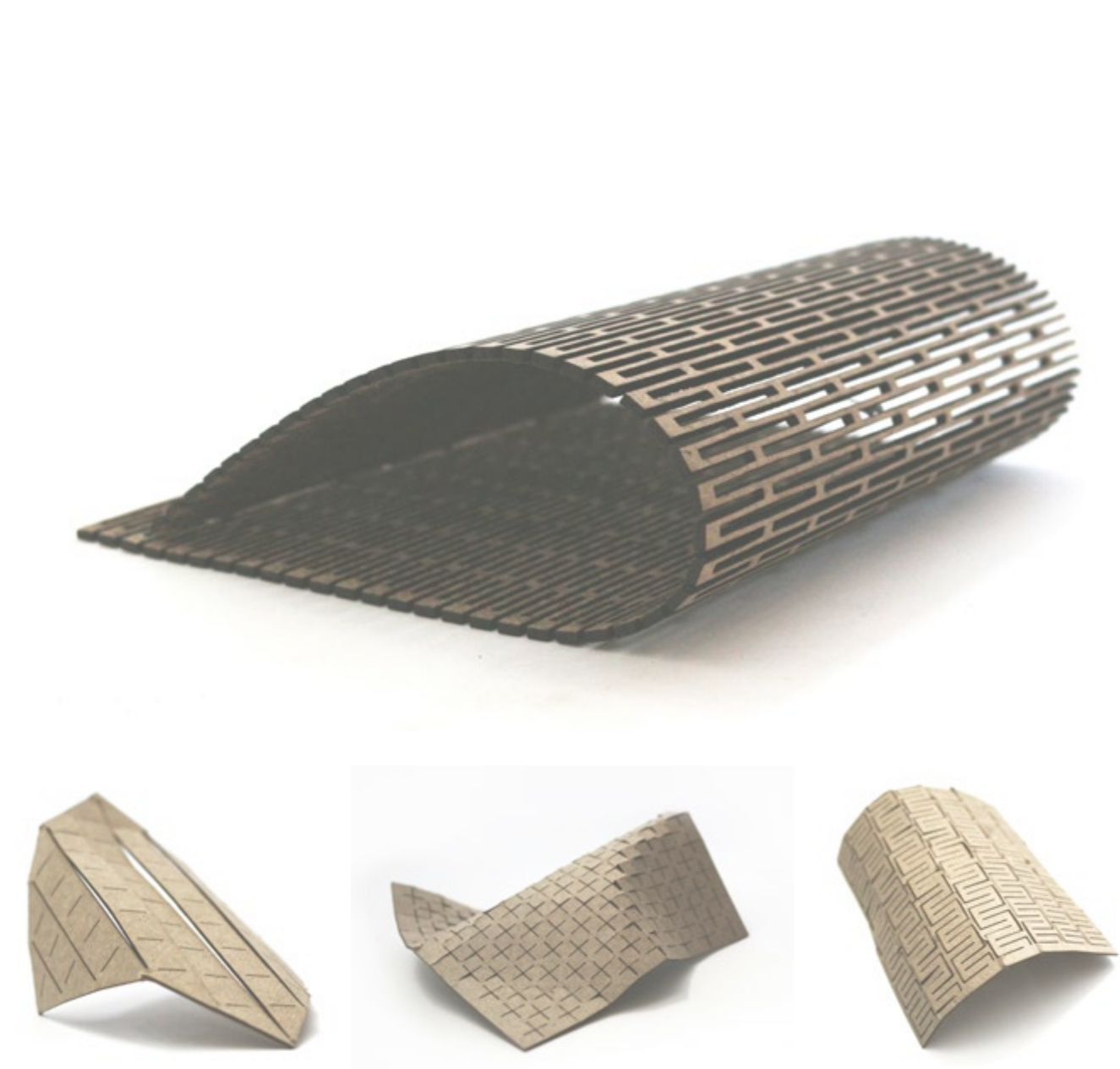
Bakalářská práce navazuje na výzkum z předchozího semestru, ve kterém bylo cílem metodiku prořezávání dřeva pochopit a naučit se s ní pracovat. Proč bylo zvolené zrovna dřevo a ne jiný materiál? Dřevo je obnovitelný materiál, který nezatěžuje přírodu jako jiné stavební materiály a lidé se k němu postupně vrací. Ve stavebnictví je dřevo využíváno již po tisíciletí. Obklopovat se dřevem je tedy pro člověka přirozené. Má pozitivní vliv na to, jak se uvnitř stavby nebo prostoru cítíme. Je prokázáno, že dřevěné stavby snižují stres a zvyšují produktivitu práce. V dnešním světě tráví lidé v interiéru přibližně 80-90% svého času a je důležité alespoň část přírody přenést dovnitř.

Zvolení metody tvarování dřeva prořezáváním je z důvodu, že zatím neexistuje žádný známý ucelený text v českém (ani anglickém) jazyce, který by dával návod, jak s touto metodou pracovat. Několik referenčních projektů již vzniklo a ty jsou zmíněny v kapitole 3.3. Projekty byly podrobně analyzovány a proběhly i zkoušky s parametrizací textur, které ale pro svou složitost nebyly použitelné pro další vývoj. Velikým zájmem bylo zpočátku zjištění způsobu, jak ohýbat dřevo ve dvou protisměrech tak, aby byly všechny čtyři strany v rovině. Možné je zatím ohnout desku, která má v rovině dvě protilehlé strany. Další dvě jsou zkroucené a nemohou být tudíž pevně zafixovány. Výzkum byl velmi náročný a nakonec se u výsledného projektu z minulého semestru pracovalo pouze s jednoduchým linovým jednosměrným vzorem s názvem „simple lattice hinge pattern“. Důležité je také najít nejvhodnějšího materiál a tím se zdálo z počátku dřevovláknité desky, které mají vlákna v různých směrech a lze je ohnout jakýmkoliv směrem. Pro ohýbání v jednom směru jsou vhodné spíše překližky nebo surové dřevo. Překližka má mnohem větší pevnost než dřevovláknité desky, a proto je důležité se již v počátku rozhodnout, jaký výsledek očekáváme. Pokud se snažíme ohnout dřevo proti směru vláken, praská a láme se. Tudíž se musí dávat pozor, v jakém směru jsou vlákna uspořádána předtím, než na desky necháme vyřznout daný vzor.

Metoda ohýbá deskový materiál pomocí laserování nebo frézování předem připraveného vzoru s mezerami, který odebere část materiálu dle aplikovaného vzoru. Stane se díky tomu flexibilnější a je možné ho tvarovat do požadované formy. Tím ale materiál ztrácí svou původní pevnost a je v těchto místech oslaben. Testované trojúhelníkové vzory měly dokonce textilní vlastnosti a byly ohybatelné ve všech směrech, což by mohlo být využito pro esteticky zajímavé zastřešení nějakého objektu. Problémem je omezená velikost deskového materiálu, který je možný laserovat. Je tedy nutné se naučit pracovat s komponenty, které budou vhodně spojovány.

Další testované vzory by měly mít skvělé akustické vlastnosti a jejich využití by mohlo být v interiérech na stěnách, stropěch či podlahách.

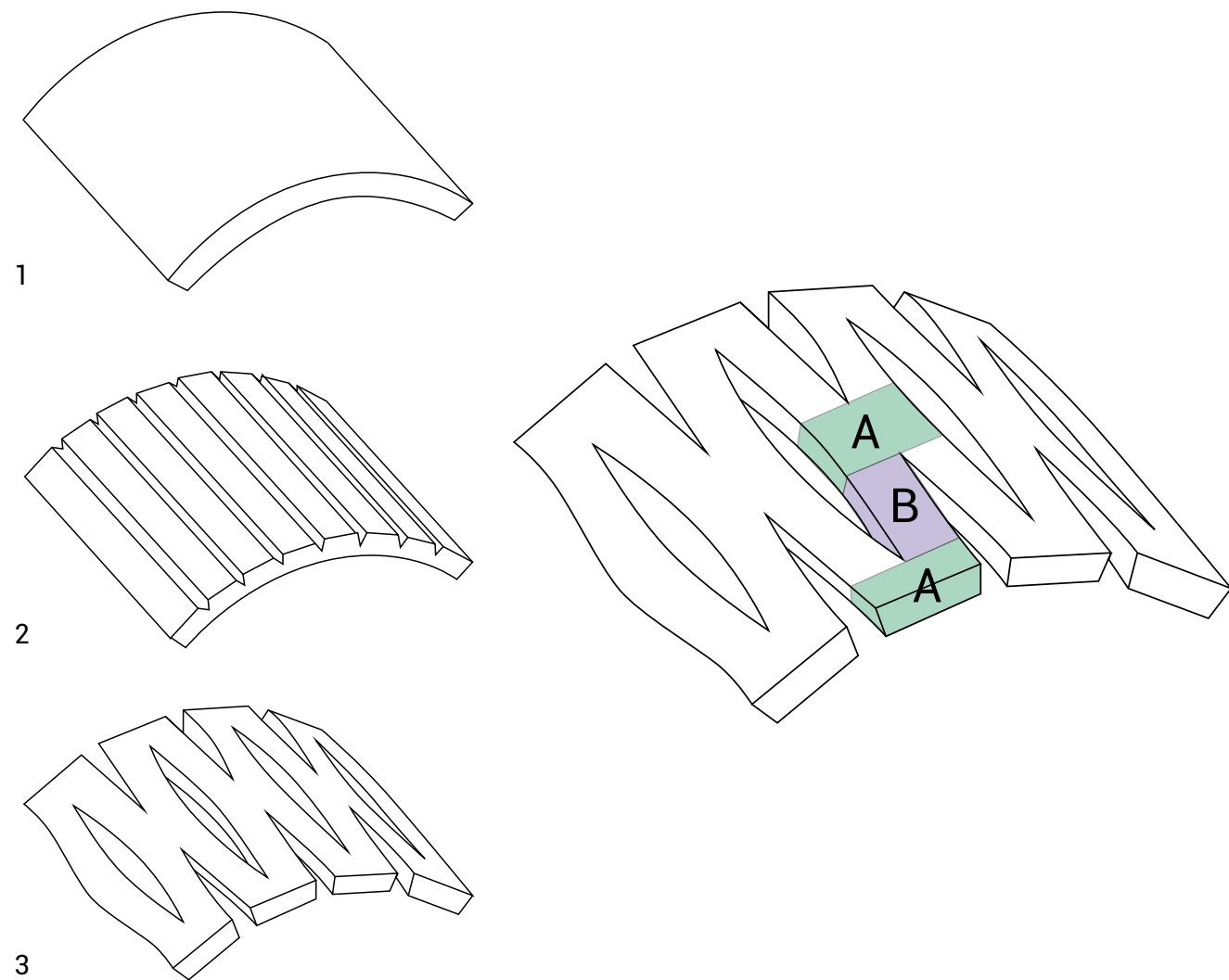
Na začátku práce není možné vytvořit samonosnou konstrukci a tato bakalářská práce si klade za jeden z cílů to prověřit a pokud to bude možné najít vhodný způsob, jak takovou konstrukci vytvořit. Výsledný architektonický objekt musí být modulární, jelikož technologie neumožňuje tvarovat velkoformátové panely, které by dokázaly vytvořit celou konstrukci z jednoho kusu. Provéřit se tedy musí i princip spojování jednotlivých kusů panelů. Výsledkem předchozího semestru byl sloup, který má navrženou příhradovou nosnou konstrukci, na kterou jsou jednotlivé panely upevněny vruty. Za prověření stojí myšlenka udělat panely vícevrstvé a vyzkoušet to ve vhodném měřítku.



Obr. 1-4 Ukázka několika zkoušek provedených v rámci vlastního zkoumání metody prořezávání dřeva. Testy byly prováděny převážně z plně 1-2 mm lepenky. Na horním obrázku je test proveden ze sololitové desky o tl. 3,3 mm.

2 Princip metody a její vývoj

Metoda je založena na tvarování deskového dřevěného materiálu pomocí laserového prořezávání různých geometrických vzorů a jejich kombinací. Tímto se materiál stává flexibilním a je možné ho ohnout dle předchozích požadavků.



Obr. 5 schéma druhů ohybu

1 jednoduchý ohyb materiálu

2 ohyb materiálu naříznutím (perforací) po směru vláken

3 ohyb prořezáním skrz materiál

Obr. 6 schéma principu metody ohybu prořezáním

A můstek (bridge)

B trámek (beam)

2.2 Vliv směru vláken na ohyb materiálu

Uspořádání vláken v materiálu má velký vliv na to, jak budeme materiál prořezávat. V případě tvarování překližky musíme materiál prořezat po směru vláken vnější vrstvy. Pokud bychom to udělali opačně, materiál bude prskat a nebude možné ho tak snadno ohýbat. Pokud zvolíme dřevovláknitý materiál, je jedno kde ho prořezeme, protože vlákna jsou v různých směrech a my ho tedy můžeme tvarovat libovolně. Problém zde nastává pokud odebere příliš hodně materiálu a snažíme se ho natáhnout. Poté se začne lámat a zničí se.

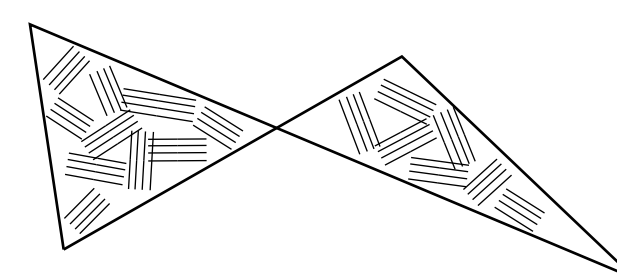
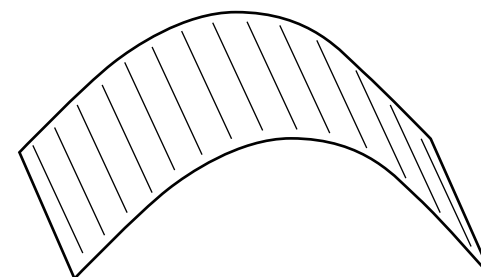
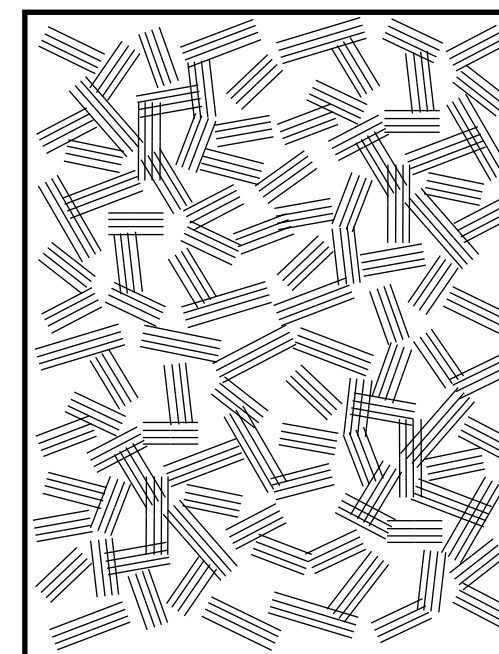
Vliv směru vláken v materiálu

Materiály s vlákny v jednom směru:

překližky, surové dřevo, ..

Dřevovláknitý materiál:

sololity, MDF, OSB, ..



Obr. 7 schéma dvou typů dřevěných deskových materiálů

2.3 Příklady z prvotního využití metody

Způsob tvarování dřeva nařezáváním byl a je dodnes využíván pro tvorbu některých hudebních nástrojů a nábytku. Materiál lze snadno ohnout a díky tomu, že je pouze naříznutý například do 4/5 tloušťky materiálu, vidíme z vnější strany hladký ne-naříznutý materiál. Je to další možnost, jak lze s metodou pracovat a na co ji využít. V této práci je ale kladen důraz na to, aby se pracovalo zejména digitálně a tak jsou tyto příklady uvedeny pouze jako ukázka, co dalšího se díky ní dá vytvořit bez znalostí nových digitálních technologií. Tvarovat lze takto překližku, která se skládá z více vrstev. Je nutné ohyb zafixovat lepidlem a nechat zaschnout, jinak se vrací zpět do roviny a nedrží požadovaný tvar.



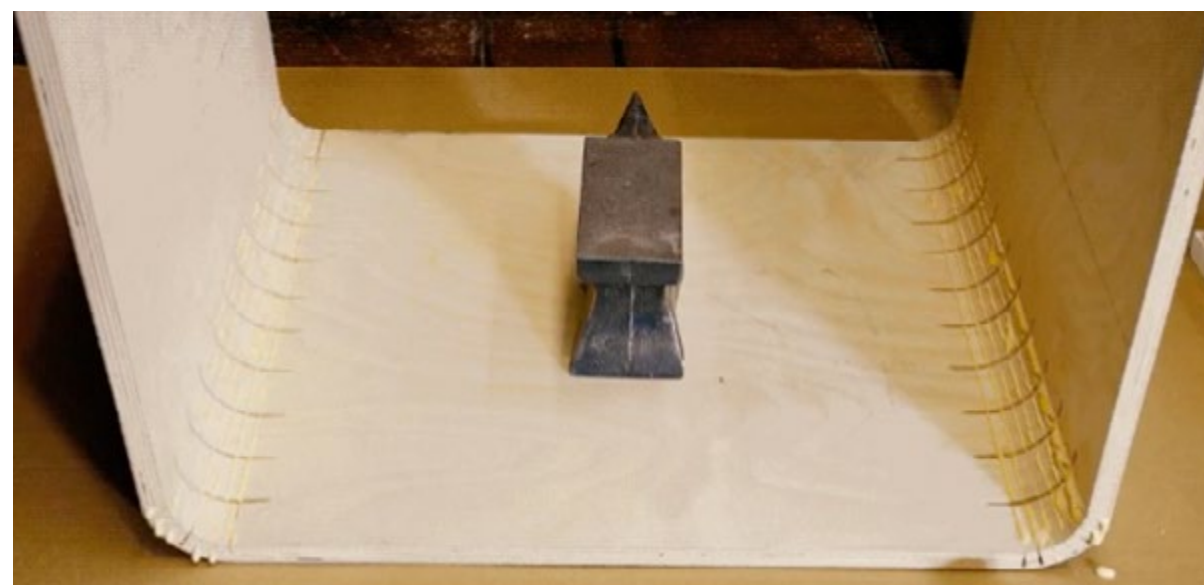
Obr. 8 výroba klavíru



Obr. 9 proces z výroby kytary



Obr. 10-12 proces z výroby kytary



Obr. 13-15 proces výroby stoličky

Elegantní stolička TRYST od melbournského designéra Tata Ansona vyhrála několik designových ocenění a byla dokonce vystavena na Milánském Salonu a Londýnském designovém festivalu. Ukazuje příklad, jak z rovného deskového materiálu můžeme metodou prořezání plynuje přejít do zaoblených tvarů. Jelikož jsou mezery celkem velké, autor zajistil každý řez zaoblením na konci, aby materiál nepraskl.



Obr. 16-17 stolička TRYST

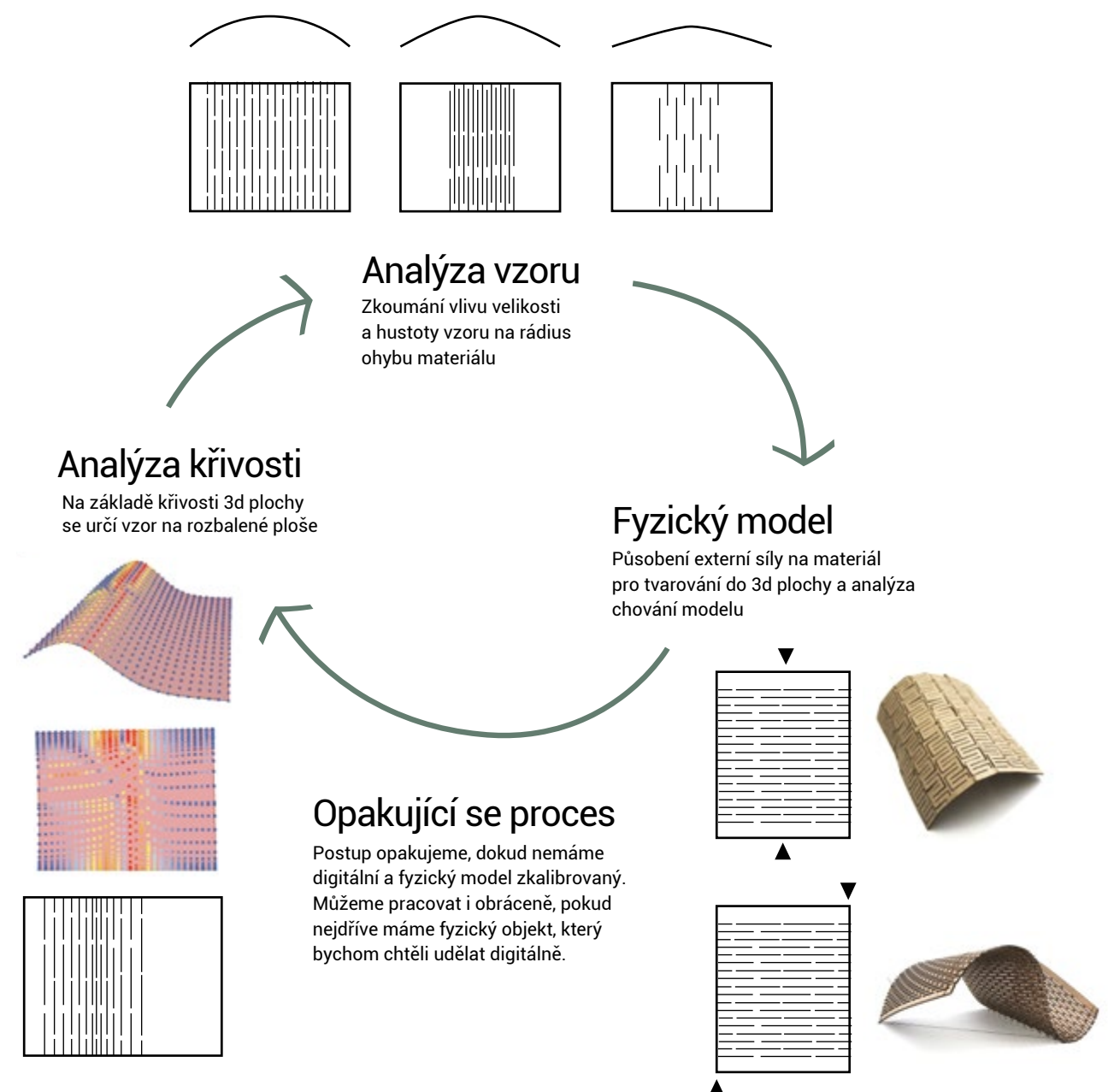
Pro ukázkou je zde jeden příklad tvarovaného setu k sezení i z jiného než dřevěného materiálu a to z kovu, do kterého byly prořezy vylaserovány a poté složeny jednotlivé kusy k sobě a posvařovány. Produkty jsou v nabídce od francouzské firmy HandBend Furniture.



Obr. 18 kovový prořezávaný set sezení

2.4 Kalibrace digitálních a fyzických prototypů

V dnešní době nám pomáhají nové digitální technologie a pro dosažení výsledku nám mohou ušetřit spoustu času a práce při navrhování. Postupujeme buď tak, že máme vytvořenou digitální 3d plochu, které chceme nalézt vhodný vzor pro její ohyb. Plochu musíme nejdříve rozbalit a podívat se na její složitost. Započítat, jak se vzor po ohybu promění a jestli chceme pracovat s jeho natahováním a navrhne vhodný vzor. Otestujeme na fyzickém prototypu a většinou musíme vytvořit další verze, aby výsledek byl co nejvíce přesvědčivý. Postup může být i opačný, kdy máme určitou fyzickou strukturu, kterou potřebujeme dostat do digitálu a analyzovat ji. Takže ji musíme rekonstruovat a vytvořit v digitálním prostředí, analyzujeme ji a poté se snažíme pochopit, jak funguje.



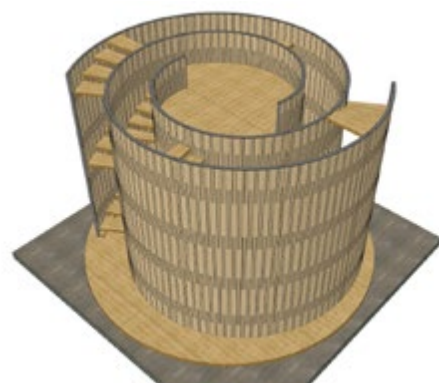
Obr. 19 schéma principu synchronizace fyzických a digitálních modelů

3 Současné referenční projekty

Nalezeno bylo několik zahraničních referenčních projektů, které zde budou představeny a popsány. Vznikla jich už celá řada, ale většinou pouze ve formě různých studií. Zrealizovaných architektonických projektů vzniklo zatím pouze pár, vybrané jsou zmíněny níže.

3.1 Pavilon Nautille Sylvestre v Belgii

Pavilon byl vytvořen v rámci veletru Libramont 2019. Příprava projektu trvala 6 týdnů a následná realizace 4 dny. Stojí za ním studio Art & Build – Saise Design. Panely jsou ohnuty díky metodě prořezávání s jednoduchým linovým vzorem "lattice hinge". Rozměr zářezu je nastaven podle potřebného poloměru zakřivení. Směrem ke středu se poloměr zvětšuje. Obecná stabilita je zajištěna interakcí mezi zakřivenými stěnami, které fungují jako skořepina a schody uvnitř, které zajišťují horizontální přenos napětí mezi stěnami.



Obr. 20 3d model pavilonu

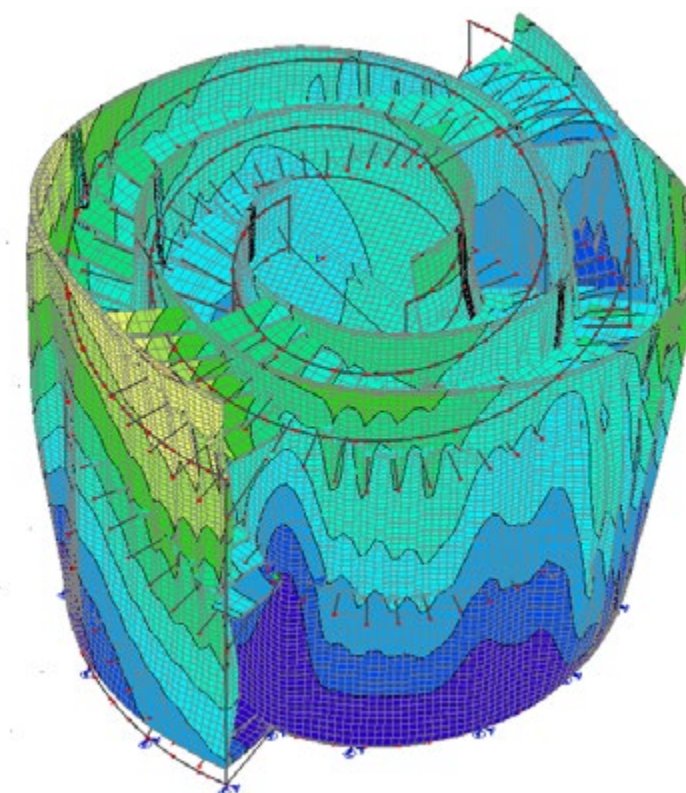
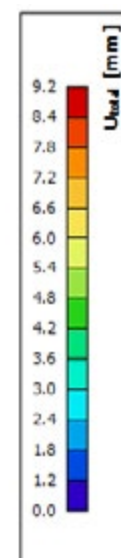


Obr. 21 3d model pavilonu



Obr. 22-25 proces výstavby pavilonu

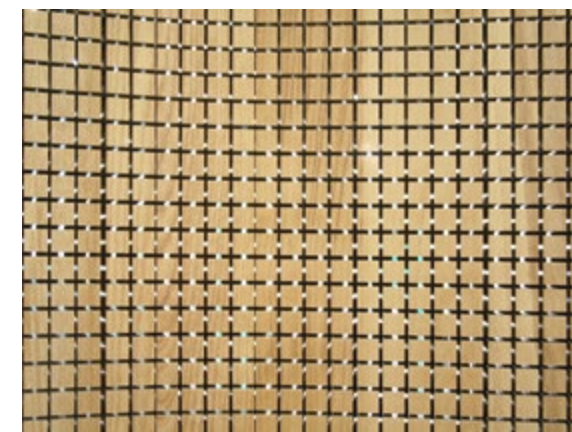
3D displacement
Values: U_{total}
Nonlinear calculation
NonLinear Combi: NC10 - ELS Wx
Selection: All
Location: In nodes avg. on macro.
System: LCS mesh element



Obr. 26 Analýza ukazuje posuny celé konstrukce (eng. 3D displacement). Můžeme vidět, jak je díky horizontálním zpevňujícím schodům uvnitř pavilonu celá zpevněná a posuny jsou zde minimální pouze v horní části.

3.2 Dukta flexible wood

Švýcarská firma Dukta je pravděpodobně jediná na světě, která pracuje komerčně s tímto principem ohýbání dřeva, ale používají ho pouze pro akustické a estetické účely. Mají velmi podrobně zpracované veškeré informace na svém webu. Nabízí mnoho druhů od akustických panelů po nábytek a osvětlení. Akustické prvky jsou vhodné pro místnosti, jako jsou nahrávací studia, kina, koncertní sály, restaurace, foyery, učebny atd. Měření provedená společností EMPA Schweiz (švýcarské federální laboratoře pro vědu a technologii materiálů) potvrdily vysoké absorpční vlastnosti. Pohltivost a difúze zvuku může být řízena tvarem vlny. Vynikající akustické vlastnosti a nový neobvyklý vzhled stěn umožňuje vytvářet zajímavé prostorové zážitky.



Obr. 27 dukta panel



Obr. 28 prořezaný ohebný pruh



Obr. 29-32 ukázky použití dukta panelů v interiéru

3.2.1 Koncertní hala Toni Areal ve Švýcarsku

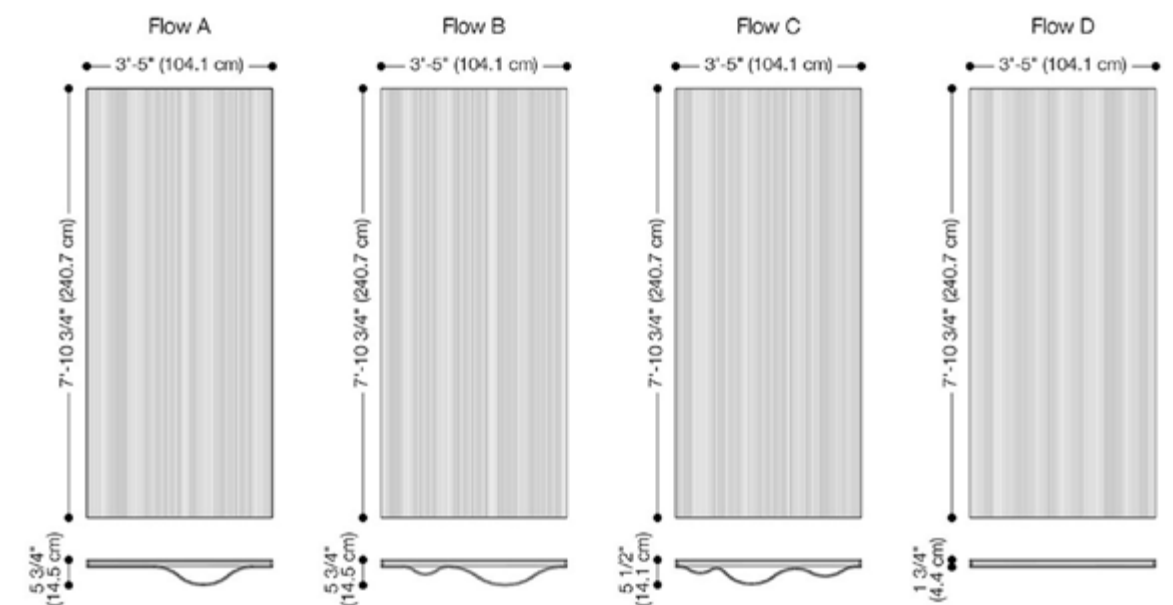
Vlnovitá geometrie panelů směřuje zvukové vlny přicházející ze všech směrů do otvorů a absorbují je. Různé vzdálenosti od zadní stěny vytvořené vlnami umožňují panelům zachytit vlny s vysokou a nízkou frekvencí.



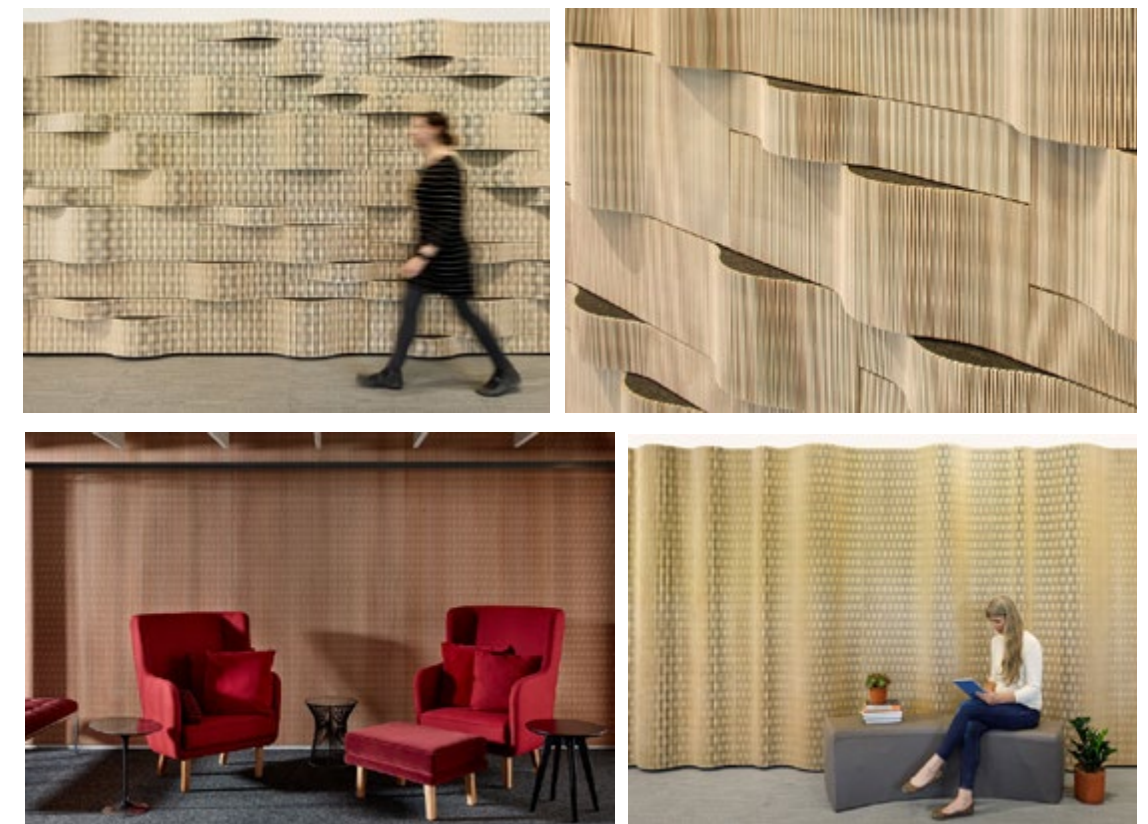
Obr. 33 sál koncertní haly Toni Areal

3.2.2 Spinneyback studio

Firma zabývající se velkou škálou odvětví související s interiérovým designem. Mimo jiné se rozhodli spolupracovat s firmou Dukta a zařadit do svého sortimentu jejich akustické a designové panely. Mají je v mnoha odstínech a druhů dřeva. Spolupracují s designérem Berndem Benninghoffem. Pracují s tloušťkou materiálu od 1,9 do 10 cm.



Obr. 34 rozměry prořezaných panelů a druhy zvlnění



Obr. 35-38 ukázka použití dukta panelů v interiéru

3.3 Akademické projekty

Nalezeno bylo několik zahraničních akademických referenčních projektů, které budou v následující kapitole podrobněji představeny.

3.3.1 Geodetická kupole / **Geodesic dome**

Část kupole sestavená z hexagonů a pentagonů byla navrhnutá a zrealizována týmem osmi studentů. Jednotlivé kusy jsou velmi jednoduché s nízkou spotřebou materiálu a jsou snadné na montáž. Díky tvarování prořezáváním byli studenti schopni vytvořit vzor umožňující dokonalý ohyb ve 3/4 jednotlivých panelů překližky.



Obr. 39-40 výroba geodetické kupole

3.3.2 Parametrický živoucí vzor / **Parametric living hinge**

Autorem projektu je Vaibhav Saxena, který pochází z Indie, kde studoval architekturu na univerzitě Birla Institute of Technology a v současnosti pracuje pro Fab Academy. K dispozici dal exportované křivky, aby si kdokoli mohl vyzkoušet tento příklad. Vzor byl předtím kompletně vytvořený pomocí Grasshopperu. Vytvořit takovýhle parametrický vzor se dá celkem snadno, ale komplikace přichází při rozdělování křivek, aby mezi nimi bylo přerušení a vzor se dal aplikovat na fyzickém testu. Tento projekt ukazuje další možnosti, jaké má metoda kerf bendingu. Důležité je, aby linie byly plunulé a přechody mezi nimi také. Nemí být na sebe kolmé, jinak materiál nelze ohnout.



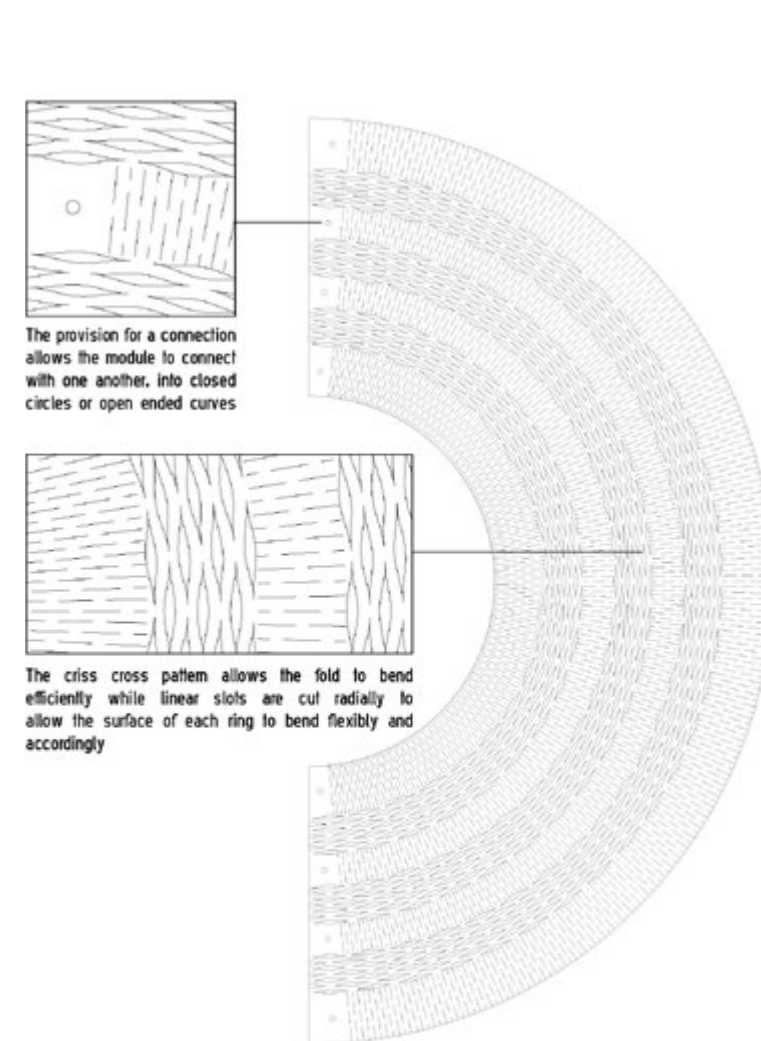
Obr. 41 tvarování živoucího vzoru

3.3.3 Zakřivené skládání / **Curved Crease Folding**

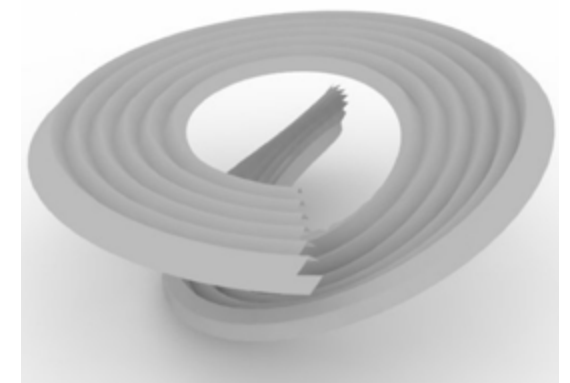
Projekt, který pracuje s kombinací dvou různých vzorů. Na spodním obrázku lze vidět, jak materiál praská při větším ohybu. Pokud by ale byl zvolen silnější materiál nebo trochu upraven vzor, trhání materiálu bychom tím mohli zabránit.



Obr. 42 ukázka, jak je možné fyzický test tvarovat



Obr. 44 připravená polovina vzoru



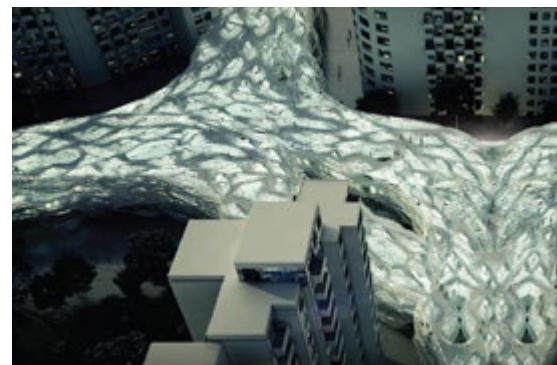
Obr. 43 výchozí digitální 3d model

3.3.4 Výplně na míru / Tailored Infill

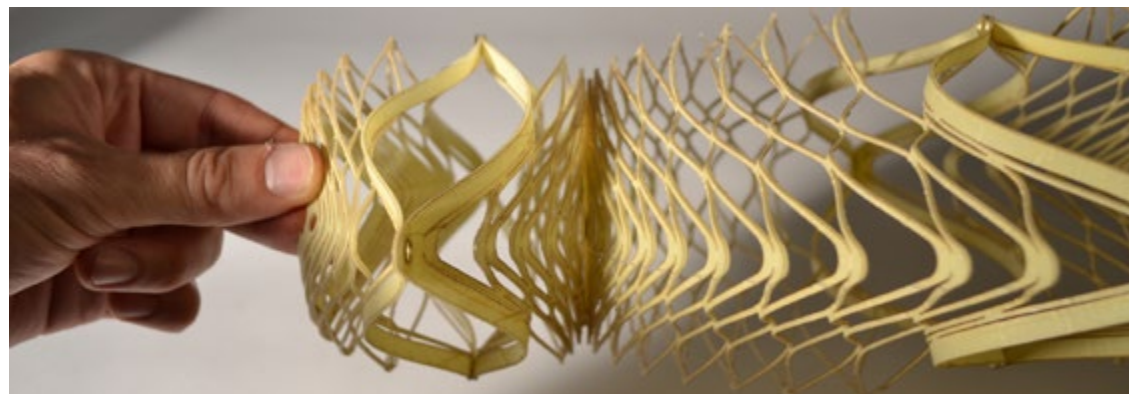
Návrh čtyř studentů z Velké Británie, kteří se zabývali městskou strukturou a růstem populace. Kladli si za jeden z cílů vytvořit novou síť ulic a cest pro chodce ve veřejném prostoru. Projekt je velmi esteticky zajímavý a ukazuje, až na jakou mez by se s metodou prořezání mohlo být možné jednou dostat při nalezení vhodného materiálu pro výrobu.



Obr. 45 digitální model struktury



Obr. 46 struktura umístěná v městském prostředí



Obr. 47 roztažený fyzický model

3.3.5 Anatomie ruky / Hand Anatomy

Autorem projektu je Renée Verhoeven. Původně se zdálo, že projekt je vytvořen pomocí tenkého dřevěného materiálu, ale po bližším zkoumání, bylo zjištěno, že autor pracoval s kůží. Přesto je projekt velmi zajímavý z hlediska kombinace vzorů a pochopení, jak plochý vzor pracuje v prostoru. V rámci experimentu byl vzor překreslen a vylaserován do 1mm kartonu. Více o provedeném testu v kapitole 4.3.1.



Obr. 48-49 experiment s vytvarováním vzoru podle ruky

3.3.6 Prořezávané pavilony / Kerf Pavilions

První projekt vznikl pod názvem Kerf Pavilion a vytvořili ho studenti z MIT Department of Architecture a za druhým stojí studenti z Chalmers University of Technology a vznikl v rámci projektu „Digital Wood Design & Fabrication of a full-scale exhibition structure in plywood“. Každý prvek je v místě ohybu perforován a potom jsou spojeny jednotlivé kusy k sobě. Oba projekty spojuje jednoduchost a možnost jednotlivé trojúhelníkové komponenty násobit a vytvářet velmi zajímavé struktury.



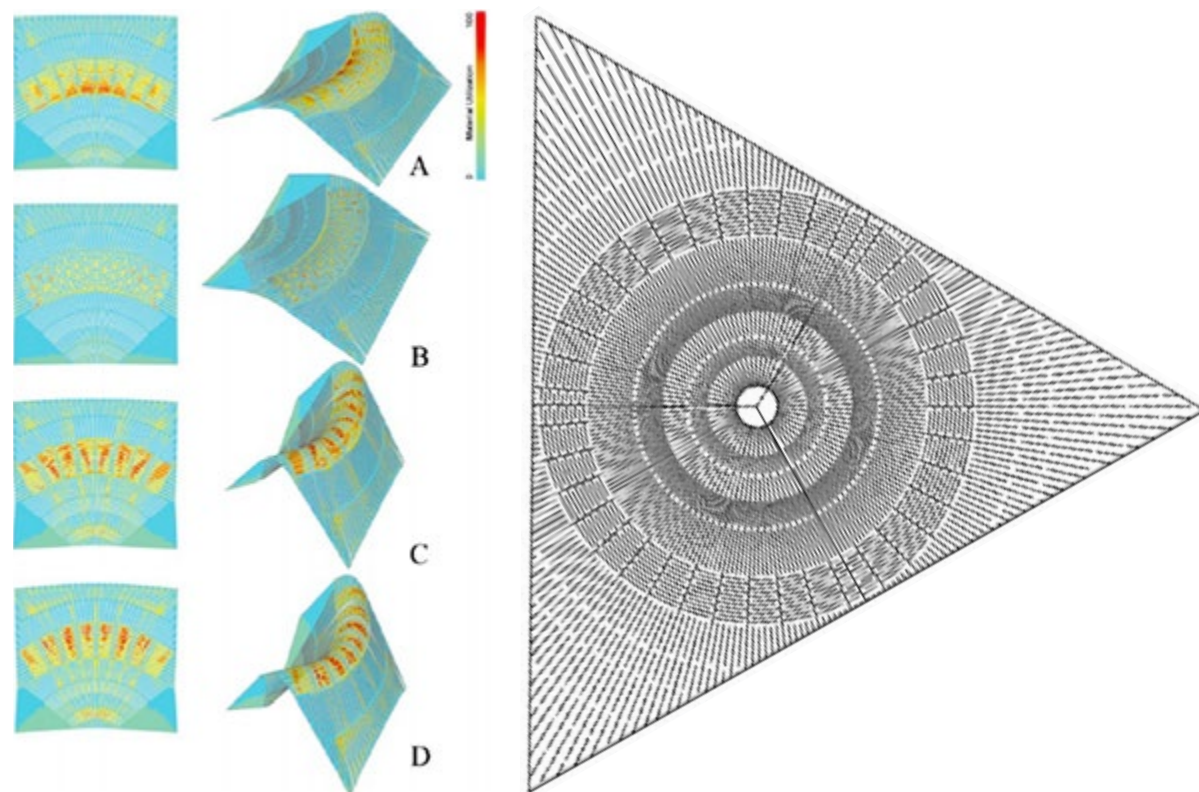
Obr. 50 pavilon studentů z Massachusettského technologického institutu



Obr. 51-53 pavilon studentů z Technologické univerzity Chalmers ve Švédsku a jeho detaily

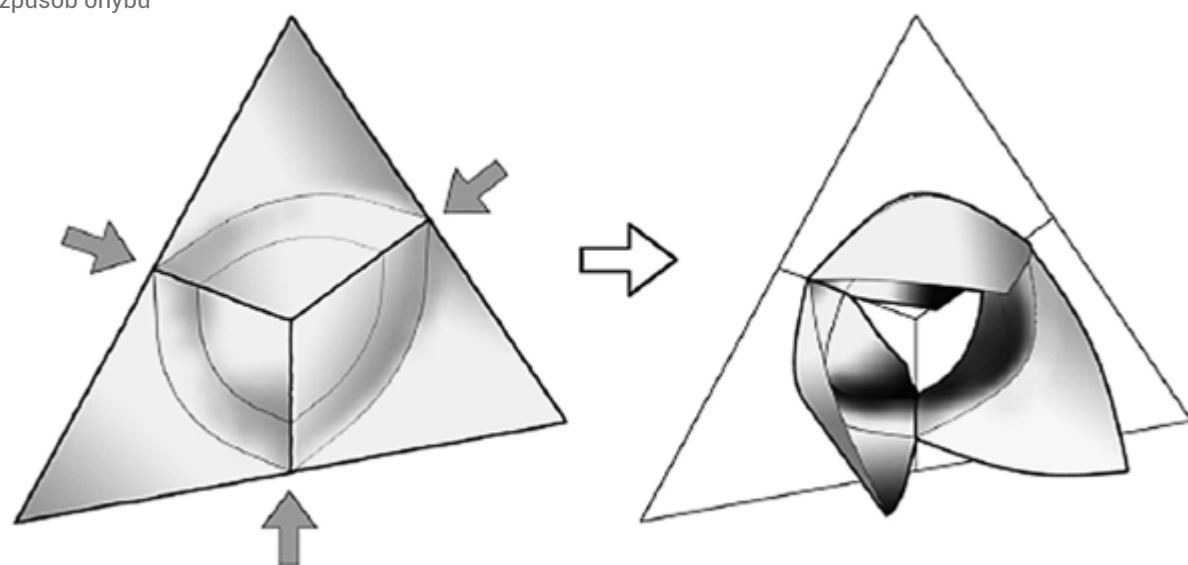
3.3.7 Zakřivené ohýbání / Curved-line Bending

Koncept od autorů Ramtina Haghnazara a Mohammada Reza Matiniho vyšel v článku International Journal of Space Structures. Řeší, jestli by bylo možné principem nařezávání vytvořit strukturu, která by byla možná aktivně pracovat a ohýbat se podle potřeby. Inspiraci hledali v kožních vráskách. Výzkum začal analýzou metody a poté hledáním vhodného vzoru. Provedli několik analýz ohýbání s různými druhy vzorů v nejvíce namáhaném kloubu ohybu. Po jeho nalezení byl představen koncept, jak by model mohl pracovat. Vzor byl digitálně překreslen pro lepší pochopení fungování tohoto principu.



Obr. 54 schéma čtyř druhů vzorů a jejich způsob ohybu

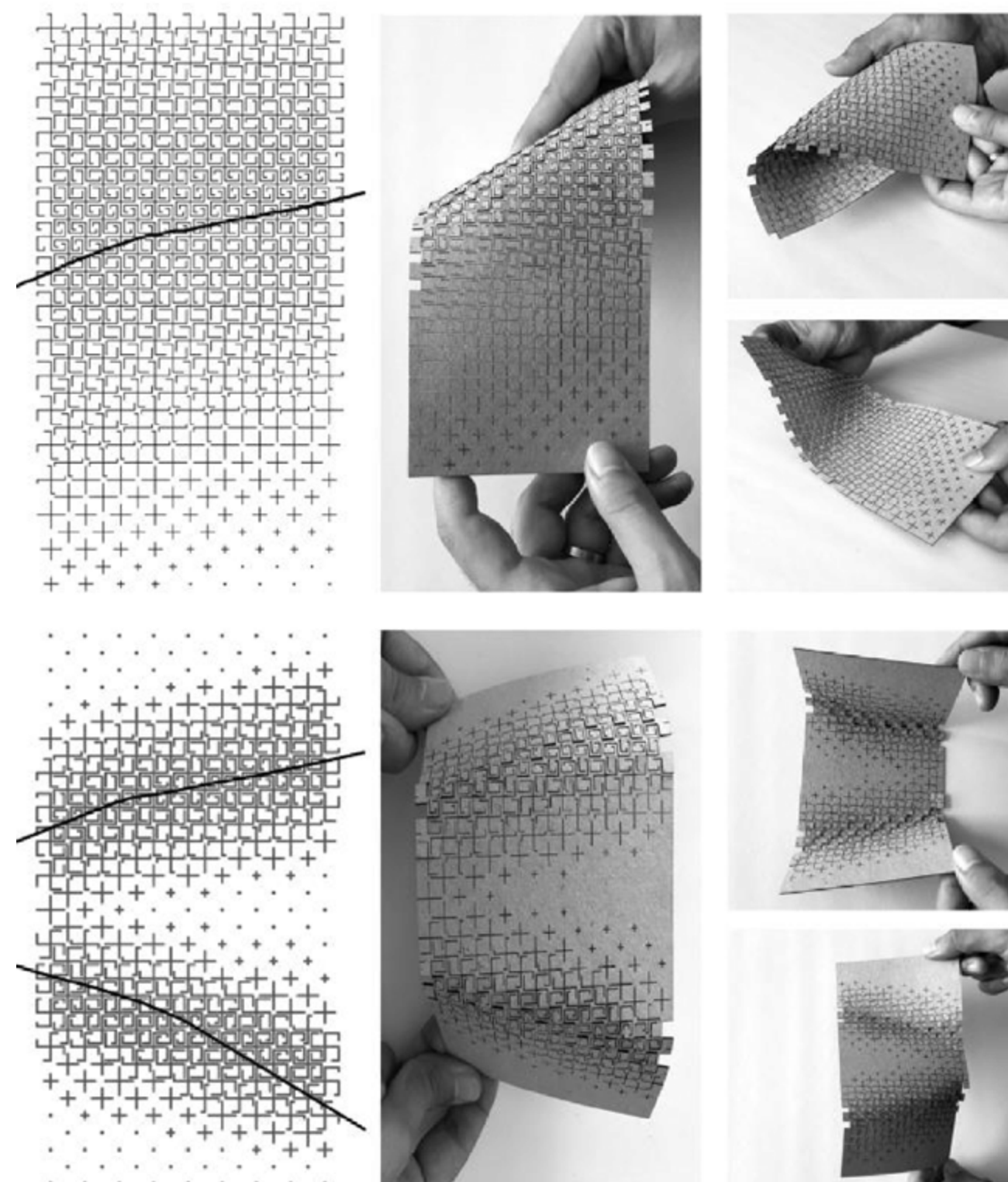
Obr. 55 překreslený výsledný úspěšný vzor výzkumu



Obr. 56 znázornění způsobu ohybu jednoho komponentu

3.3.8 Flexibilita plošných materiálů / Flexibility of Planar Materials

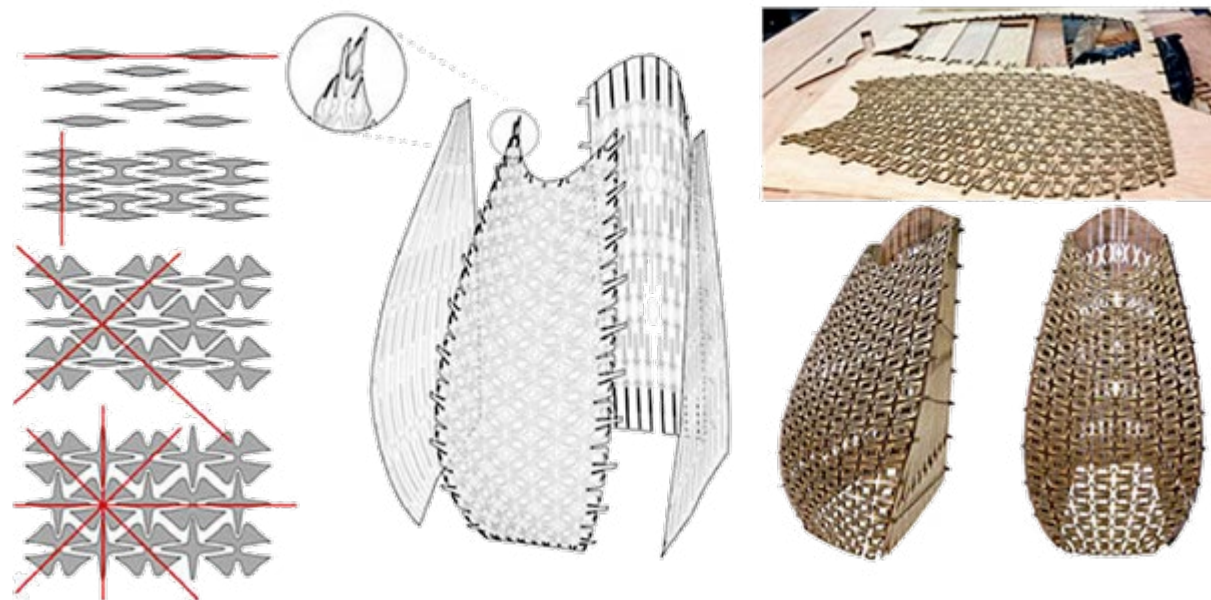
Autory tohoto projektu jsou studenti z Istanbulské technické univerzity. Projekt se zaměřil na zvýšení flexibility 2d plošných materiálů za použití technologie tvarování prořezáváním. Ukazuje proměnlivou parametrickou strukturu vzorů podle určené křivky. Vychází z jednoduchých liniových dvousměrných vzorů křížů. V místech s největší hustotou je ohyb testovaného materiálu snadný. Tento referenční projekt je velmi poučný pro možný vývoj vzorů.



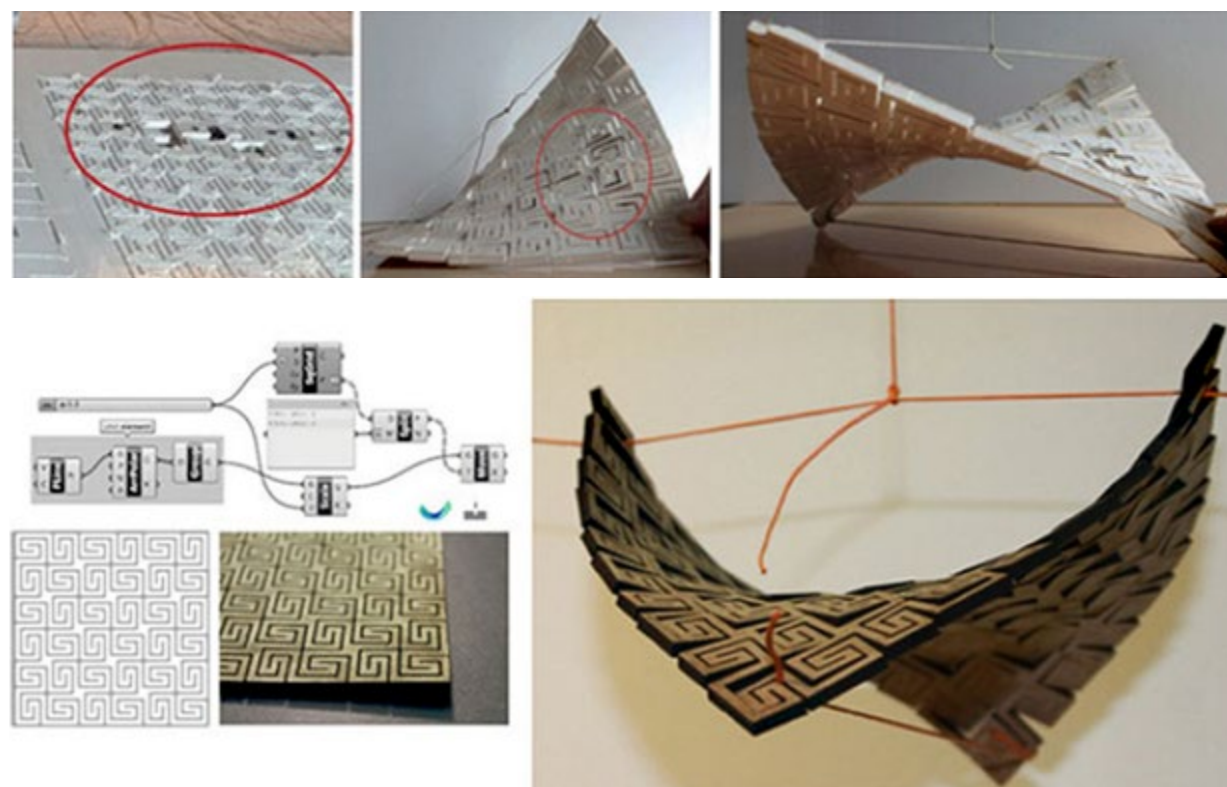
Obr. 57 ukázka vzoru a jeho aplikace na fyzickém modelu

3.3.9 Flexibilita plošných materiálů / Flexibility of Planar Materials

Na Neapolské univerzitě v Itálii se snažili přijít na způsob prořezání deskových materiálů tak, aby jej bylo možné ohnout do zaoblených tvarů. Přišli s hvězdicovým vzorem, který funguje poměrně dobře, ale nelze z něj vytvarovat například kouli. Hvězdicový vzor byl také otestován a je uveden v katalogu digitálních a fyzických testů. Dále provedli výzkum vzoru bludiště, díky kterému byli schopni vytvarovat parabolický hyperboloid.



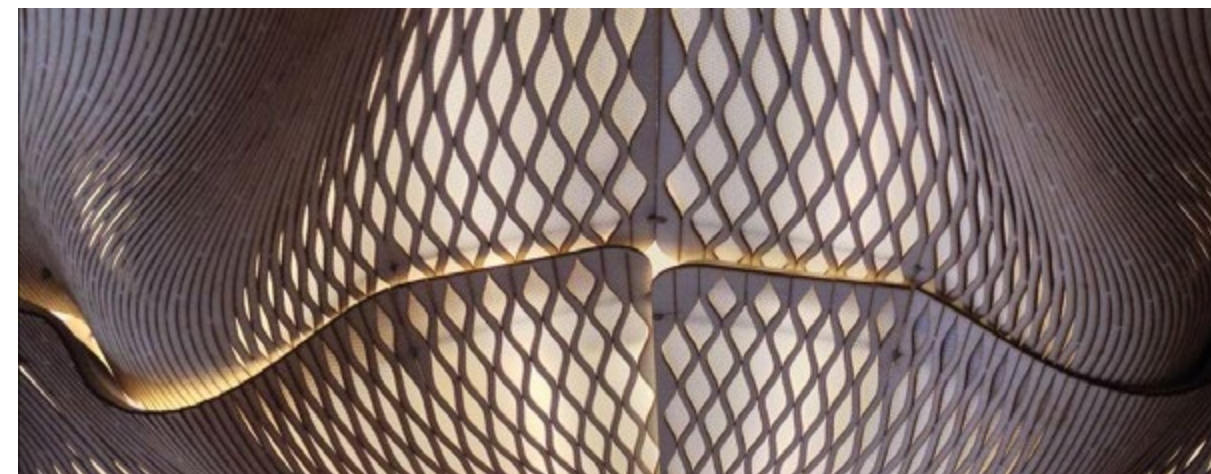
Obr. 58 experiment s tvarováním kokonu



Obr. 59 experiment s tvarováním parabolického hyperboloidu

3.3.10 Akustický dřevěný vlnitý podhled / Wooden Waves Acoustic Ceiling

Projekt akustického podhledu v Londýně z roku 2016 od autorů Mamou Mani a Buro Happold vychází z testování přes sto možných prototypů než přišli s konečnou formou. Stabilitu jednotlivých panelů z překližky zajišťují protikusy, díky kterým jsou zároveň jednotlivé panely spojeny. Přestože je projekt vizuální a nemá žádnou statickou funkci, je velmi poučný, co se týká spojování panelů, vzorování a tvorby fixačních protikusů.



Obr. 60-62 panely akustického podhledu

4 Katalog fyzických a digitálních prototypů

Bylo provedeno velké množství testů s různými geometrickými vzory, ale zdaleka ještě nebyly zkoumány všechny možné kombinace, kterých je nekonečné množství. Mnoho vzorů se dá nalézt online, ale je důležité testy provést a poučit se z nich. Pochopit, jak s metodou pracovat, jaký je rozdíl mezi velikostí a vzdáleností jednotlivých prořezů a otvorů. Nejvíce byly zkoumány jednoduché otevřené liniové vzory. Dá se s nimi poměrně jednoduše pracovat a jsou velmi variabilní.

Také bylo vyzkoušeno několik vzorů, které můžeme pojmenovat jako liniové uzavřené vzory. Zkoušené testy s trojúhelníky získaly po prořezání textilní vlastnosti látky. Ty, které měli pouze malé otvory nebo jen prořezané linie se daly pouze lehce ohnout a poté se vrátily zpět do roviny, další se daly různě kroutit a některé téměř vůbec nefungovaly a byly pouze pro efekt. Výzkum byl samozřejmě doprovázen velkou řadou neúspěchů. Důraz byl od začátku kladen na zjištění způsobu, jak ohnout materiál ve dvou protilehlých směrech a zároveň ho upevnit na všech čtyřech stranách. Otestováno bylo několik kombinací vzorů, ale zatím z časových důvodů nebyl nalezen ten nejvhodnější. Možné je i to, že to vůbec nepůjde. Myslíme si, že by to ale mělo být možné. Je nutné provést další testy s kombinací dvou nebo třech různých vzorů. Výzkum probíhal po dobu jednoho semestru, na jehož konci byl vytvořen první prototyp sloupu.

Pro ohyb ve dvou na sebe kolmých směrech jsou vhodným materiálem dřevovláknité desky a sololity, které mají vlákna v různých směrech. Překličky a surové dřevo jsou vhodné pro ohyb v jednom směru, ale naopak jsou velmi pevné. Dřevovláknitý materiál se hodně láme a trhá, pokud uděláme pouze malé mezery mezi prořezáním a použijeme dlouhé linie. Musíme tedy již od začátku počítat s tím, jaký očekáváme výsledek a tomu přizpůsobit i výběr vhodného materiálu.

4.1 Liniové otevřené vzory

4.1.1 Jednoduchý čárový vzor / Simple lattice hinge

Výhody

- velká flexibilita
- možnost ohnutí, kroucení, rozšíření a komprese
- jednoduchost vzoru a rychlost výroby
- variabilita
- možnost použití mnoho druhů dřeva (překličky, MDF, sololity,..)

Nevýhody

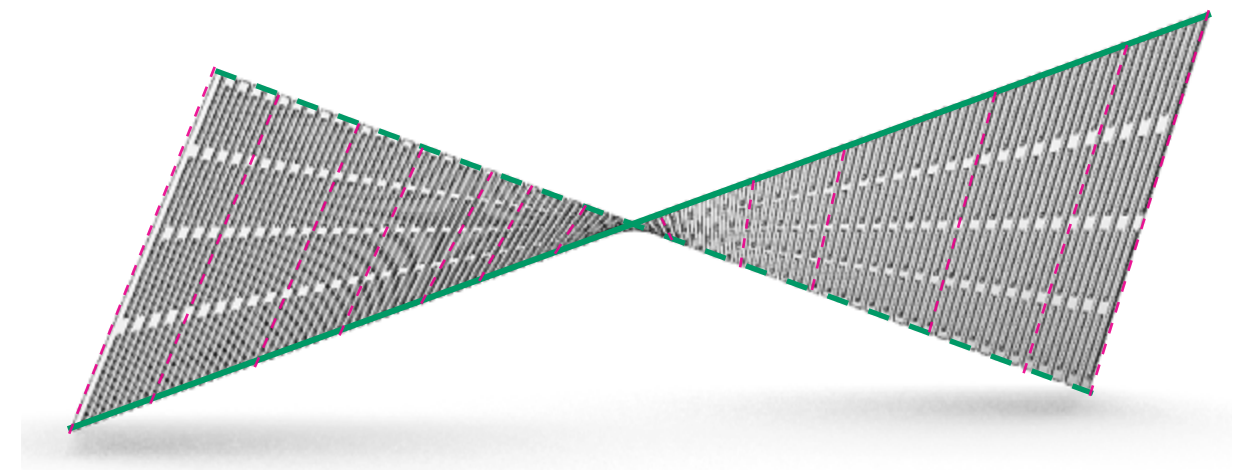
- nelze pevně upevnit na všech stranách

Testovaný materiál - 3,3 mm sololitová deska

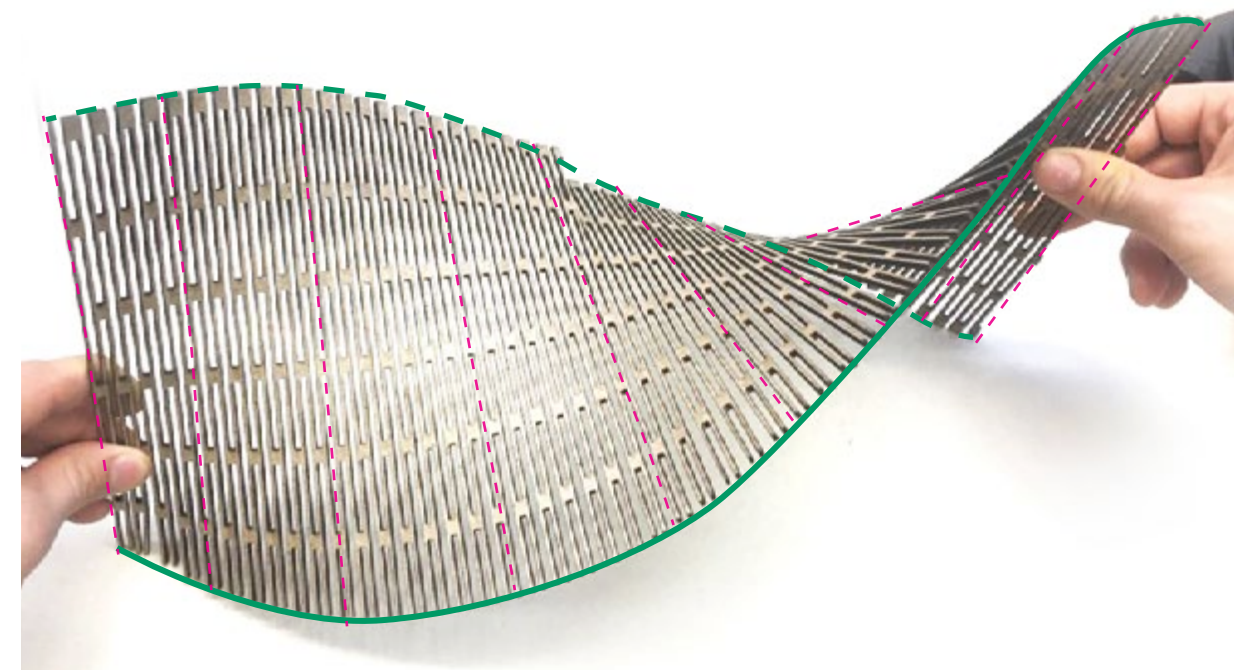
Rozměry fyzického modelu - 500x200 mm

Větší ohyb umožňoval vzor s delšími prořezy, ale pevnější byl s těmi kratšími, je tedy nutné si stanovit, jak očekáváme, že se panel bude chovat. Pokud nepotřebujeme velký ohyb, je lepší udělat prořezy kratší a pevnější. V souladu s výzkumy tento vzor funguje v tlaku a tahu a lze jej snadno ohýbat a kroutit. Důležité zjištění je také to, že pokud máme pouze liniové prořezávání, materiál můžeme natáhnout. Pokud máme prořízlé obdélníky a odebere příliš hodně materiálu, lze ho ohnout, ale už ne natáhnout a testovaný dřevovláknitý materiál se trhá.

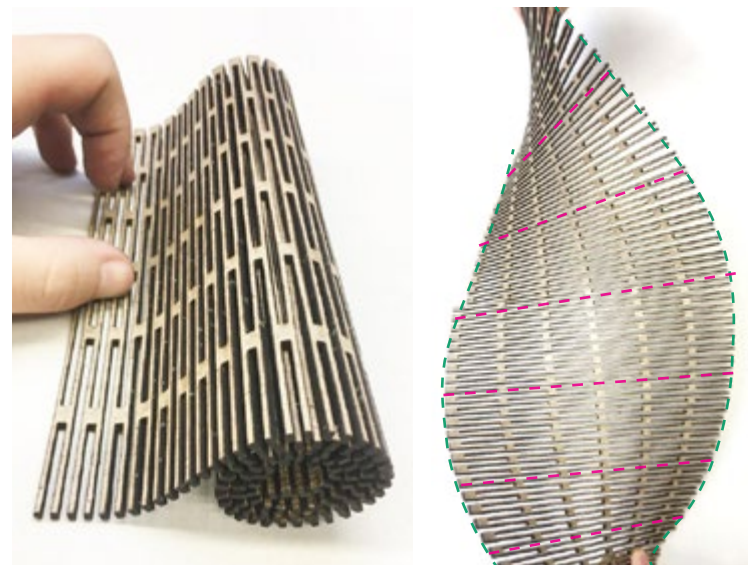
Při fyzickém experimentování níže bylo zjištěno, že může fungovat jako zeď, ale nebude schopna přenášet velké zatížení kvůli malému rozestupu mezi zářezy. Můžeme odvodit, že počet prořezů a rozestup mezi nimi ovlivňuje tuhost. Bylo by určitě možné najít rovnováhu mezi tloušťkou materiálu a hustotou prořezávání, abychom mohli vytvořit staticky samonosné konstrukce.



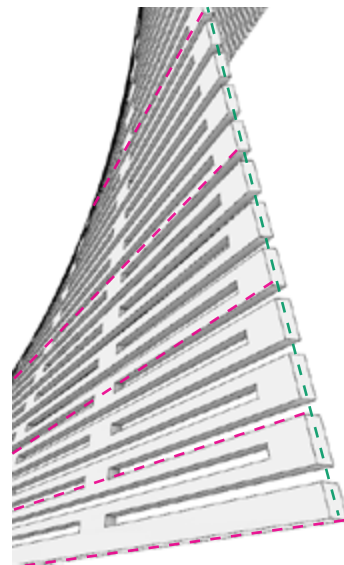
Obr. 63 digitální model očekávaného žádoucího chování testu - všech čtyři strany v rovině



Obr. 64 reálné chování sololitového testu - kroucení materiálu

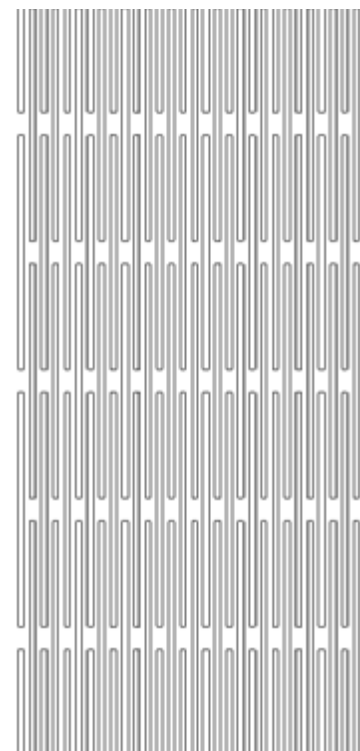


Obr. 65-66 ukázka tvarovatelnosti prořezaného sololitu

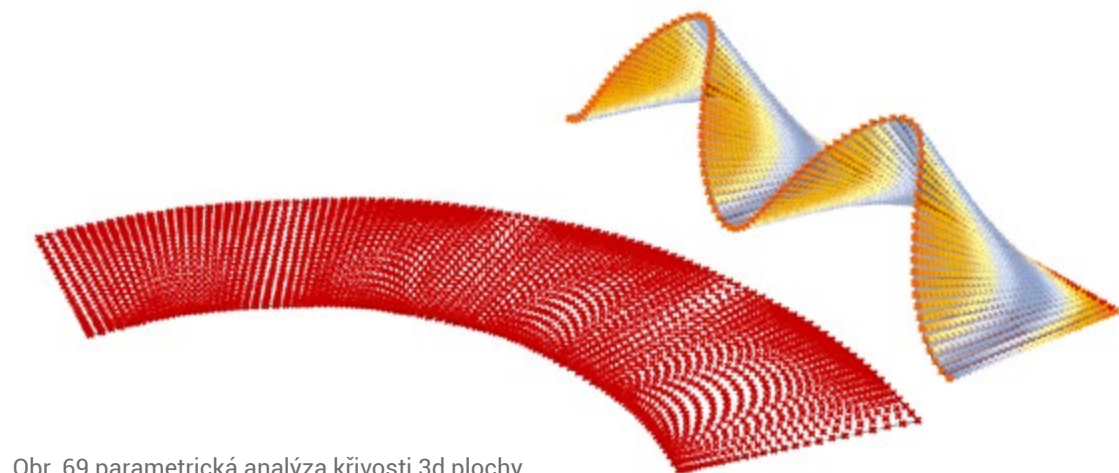


Obr. 67 digitální model

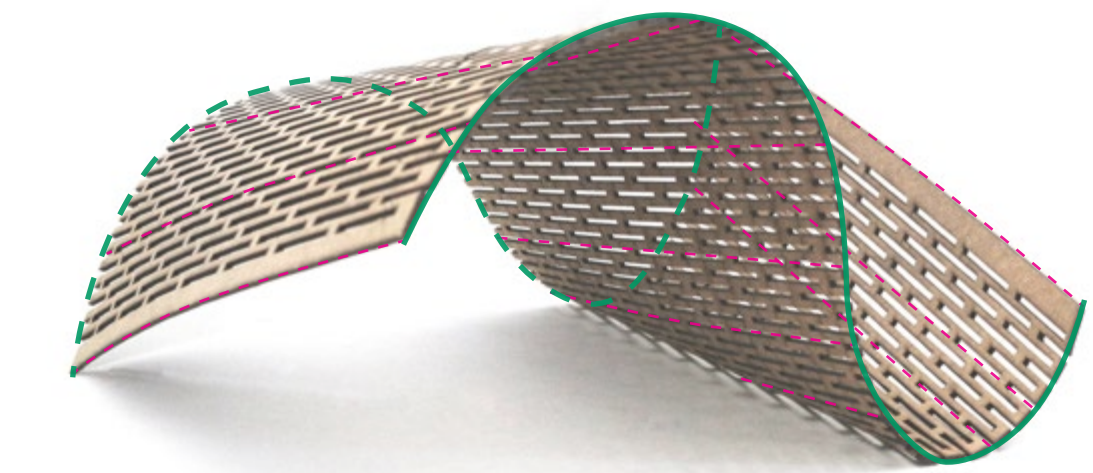
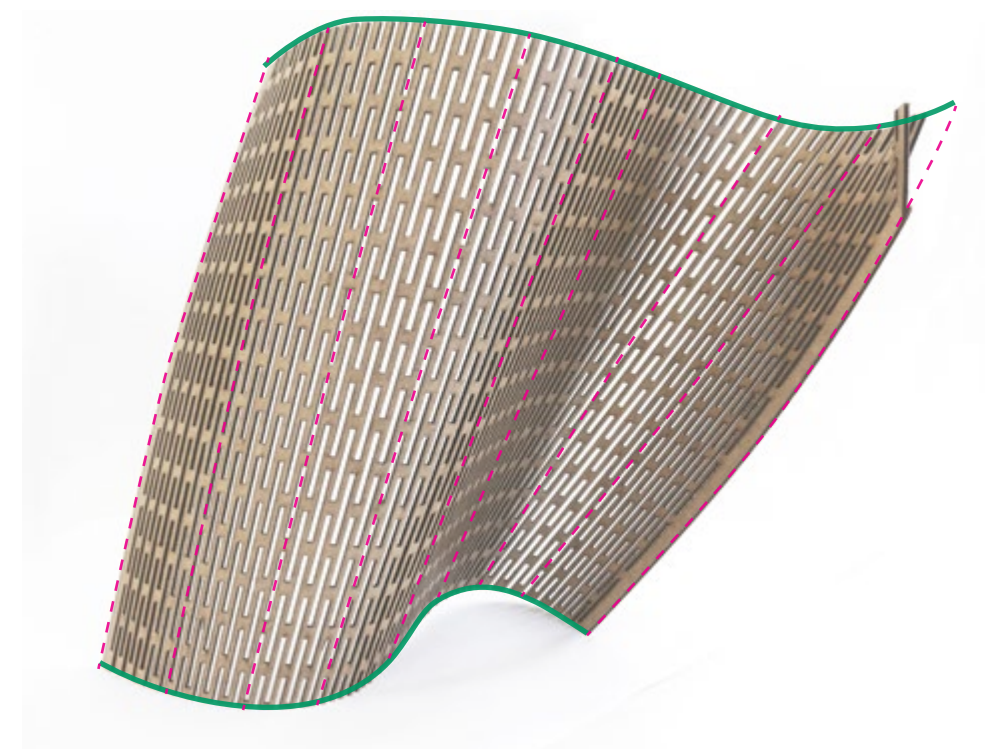
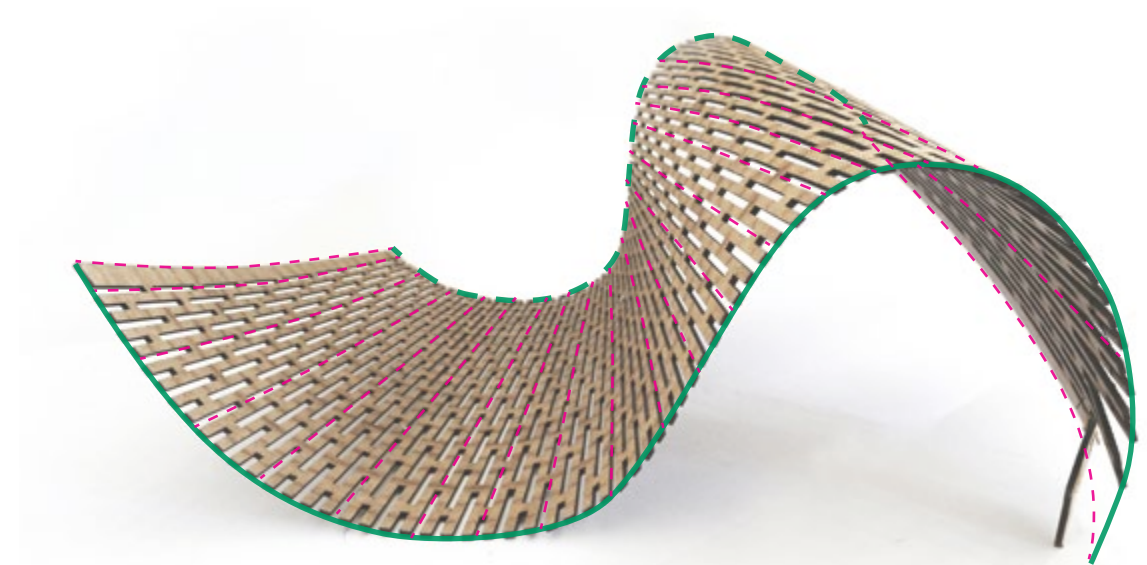
Není snadné docílit kontrolovaného ohybu bez další podpůrné konstrukce, která by model zafixovala a nebo je nutné vymyslet způsob napojování. Na fyzické modely byla použita opět sololitová deska o tloušťce 3,3 mm. U modelů na protější straně je tvarová stabilita dosažena díky zaxifování reznou nití na požadovaných místech. V tento okamžik nastává otázka, jestli se nevydat cestou kompozitního materiálu a tvar zafixovat například pomocí pryskyřice nebo betonu. Mohlo by se tímto docílit tenké skořepinové konstrukce s malou spotřebou materiálu. Podobný tvar byl nejdříve digitálně analyzován a poté fyzicky vytvořen. Další otázkou plynoucí z pozorování je vymyslet vzor, který bude reagovat na křivost plochy. Nejdříve ho vytvořit digitálně a poté nechat otestovat, jestli se opravdu chová podle našeho očekávání.



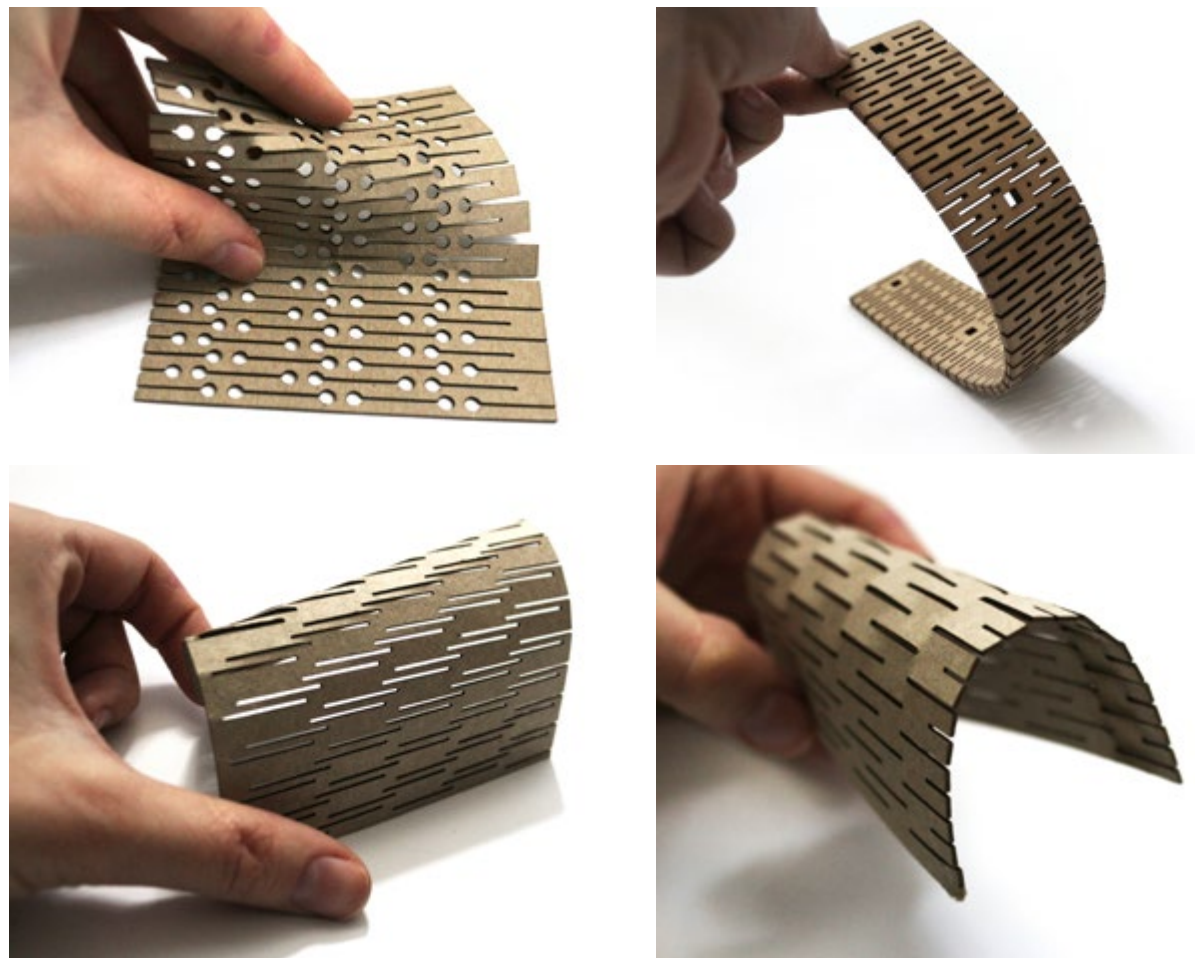
Obr. 68 vzor vytvořený pomocí parametrického skriptu



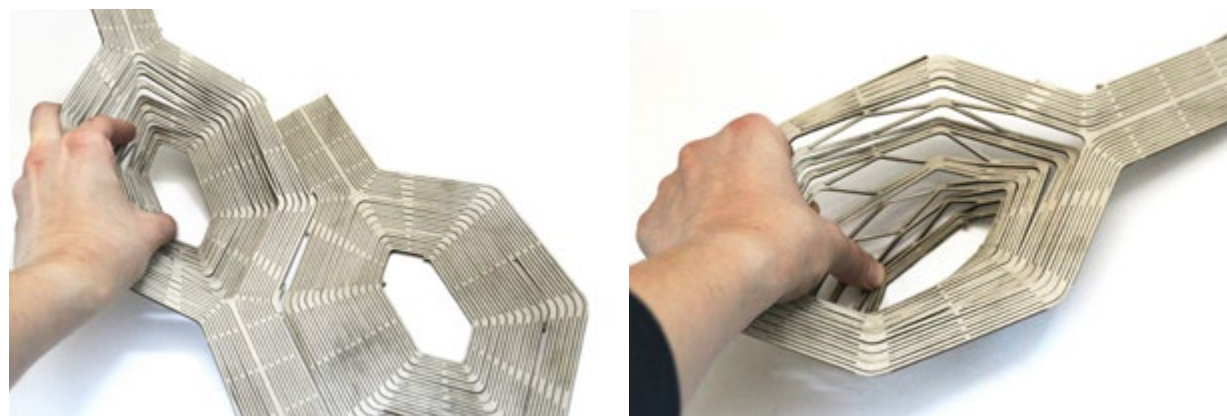
Obr. 69 parametrická analýza křivosti 3d plochy



Obr. 70-72 fyzický test s 3,3mm sololitovou deskou s rozměry přibližně 500x700 mm



Obr. 73-76 další testované příklady jednoduchého čárového vzoru



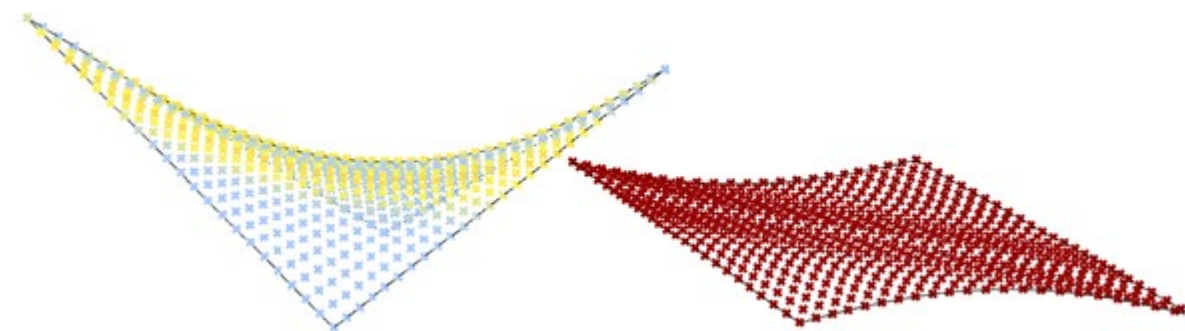
Obr. 77-78 zkouška modularity prvku



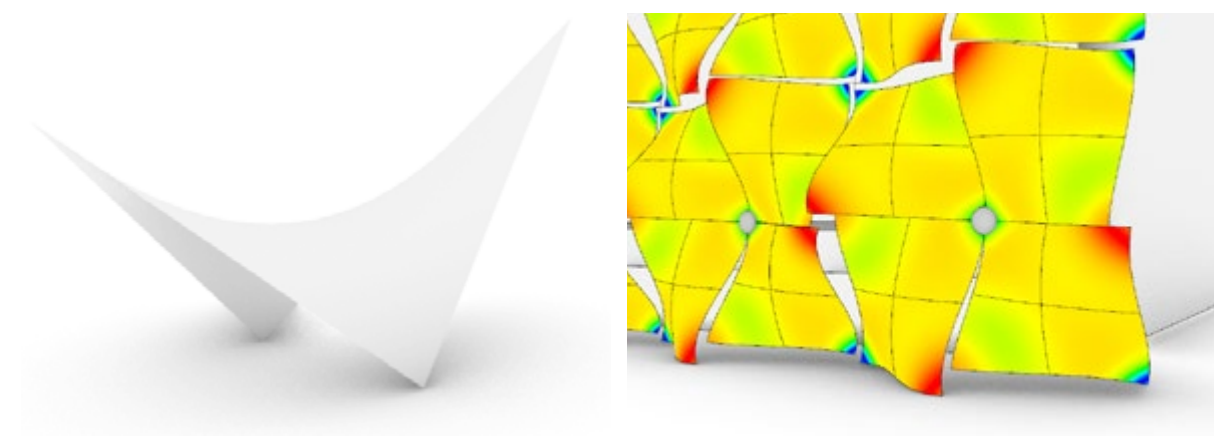
Obr. 79-80 tvarování sololitového panelu za pomoci rezné nite

4.1.2 Parabolický hyperboloid a aplikace tří vzorů

Experimentování s antiklasickou plochou, která byla vytvořena ze čtverce, analyzována její křivost a poté rozbavena zpět do 2d. Využití těchto prvků by mohlo být například na nějakou tvarově zajímavou fasádu.

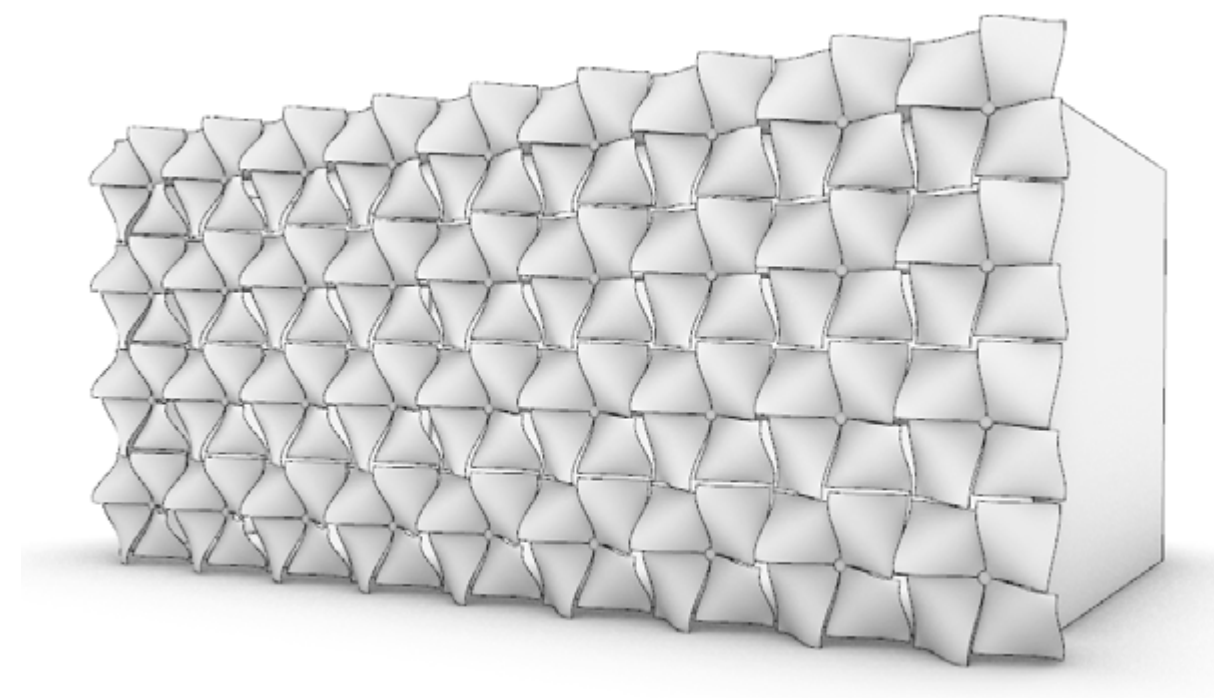


Obr. 81 parametrická bodová analýza parabolického hyperboloidu a jeho rozbaleného tvaru

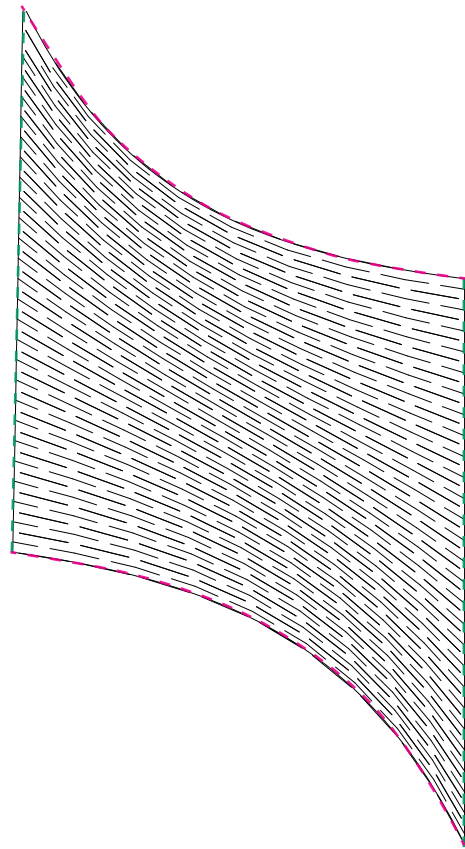


Obr. 82 parabolický hyperboloid

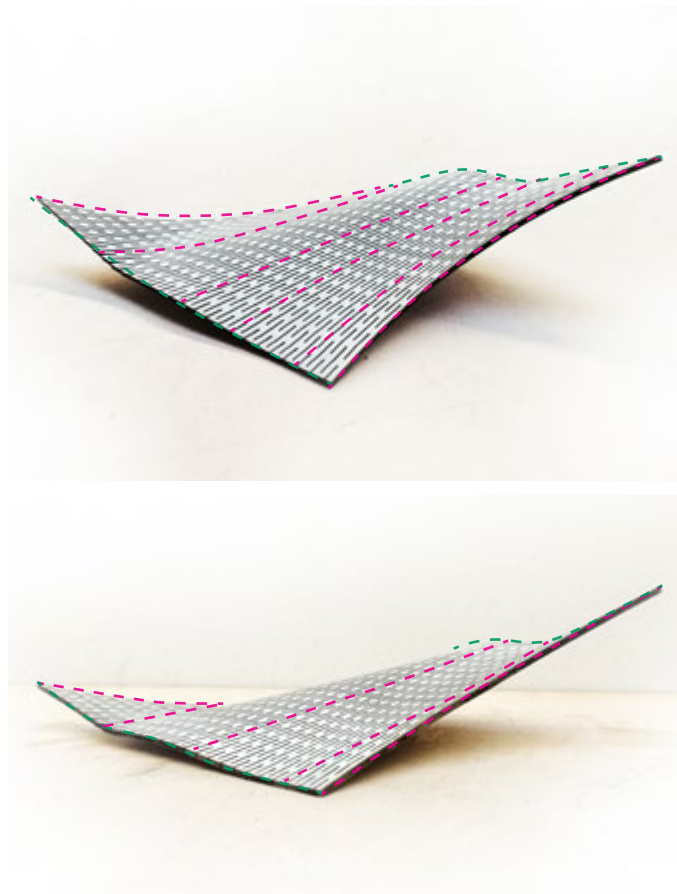
Obr. 83 analýza křivosti plochy upraveného parabolického hyperboloidu



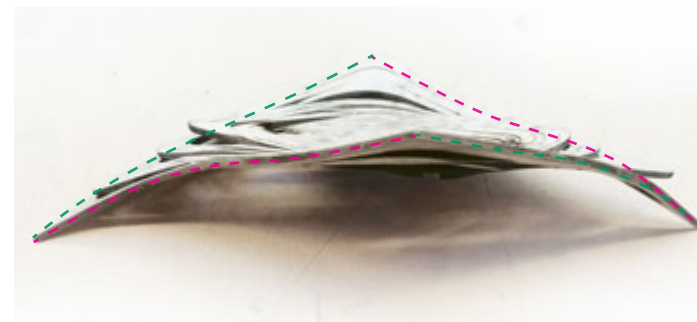
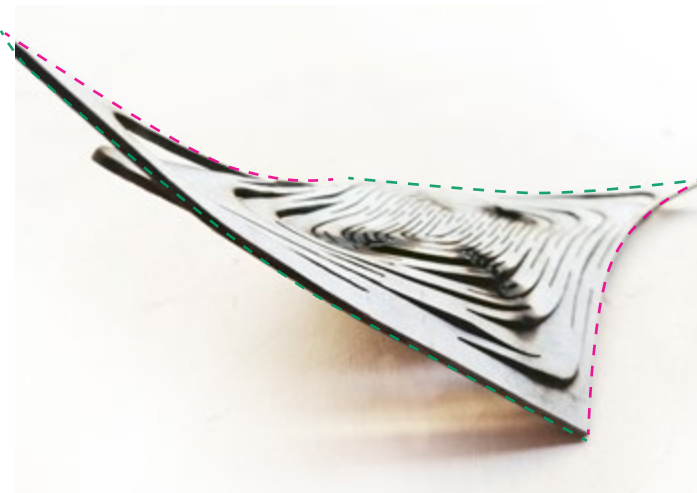
Obr. 84 uskupení 3d ploch k použití na fasádě

Test 1

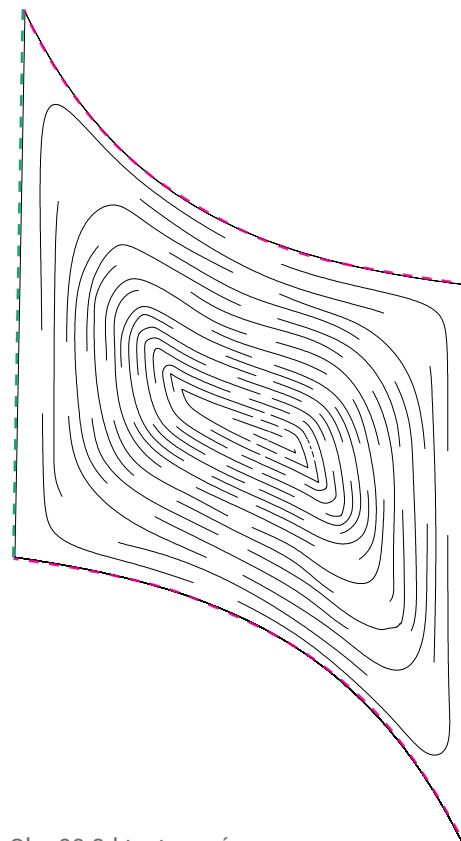
Obr. 85 2d testovaný vzor



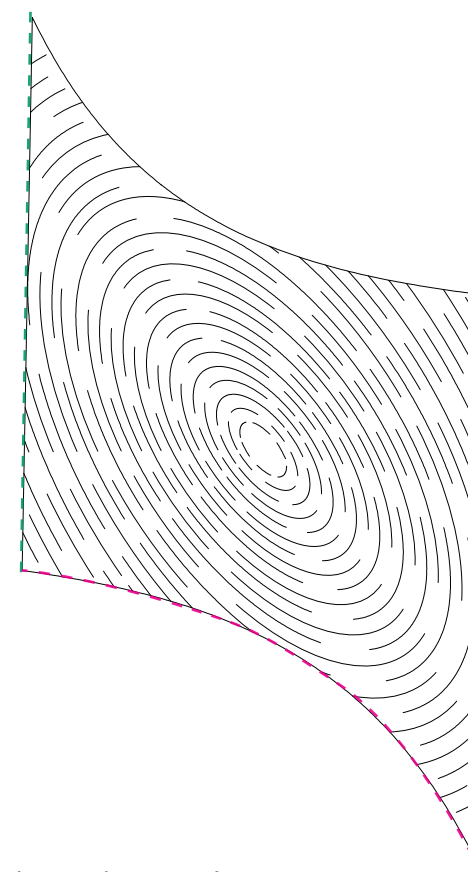
Obr. 86-87 fyzický model

Test 2

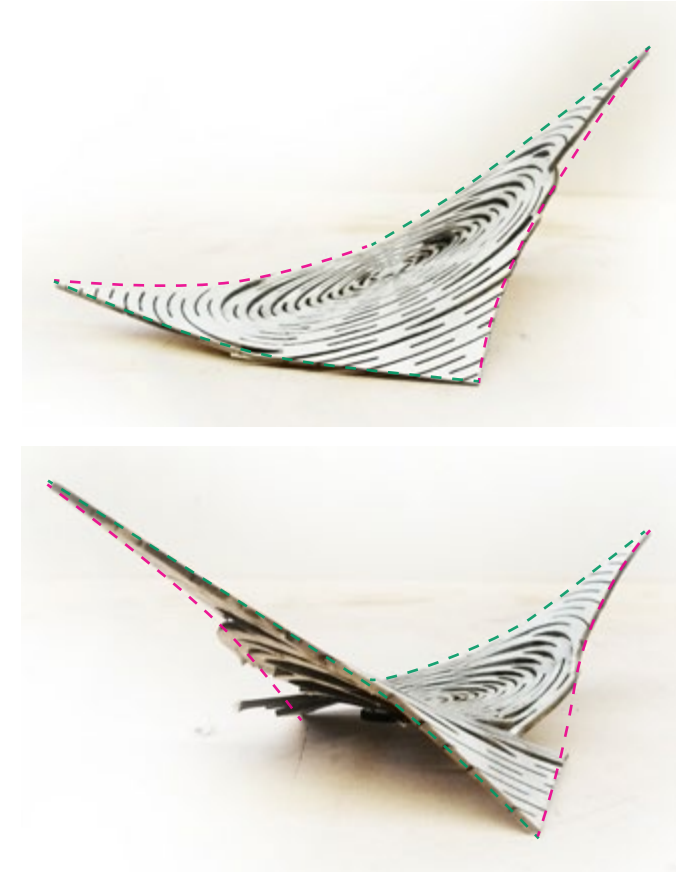
Obr. 88-89 fyzický model



Obr. 90 2d testovaný vzor

Test 3

Obr. 91 2d testovaný vzor



Obr. 92-93 fyzický model

Testovaný materiál - 2 mm plná lepenka

Rozměry fyzických modelů - cca 120 x 100 mm

Výhody - jednoduchost všech vzorů a rychlost jejich výroby, variabilita

Nevýhody - pro rozbalený digitální model by se musel lépe vzor přizpůsobit

Test 1 - Aplikován pouze jednosměrný čárový vzor. Dá se snadno ohýbat v obou protilehlých směrech. Pro větší možnost ohybu by musely být jednotlivé čáry delší.

Test 2 - Snaha o vzor reagující na tvar, ale kvůli chybě laseru je model spálen. Vzor se směrem ke středu zmenšuje a jednotlivé řezy se přibližují.

Test 3 - Hladší přechod v ohybu a stejně jako předchozí se linie řezu směrem ke středu zmenšují a přibližují.

4.1.3 Hexagonální model

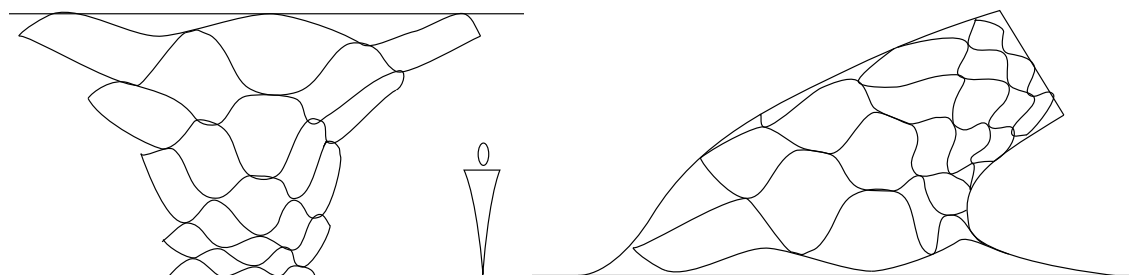
Zkouška na základě reference v podkapitole 3.3.4 Výplně na míru. Bohužel materiál není pro tento způsob tvarování úplně vhodný, protože praská a vhodnější by mohl být nějaký druh plastu, který má vyšší pevnost. Další nevýhodou je nemožnost výroby velkoformátových prořezávaných konstrukcí, tak aby byly z jednoho kusu.

Materiál - 2 mm plná lepenka

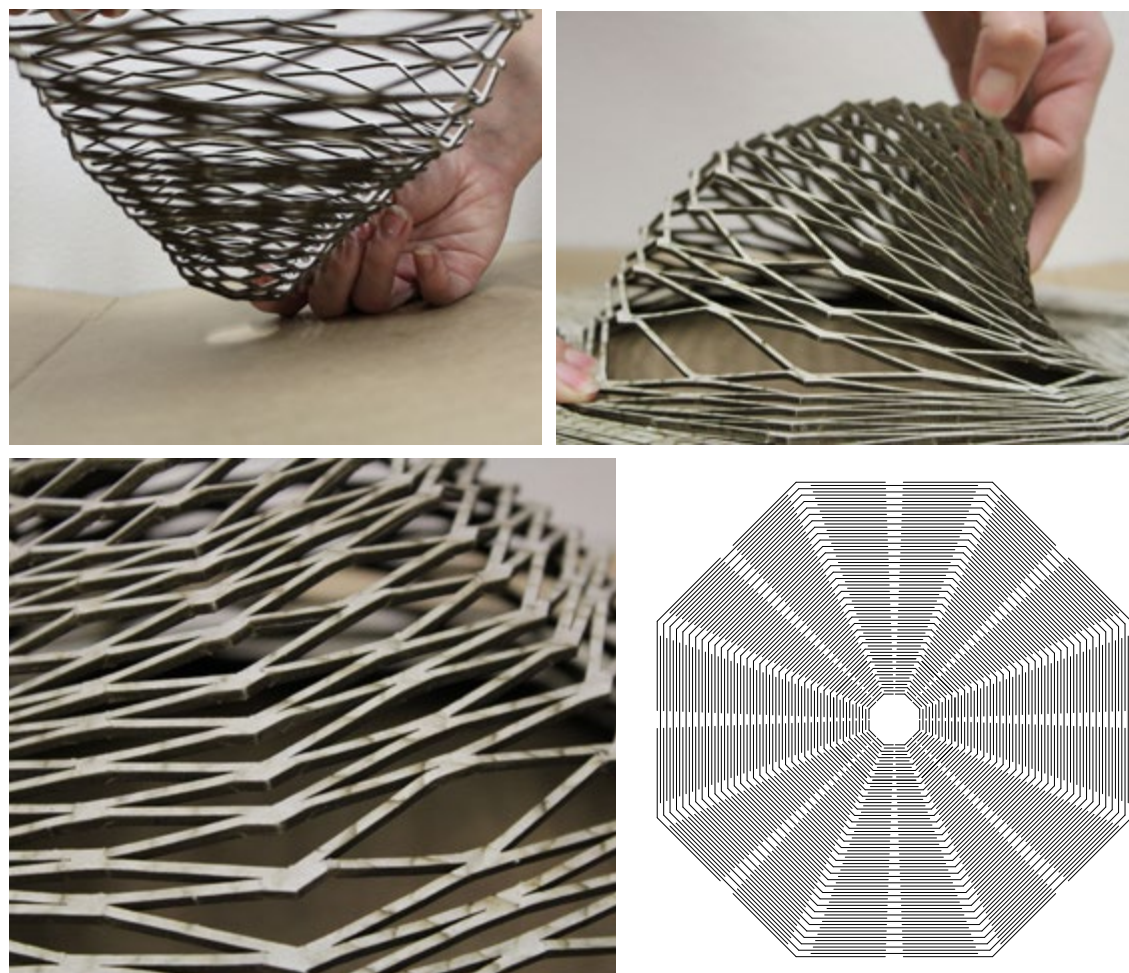
Rozměry fyzického modelu - 250 x 250 mm

Výhody - jednoduchost vzoru a rychlost výroby, možnost rozšíření do prostoru

Nevýhody - při velkém rozšíření se láme, mezery mezi jednotlivými zářezy musí být v tomto měřítku větší



Obr. 94 schéma žádoucího chování fyzického testu

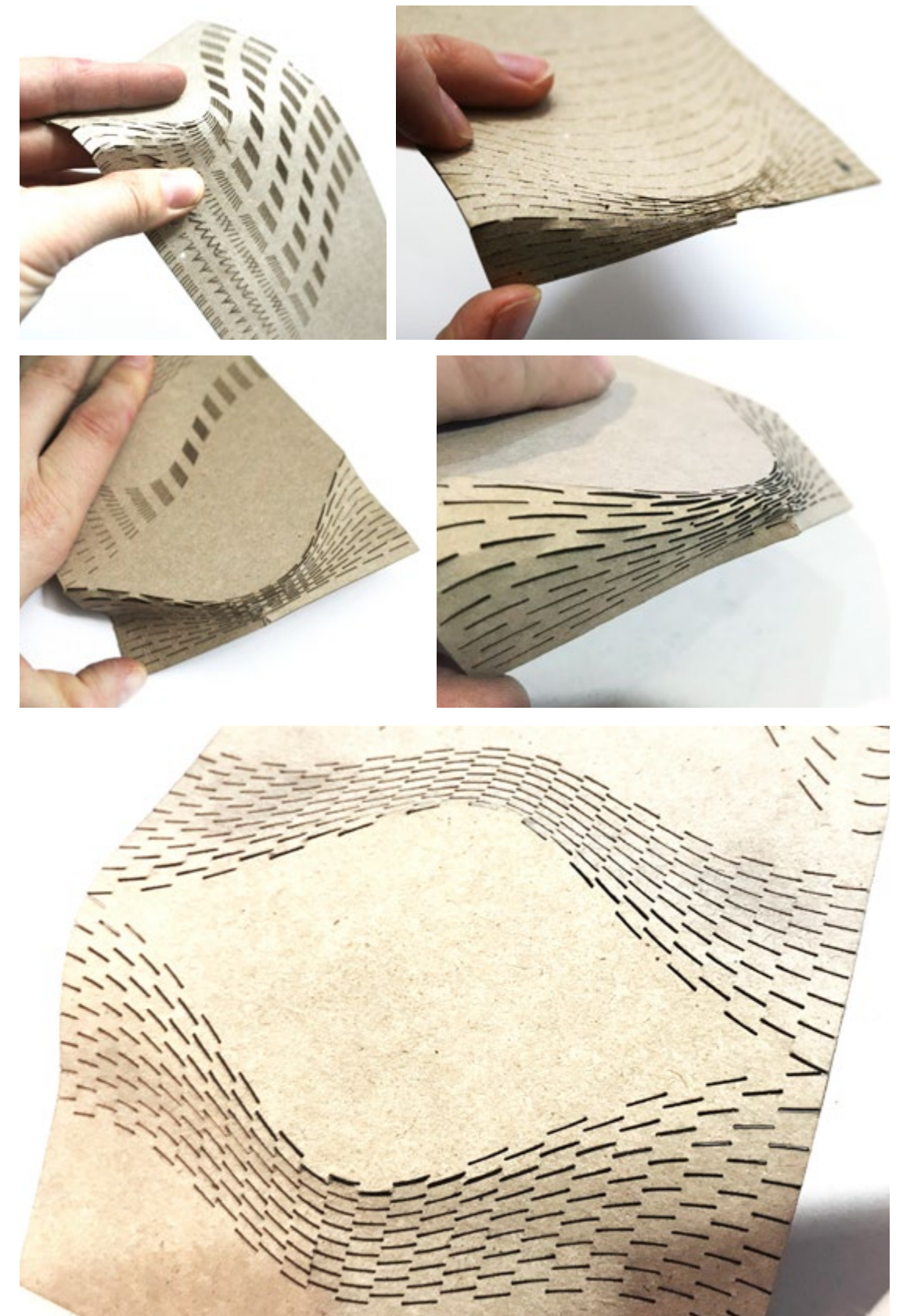


Obr. 95-97 reálné chování fyzického testu

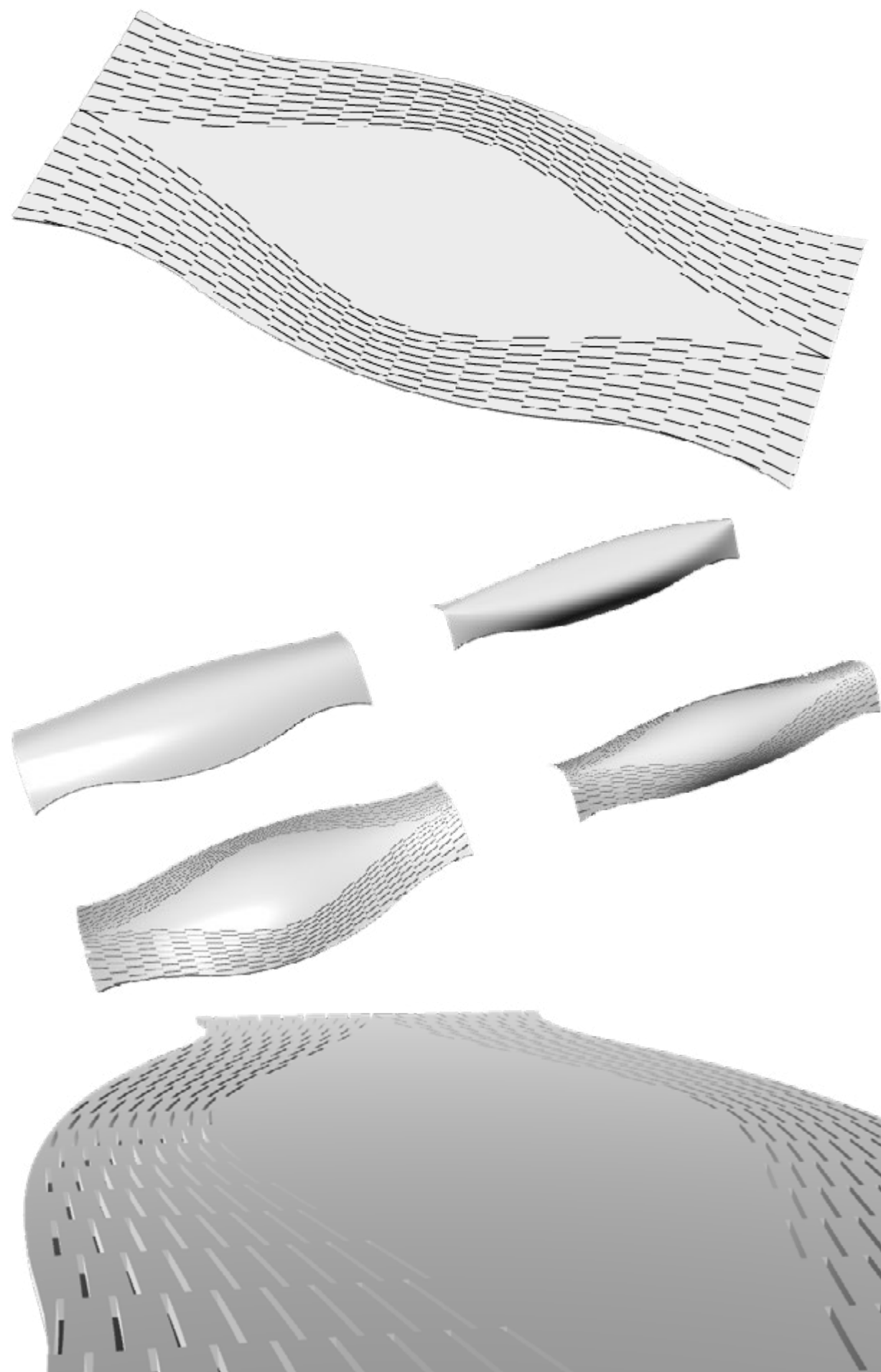
Obr. 98 2d výkres testovaného vzoru

4.1.4 Vzory vln a kalibrace fyzického s digitálním modelem

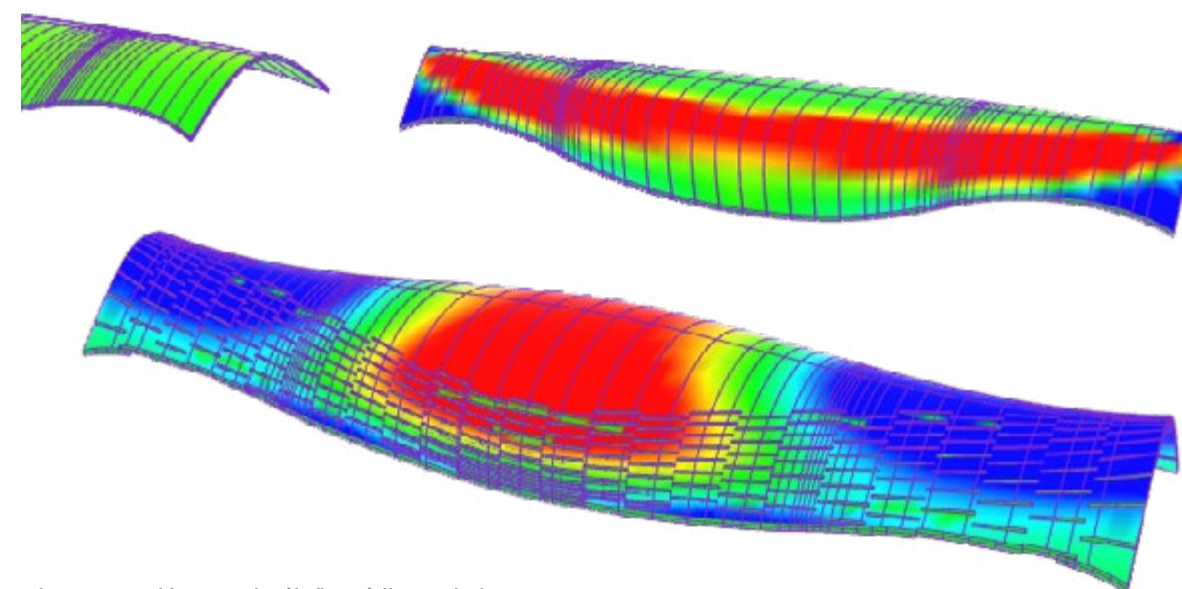
Testování chování plynulých křivek, pro ohyb materiálu ve více směrech. Možné pracovat pouze s dřevotřískovými materiály, ostatní by praskaly proti směru vláken. Spodní test byl poté analyzován i digitálně.



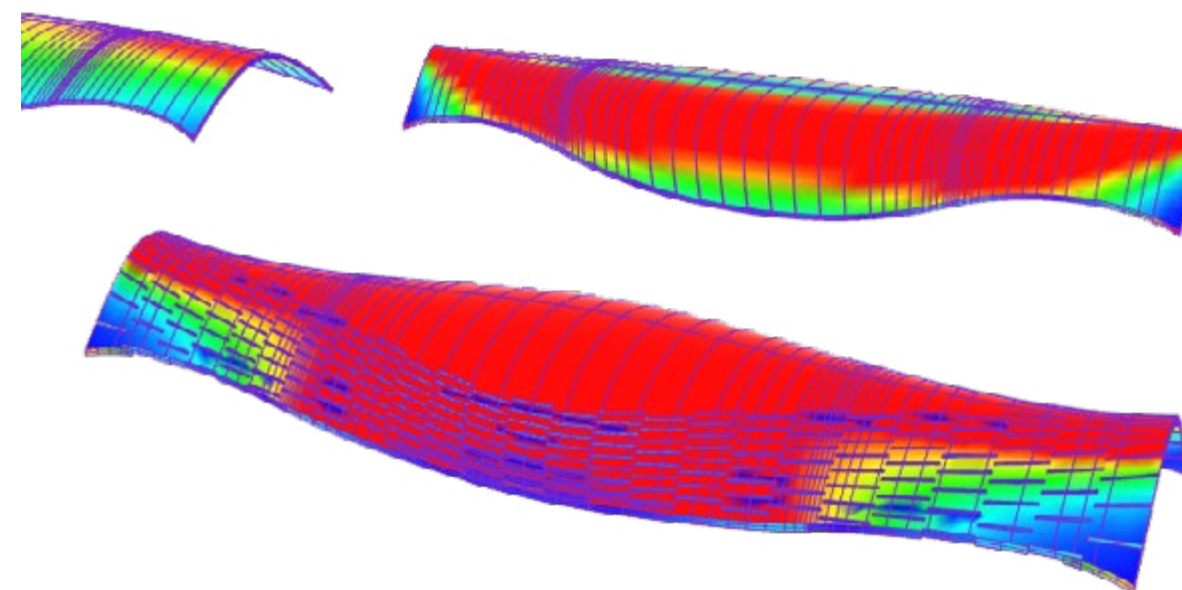
Obr. 99-103 ukázka fyzických testů s plynulými liniemi



Obr. 104-106 tvorba digitálního testu podle předchozího fyzického



Obr. 107 analýza maximálního rádiusu ohybu

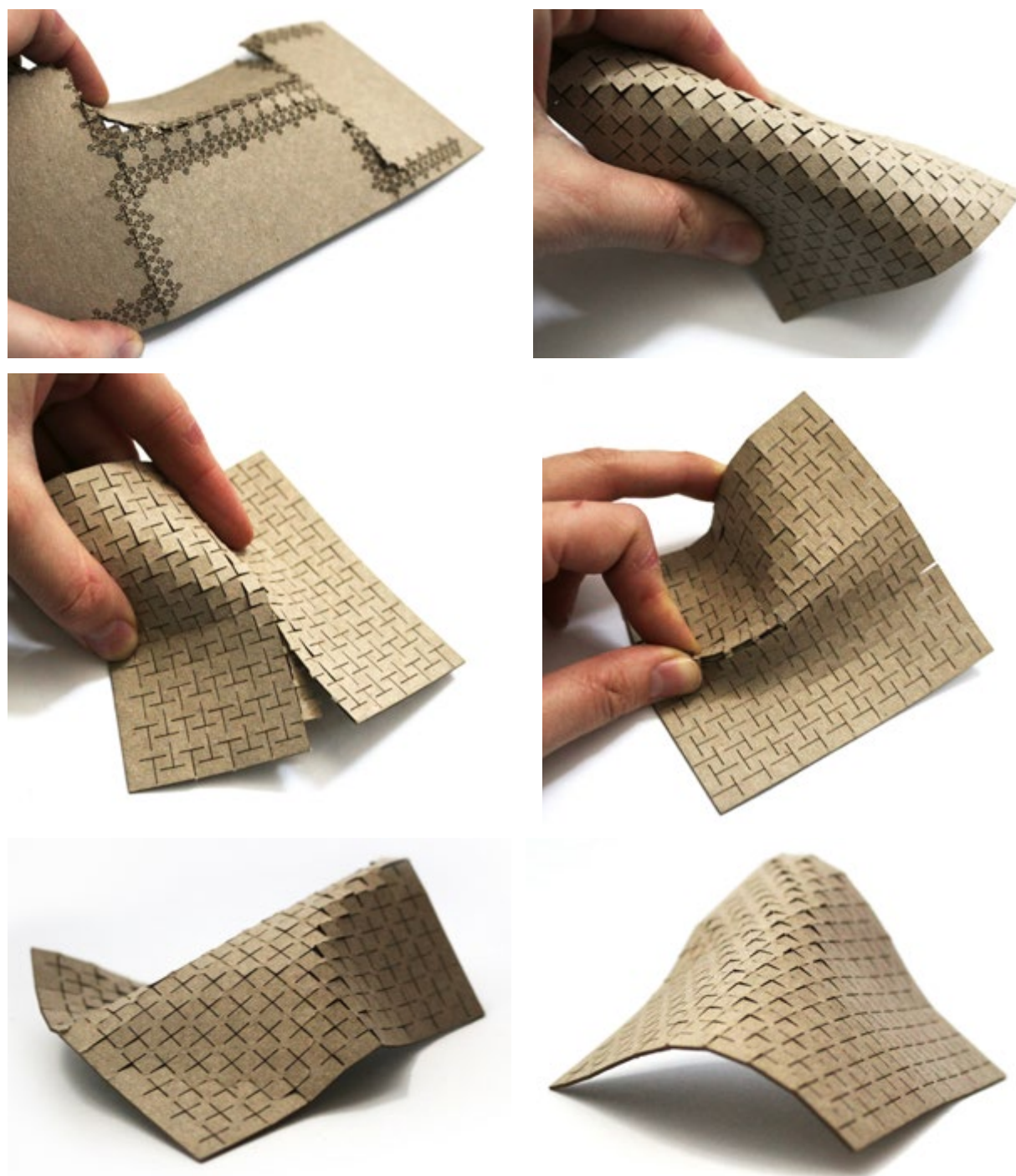


Obr. 108 analýza průměrného zakřivení plochy

Analýza křivosti z programu Rhinoceros ukazuje rozdíl na zkoumaném objektu, pokud jsou na něm aplikovány prořezy a kdy nikoliv. Při umístění prořezů na objektu můžeme vidět, že zakřivení je plynulejší a problematická místa jsou pouze uprostřed, kde by bylo potřeba aplikovat více prořezů. U analýzy neprořezaného objektu vidíme, že největší napětí je v oblasti největšího ohybu.

4.1.5 Křížové vzory / Crosses patterns

Velmi zajímavou část tvoří tyto křížové vzory, lze tvořit mnoho variací. Přestože jsou kříže na sebe kolmé umožňují ohyb dřevovláknitého materiálu do dvou protilehlých směrů a tvoří zajímavou strukturu. Problém nastává, pokud se snažíme materiál natáhnout a nebo překročíme mez ohybu, potom materiál praská. Pozor je nutné dávat i na jednotlivé mezery mezi jednotlivými prořezanými linkami. Důležité je zmínit také to, že testovaný materiál z plné lepinky není příliš vhodný pro posouzení chování dřevěného materiálu, protože sám o sobě je poměrně snadno tvarovatelný.



Obr. 109-114 ukázka fyzických testů s křížovými vzory

4.2 Liniové uzavřené vzory

4.2.1 Trojúhelníkové vzory a jejich variace / Triangular patterns

Výhody

- ohyb v mnoha směrech
- textilní vlastnosti
- velmi flexibilní

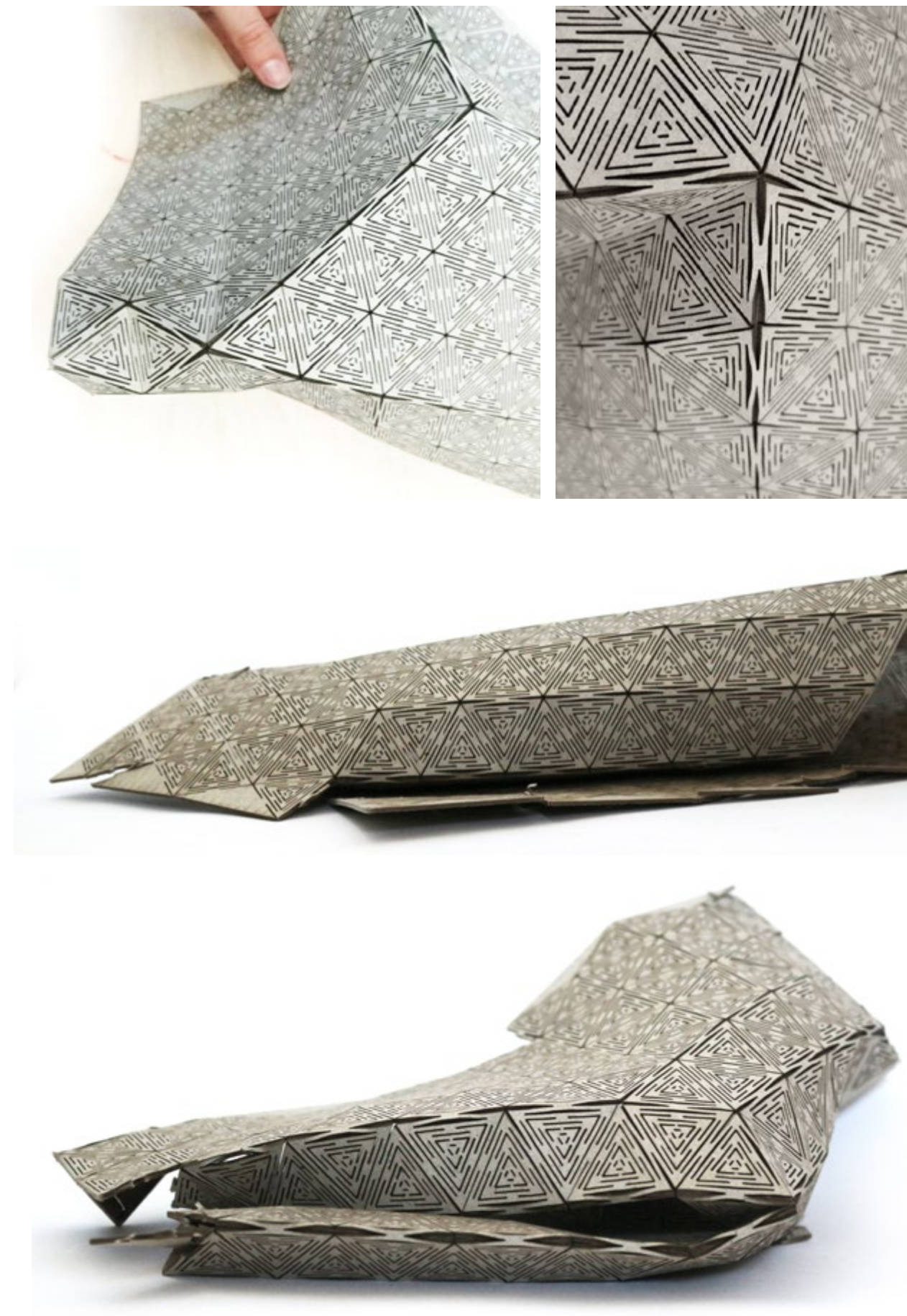
Nevýhody

- nelze kontrolovat směr ohýbání
- nelze docílit statické funkce

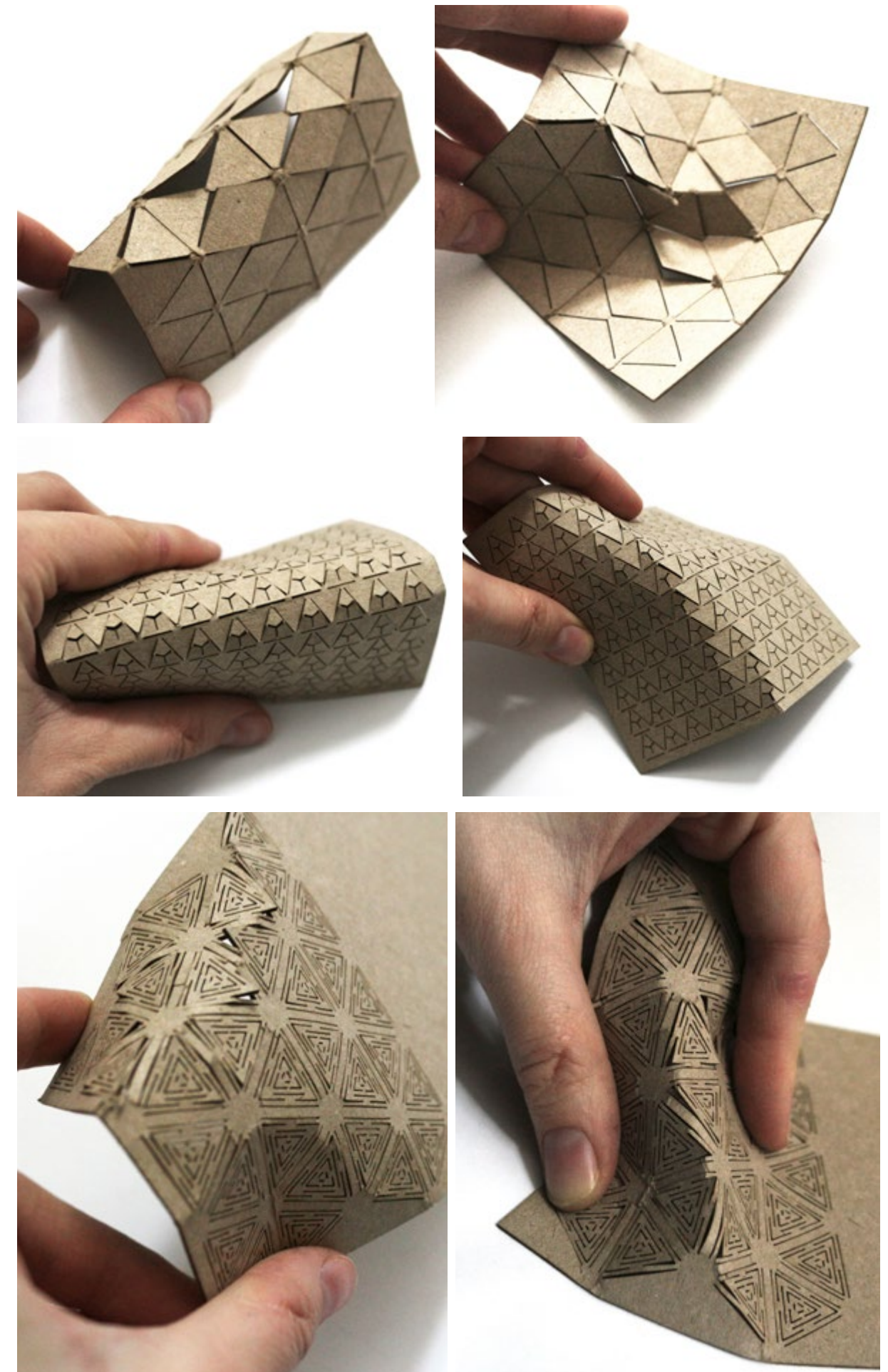
Kvůli flexibilitě a ohybu v několika směrech nemůže fungovat jako zeď nebo nosná konstrukce. Není snadné docílit kontrolovaného ohybu, bez další podpůrné konstrukce. Dokážeme si představit podobnou strukturu ve tvaru kopule nebo nějaké střechy, kde by měla dekorativní funkci. Byly vyzkoušeny i různé další variace tohoto vzoru, ale pravděpodobně nelze docílit skutečně volnou stojící konstrukci bez další podpory.



Obr. 115 fyzický test trojúhelníkového vzoru na 2 mm plné lepence v rozměrech 300x300 mm



Obr. 116-119 fyzický test trojúhelníkového vzoru na 2 mm plné lepence v rozměrech 300x300 mm



Obr. 120-125 fyzické test trojúhelníkového vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm

4.2.2 Vlny, kruhy, obdélníky

Materiál - 2 mm plná lepenka

Rozměry fyzického modelu - 100 x 100 mm

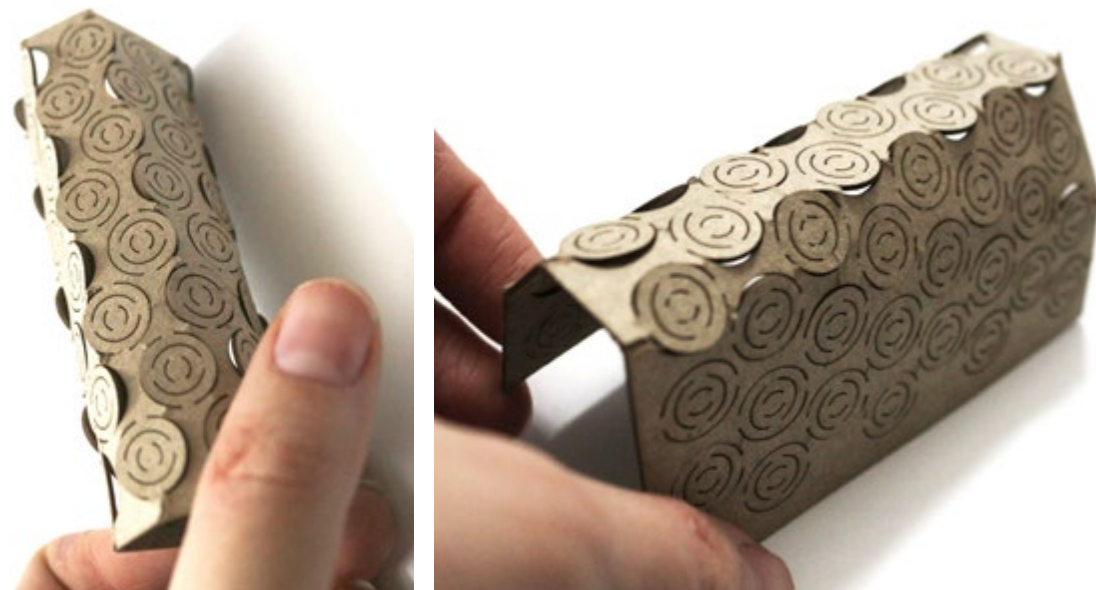
Výhody

- ohyb ve dvou směrech
- zajímavý vzhled
- tvorba kombinací

Nevýhody

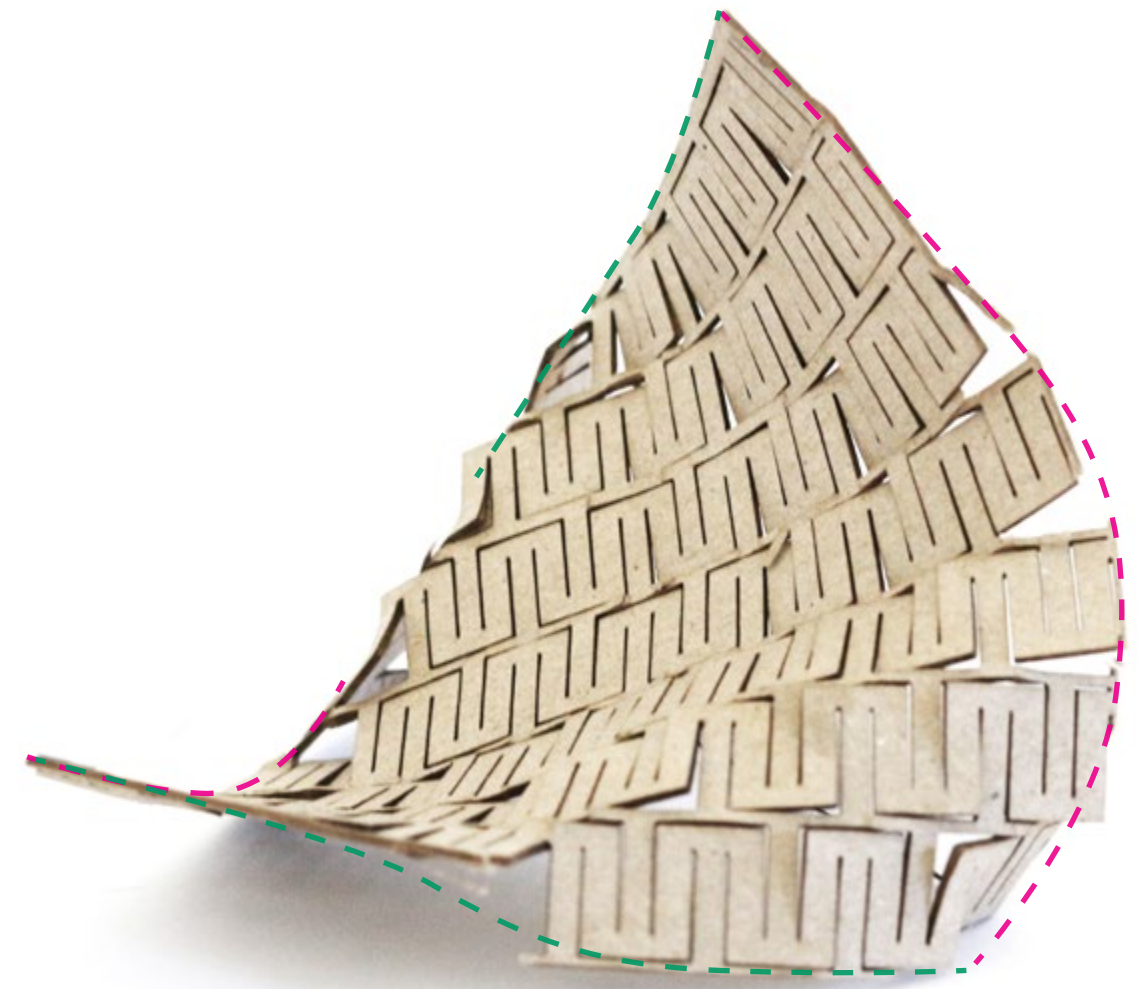
- nemožnost rozšíření ani komprese
- láme se

Vzory jsou velmi vzhledově efektivní, ale kvůli malým mezerám mezi jednotlivým prořezáním hrozí narušení materiálu.

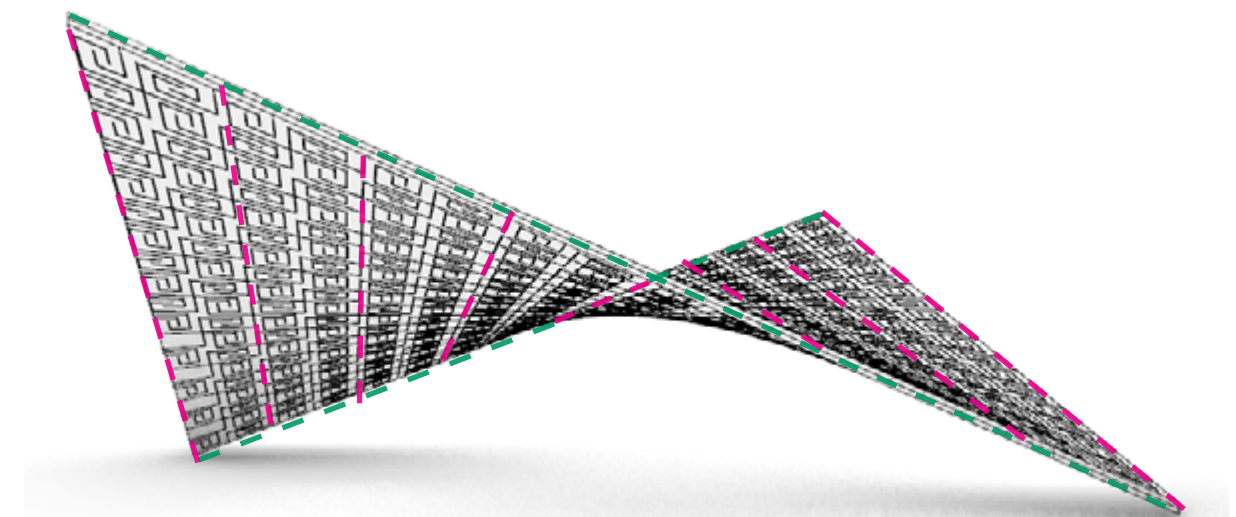


Obr. 126-129 fyzické test dvou vzorů na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm

Díky referenčnímu projektu v kapitole 3.3.9 Flexibilita plošných materiálů bylo objeveno, že je pravděpodobně možné přiblížit se ke tvaru hyperbolického paraboloidu za použití „bludišťového“ vzoru. Podobný vzor byl již předtím otestován, ale při pokusu o jeho tvarování pomocí rezné nitě nebyl záměr uskutečněn a vidíme, že jednotlivé hrany jsou prohlé a nejsou rovné. Pro ukázkou záměru byl vytvořen digitální model.



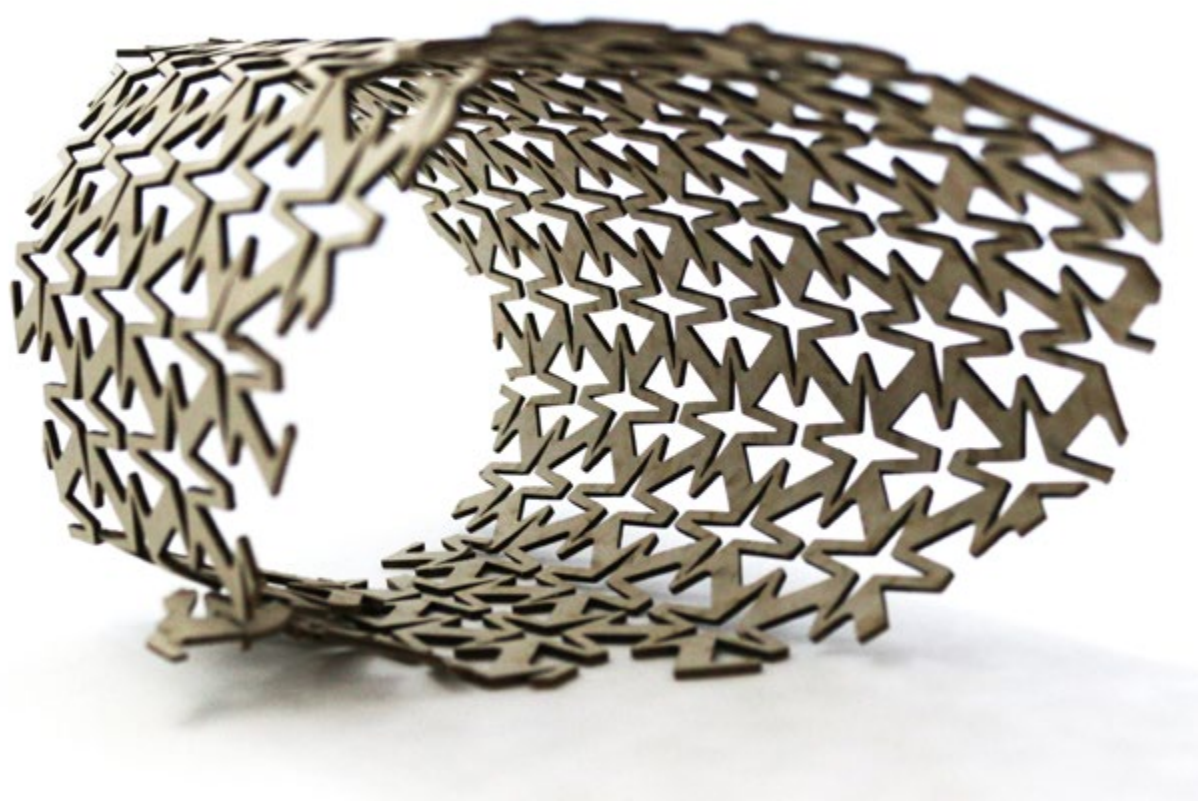
Obr. 130 fyzický test vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm



Obr. 131 digitální 3d model s aplikovaným vzorem bludiště

4.2.3 Hvězdicový vzor

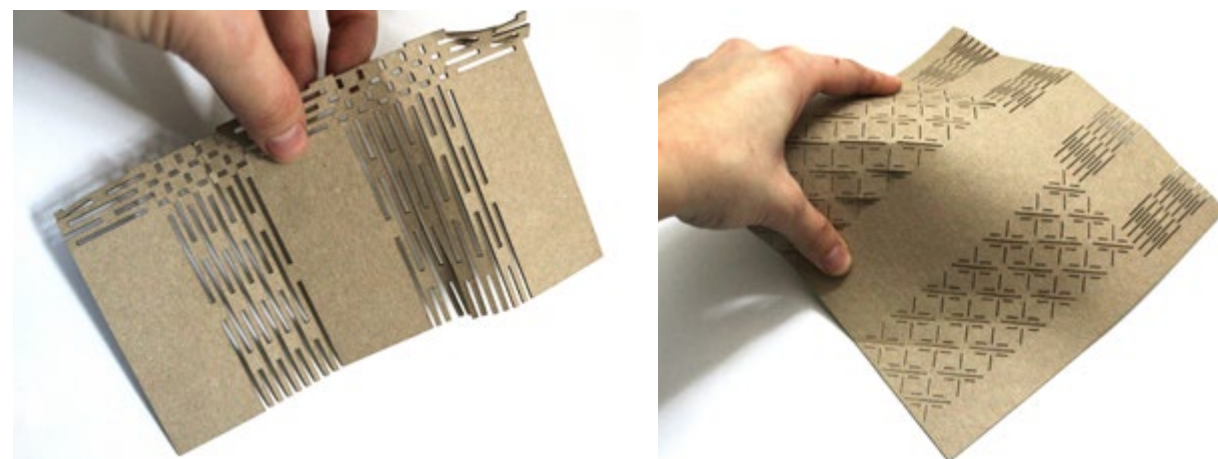
Vzor vytvořený na základě reference v kapitole 3.3.9 Flexibilita plošných materiálů. Umožňuje nám plynulý ohyb do zaoblených tvarů. Kvůli odebrání velkého množství materiálu je velmi křehký a musí se s ním zacházet opatrně.



Obr. 132 fyzický test hvězdicového vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech cca 400x200 mm

4.3 Kombinace vzorů

Od počátku byla snaha tvořit různé kombinace vzorů, které by umožňovaly dosáhnout antiklastických ploch. První testy nám ukázaly, že nelze tvořit vzory, které budou na sebe kolmé, ale že je nutné pracovat s plynulými liniemi viz kapitola 4.1.4

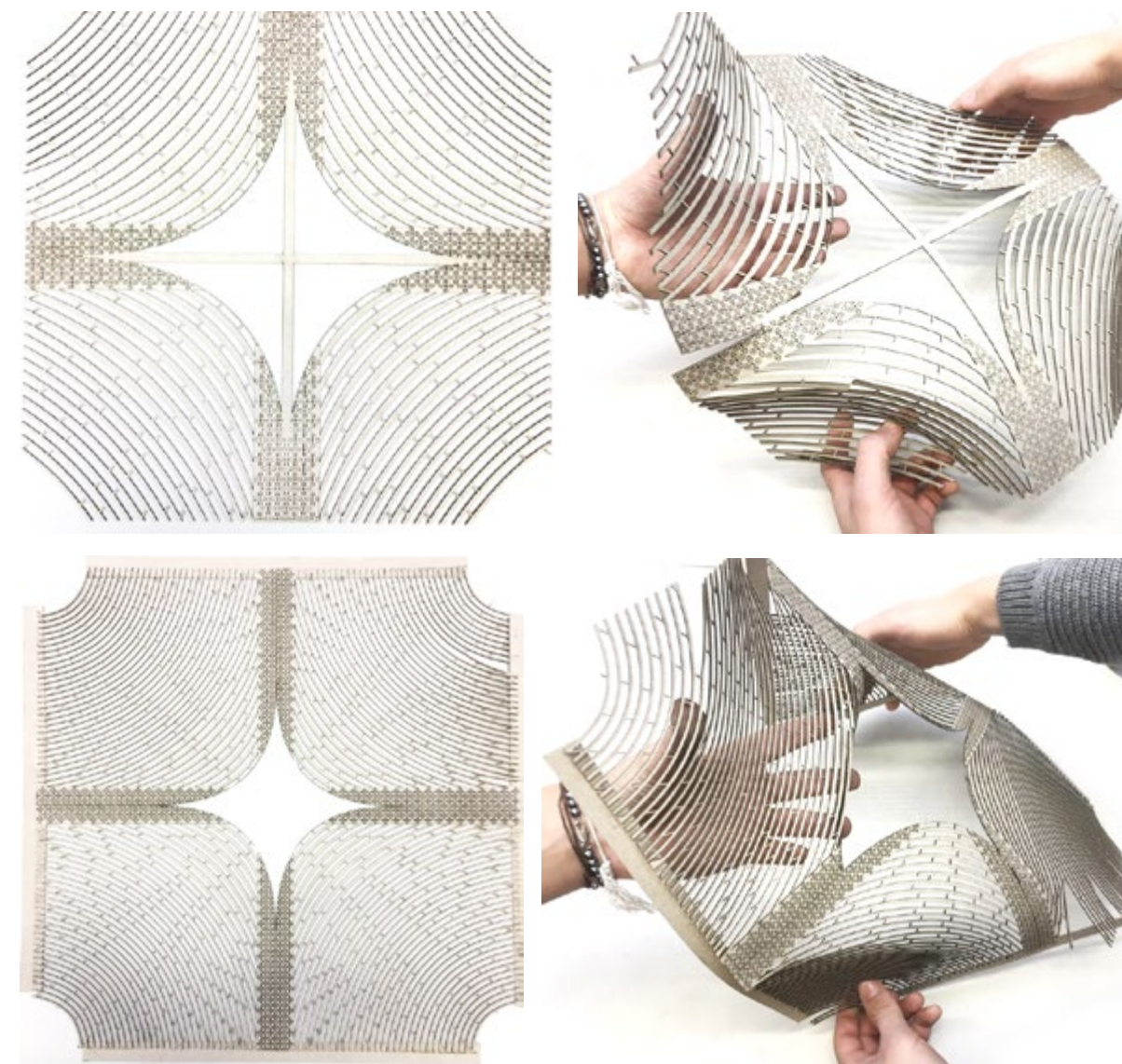


Obr. 133-134 fyzické testy s kombinací vzorů na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x200 mm (vlevo) a 200x200 mm (vpravo)



Obr. 135-136 fyzické testy kombinací vzorů na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 400x200 mm (vlevo) 300x300 (vpravo, první pokus o vytvoření antiklastické plochy)

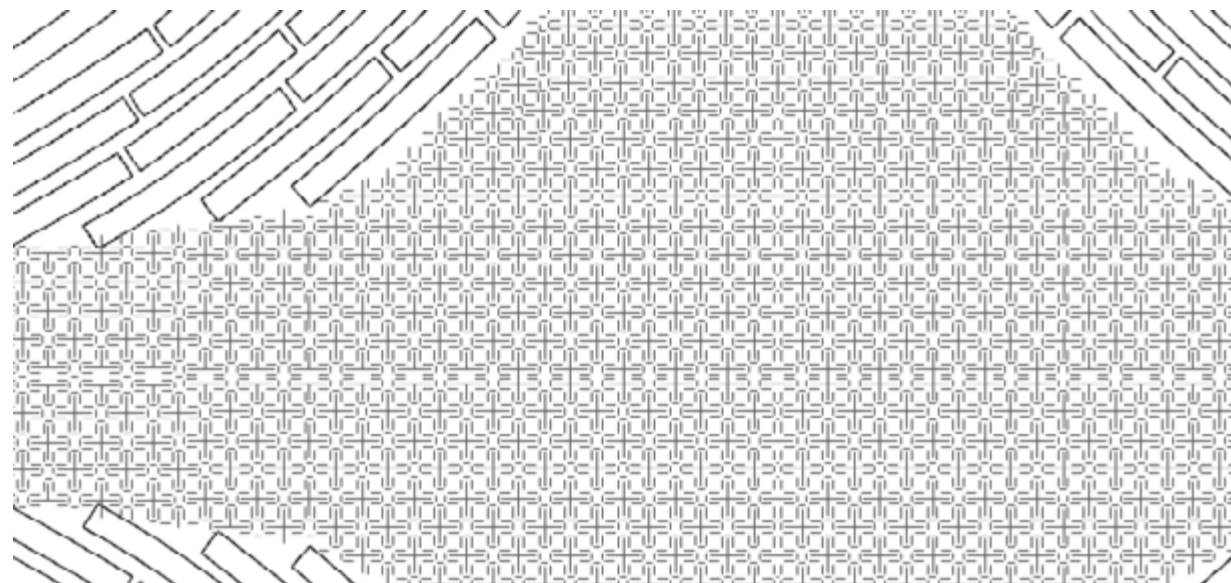
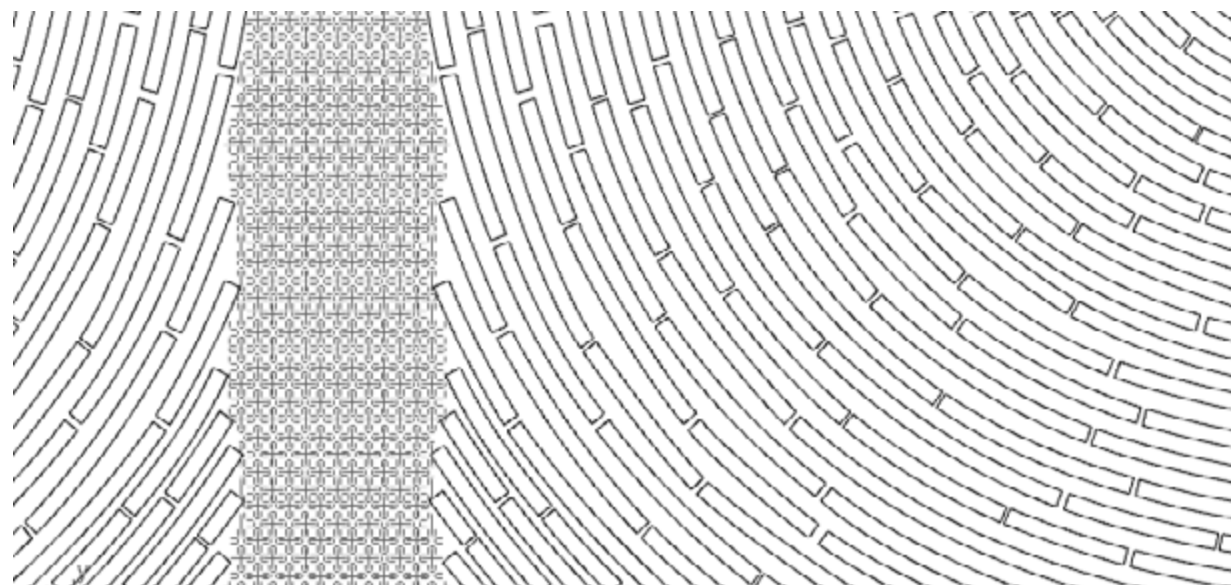
Pokročilejší pokusy o tvorbu antiklastické plochy. Vzory jsou ale velmi časově náročné na svou výrobu a nejsou stále úplně funkční podle představ. Snahou bylo vytvoření parabolického hyperboloidu, který bude mít uchycené všechny čtyři hrany.



Obr. 137-140 fyzické testy kombinací vzorů při pokusu o vytvoření antiklastické plochy na 2 mm plné lepence v rozměrech 400x400 mm



Obr. 141 fyzický test kombinací vzorů při pokusu o vytvoření antiklastické plochy na 2 mm plné lepence v rozměrech 400x400 mm



Obr. 142-143 2d výkres jedné z možných variant kombinací vzorů

4.3.1 Experiment s překreslením vzoru anatomie ruky

Tento test byl velmi poučný, protože ukazuje, jak se vzory do sebe mohou prolínat a jaké jsou mezi nimi přechody. Test dokazuje, že je nutné, aby mezi vzory byl přechod plynulý, tudíž prořezané linie nesmí být na sebe kolmé. V nejvíce namáhaných částech došlo k roztržení materiálu.



Obr. 144-147 fyzický test podle referenční studie anatomie ruky

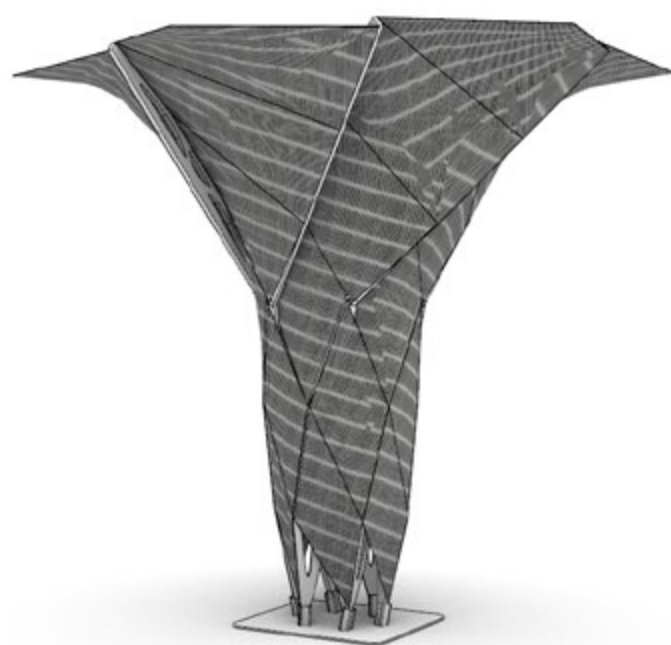
5 Praktická část

Pro praktickou část této bakalářské práce byl zvolen návrh sloupu, který je základním archetypem v architektuře. Sloup je svislý a volně stojící nosný prvek. Převážně díky sloupům můžeme snadno rozeznat jednotlivé stavební slohy. Již v antice jsme se učili rozpoznávat chrámy, jestli jsou v dórsém, ionském a nebo korintském řádu. U množství chrámů je sloup to jediné, co z nich zbylo. Sloup tedy považuji za základ architektury a pokud se při tomto výzkumu docílí jeho nosnosti, můžeme pokračovat ve studii dalších archetypů a vytvářet složitější konstrukce.

5.1 První fyzický model sloupu

Vytvoření fyzického modelu sloupu byla opravdu výzva. Práce probíhala z počátku v týmu, ve kterém jsem byla já (autorka této bakalářské práce), studentka Erasmus Lauren Le Bras a student bakalářského studia architektury Ilya Kovalenko. Chtěla bych jim tímto poděkovat za spolupráci v první části. Ani jeden z nás neměl předchozí zkušenosti se stavbou modelu v měřítku 1:1. Dělat projekt v týmu byla obrovská zkušenost pro nás všechny. Týmová spolupráce je pro náš obor nutností, ale na škole to běžné není a většinou dělá každý svůj vlastní projekt. Přesto jsem ráda, že ve druhé části jsem byla již na projekt opět sama a práci mohla tvořit podle sebe.

Při našem výzkumu jsme zpočátku dospěli k názoru, že metodou prořezávání pravděpodobně nelze vytvořit samonosnou konstrukci a má pouze dekorativní funkci. Bylo nutné navrhnout příhradovou konstrukci, která prořezané panely ponese a budou na ní upevněny. Výroba jednotlivých panelů je poměrně časově náročná a tak jsme nepracovali s proměnlivým rastrem vzoru. Na všech panelech je stejný a ty jsou vytvořeny z rozbalených ploch na digitálním modelu.



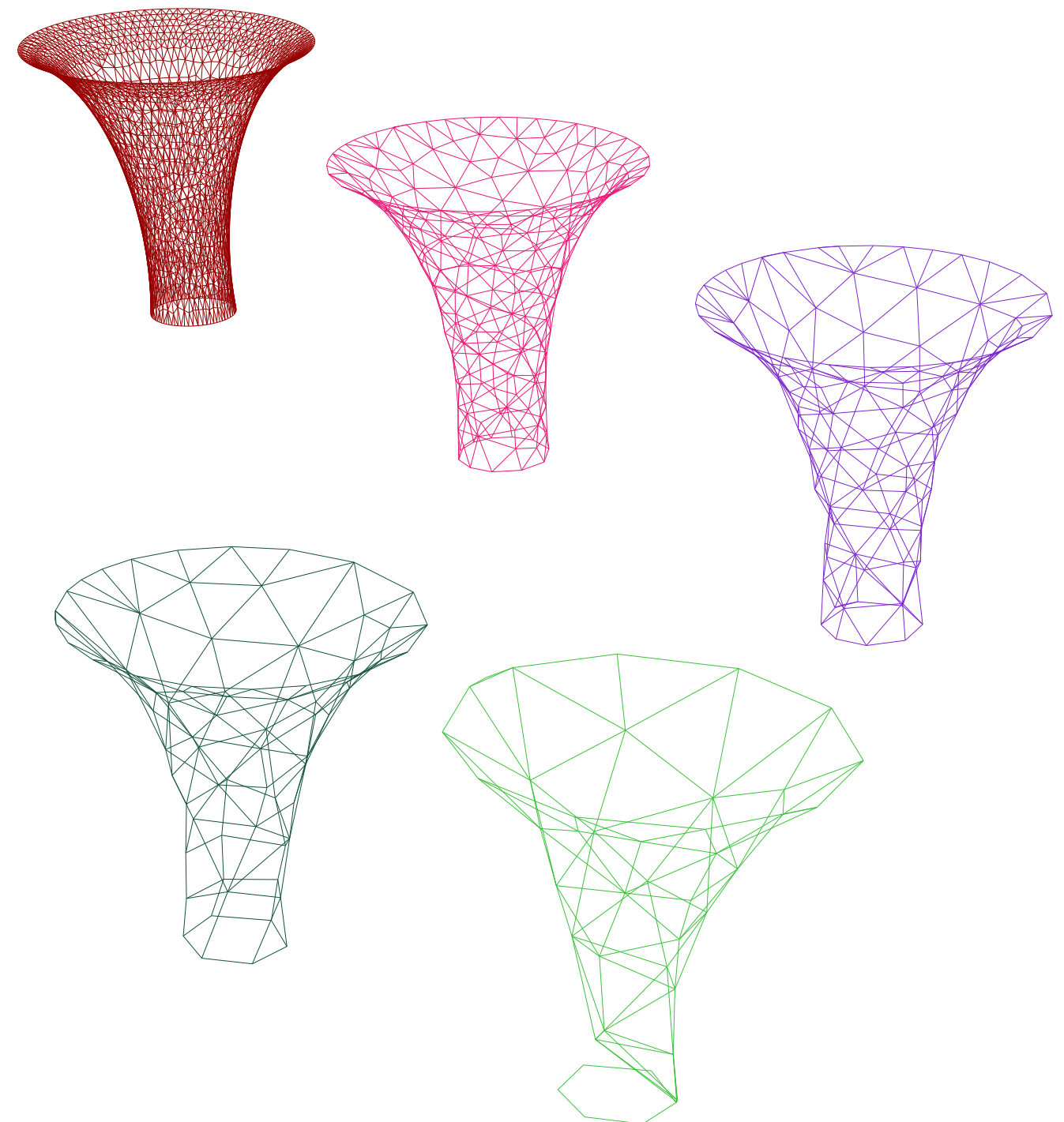
Obr. 148 digitální model prvního prototypu sloupu



Obr. 149 foto fyzického modelu sloupu

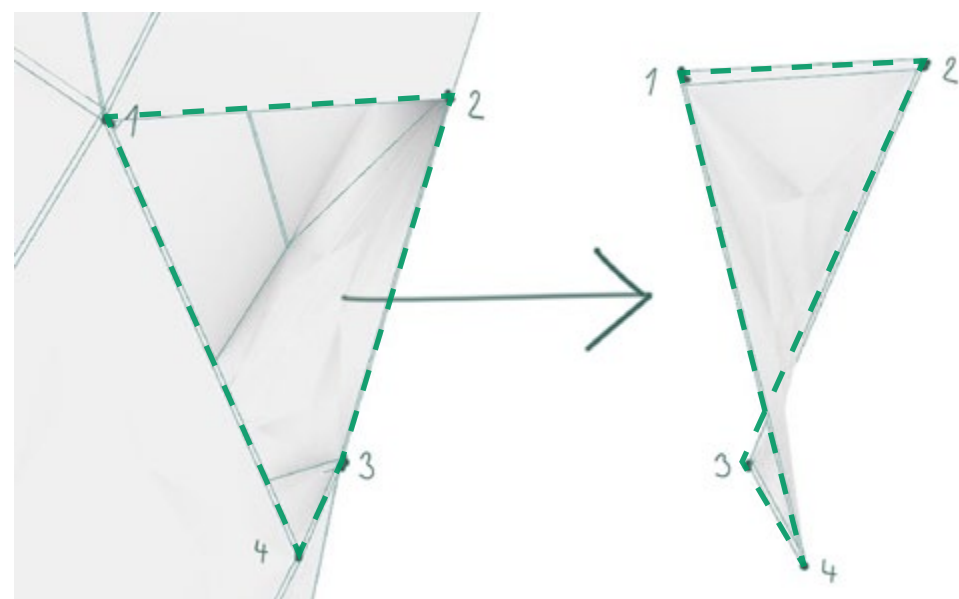
5.1.1 První prototypy

Z počátku bylo snahou udělat první prototypy sloupu parametricky pomocí pluginu MeshMachine v Grasshoperu. Křivky poté exportovány do Rhina a vyplněny plochami. Pro technologii tvarování prořezáváním, ale není tento způsob úplně nejvhodnější.

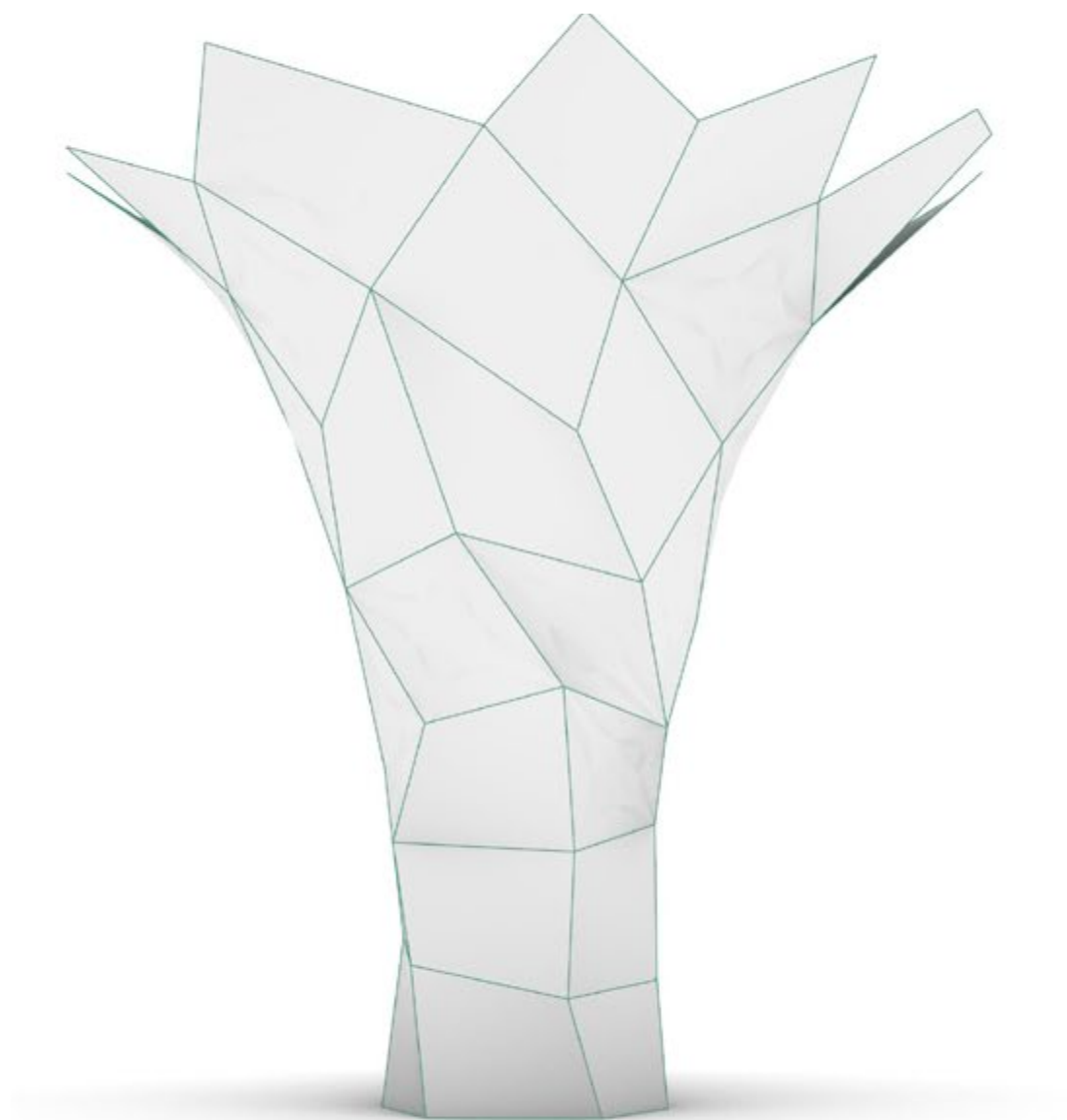


Obr. 150 MeshMachine teselace

Plugin MeshMachine dokáže námi vytvořenou plochu rozdělit na trojúhelníky. Můžeme si zvolit, jak moc bude objekt zjednodušený. U prvního objektu je tvar téměř stejný jako výchozí, ale u posledního objektu můžeme pozorovat, že některé plochy nakonec úplně zmizí.



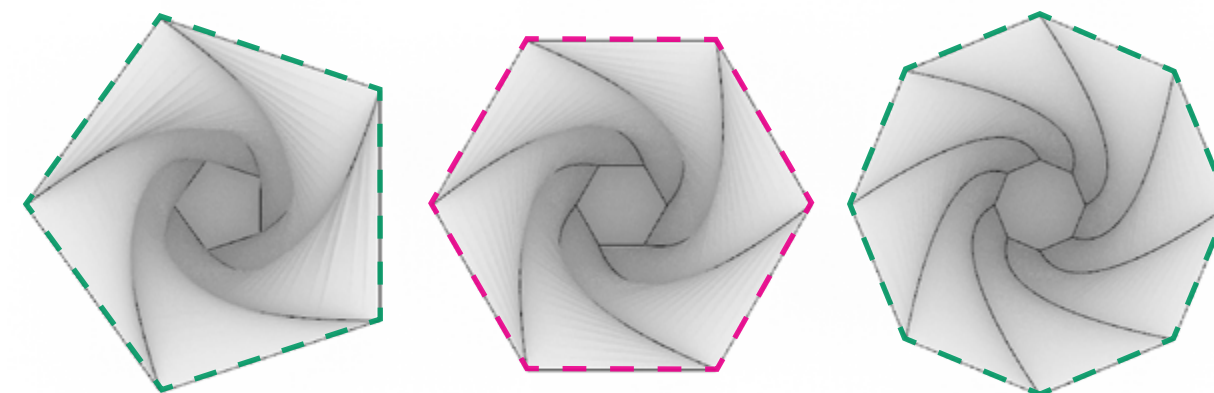
Obr. 151 extrakce jednotlivých panelů



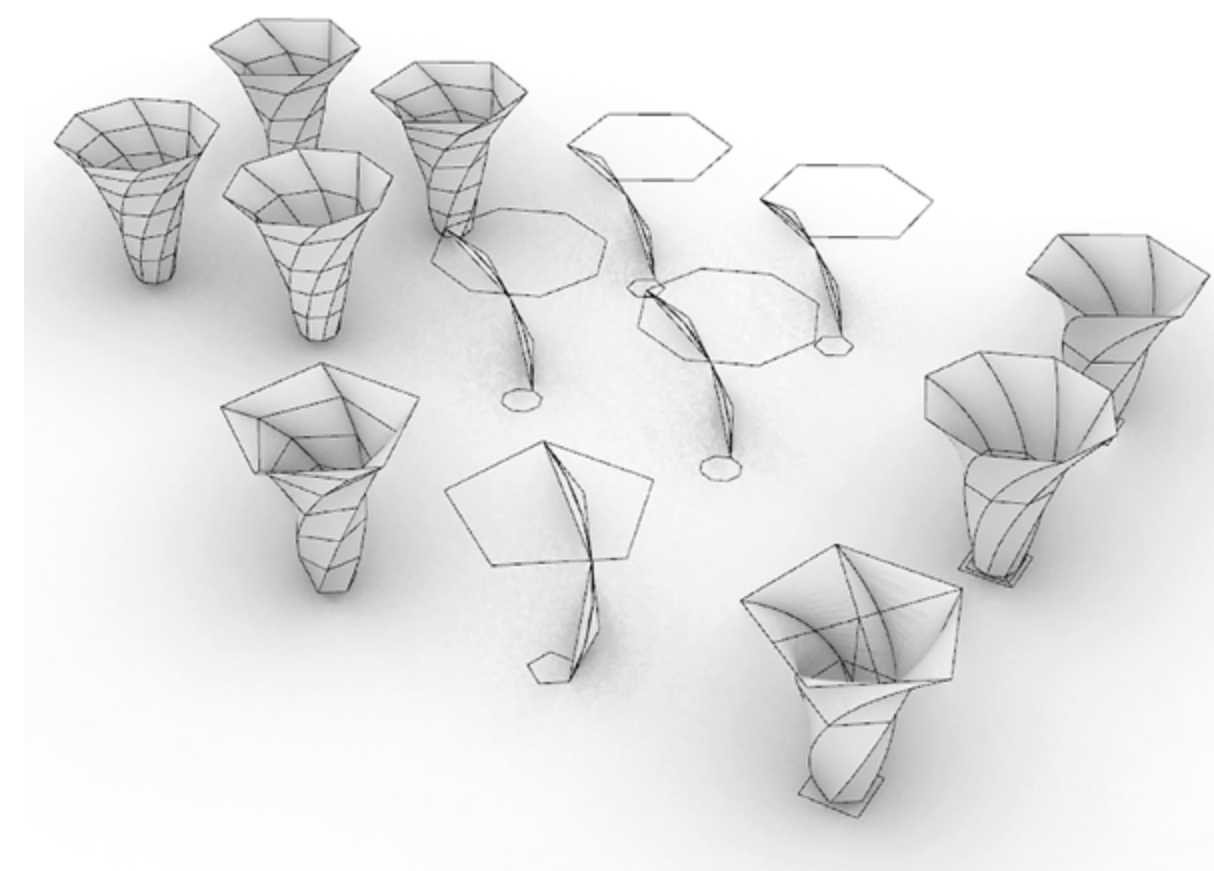
Obr. 152 první prototyp sloupu z parametrických křivek pluginu MeshMachine

5.1.2 Vývoj finálního prvního prototypu

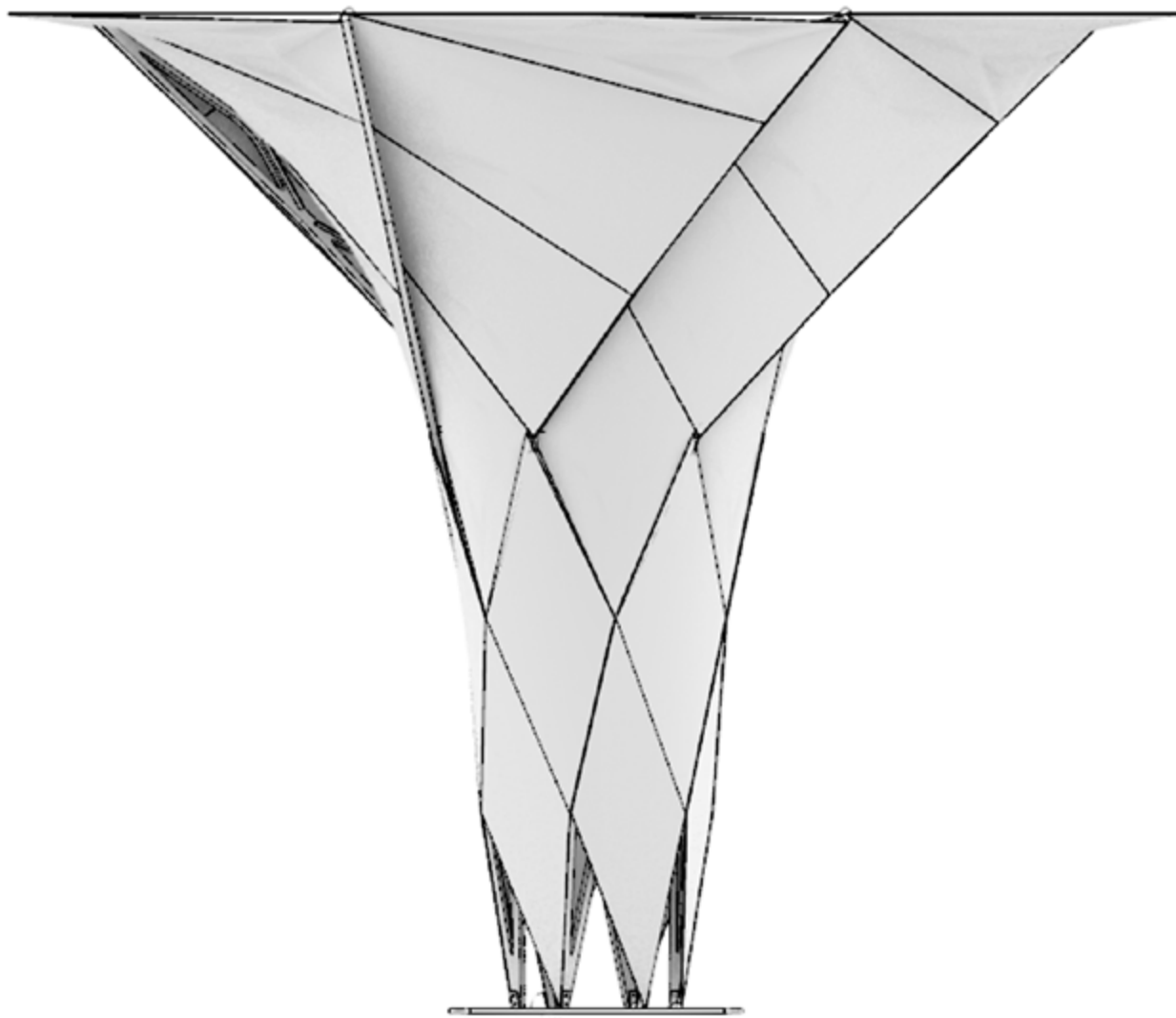
Návrh byl tvořen na začátku z pětiúhelníku, šestiúhelníku a osmiúhelníku. Tvorba probíhala v programu Rhinoceros. Výběr probíhal podle výsledné velikosti a počtu jednotlivých panelů. Ty nesměly být příliš velké, aby se vešly do rozměru laseru a také jich nesmělo být příliš mnoho, aby jejich výroba netrvala tak dlouho. Vybrán byl hexagonální model, který měl celkem 36 kusů panelů, jejichž výroba trvala téměř 30 hodin.



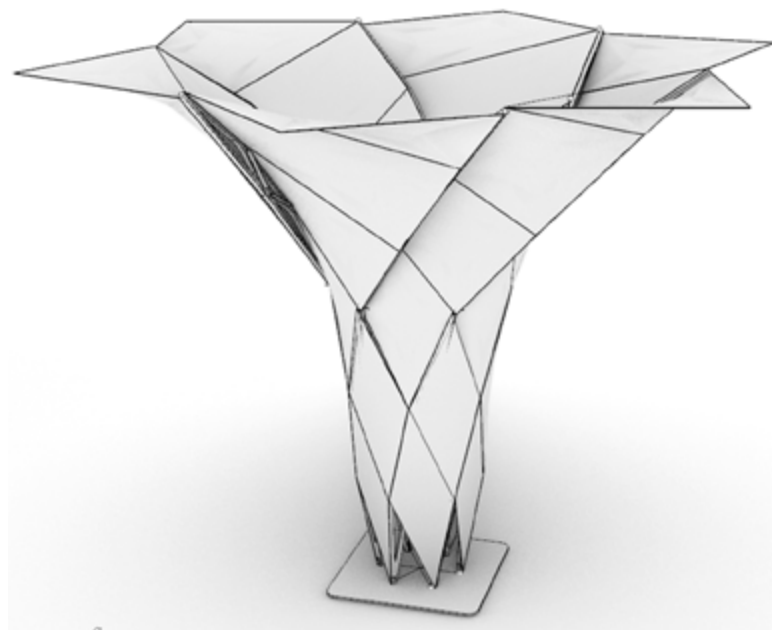
Obr. 153 geometrie sloupů 1 pentagon, 2 hexagon, 3 octagon



Obr. 154 postup tvorby 3d modelu



Obr. 155 finální digitální verze prvního prototypu pohled zepředu



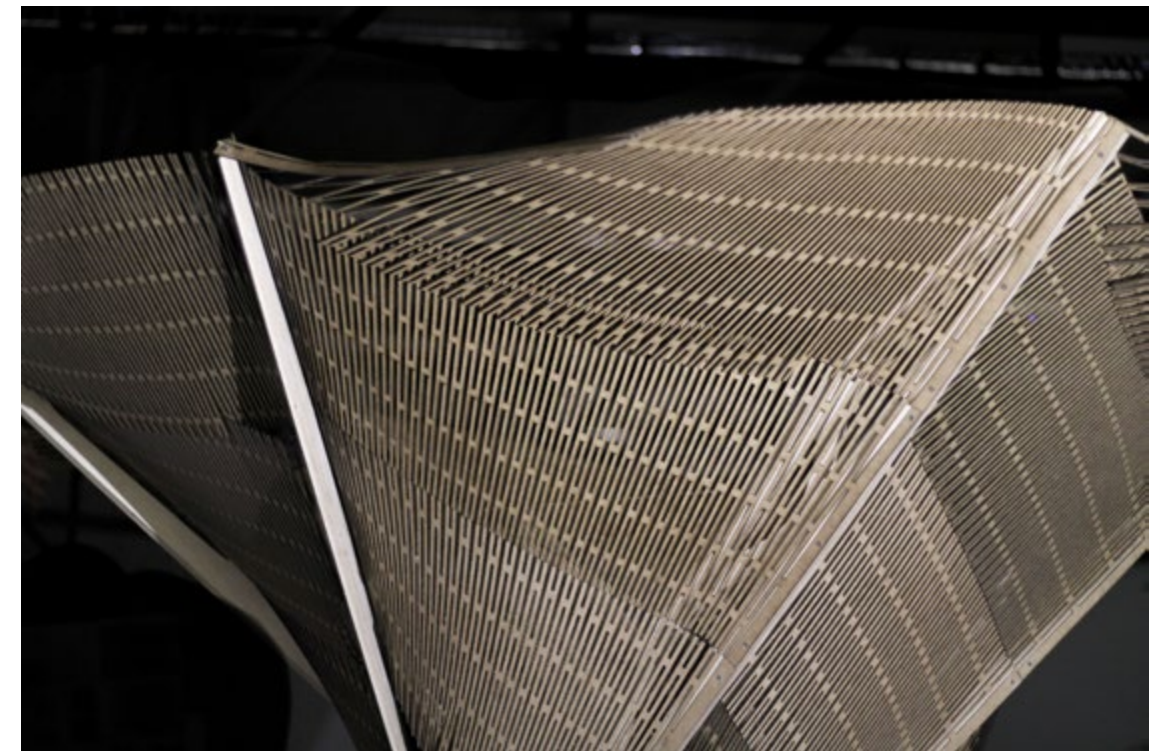
Obr. 156 finální digitální verze prvního prototypu perspektivní pohled



Obr. 157 nosná konstrukce sloupu

5.1.3 Ponaučení pro další prototypy

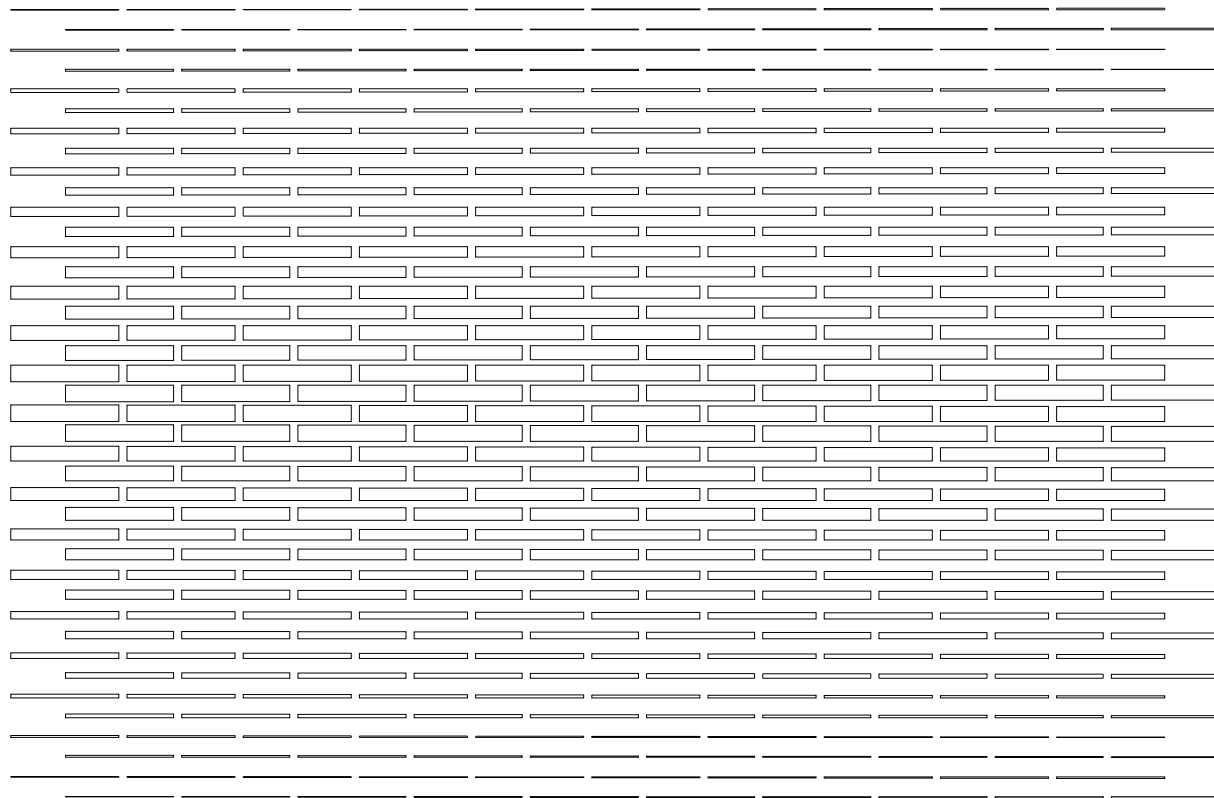
Úspěchem je, že přes všechna úskalí sloup nakonec stál a nespádl. Jeho zajímavý vzhled upoutá na první pohled, ale když k němu člověk přijde blíže, začne si všímat chyb, které na něm jsou. Přichycení panelů je pomocí šroubů na obou stranách. Někde jsou dva, někde tři a vzdálenost mezi nimi je od oka. Kvůli zvolení sololitových desek se občas prořezaný vzor trhá. S jednotlivými kusy muselo být manipulováno velmi opatrně. Sololit byl zvolen kvůli jeho snadné dostupnosti, dopravě a ceně. Překližková příhradová konstrukce funguje poměrně dobře, ale účelem je, aby další prototyp sloupu již takovouto konstrukci nepotřeboval. Důraz bude kladen na to, aby prořezané panely byly nosné a na zjištění způsobu, jak jednotlivé desky napojit. Dále je žádoucí, aby vzor reagoval částečně na zakřivení plochy. Pokud nebude vzor někde potřeba, je zbytečné, aby se všude prořezával stejný rastr vzoru. Další vývoj bude pracovat s roztažností materiálu po prořezání. Pokud prořízneme pouze linii, materiál můžeme natáhnout. Pokud bych pracovala se stejným vzorem, ale prořezané by byly obdélníky, tak materiál pouze ohnu, ale nenatáhnou. Přesto všechno, považuji první model za velmi poučný pro další prototypy.



Obr. 158 fotografie koruny fyzického modelu sloupu

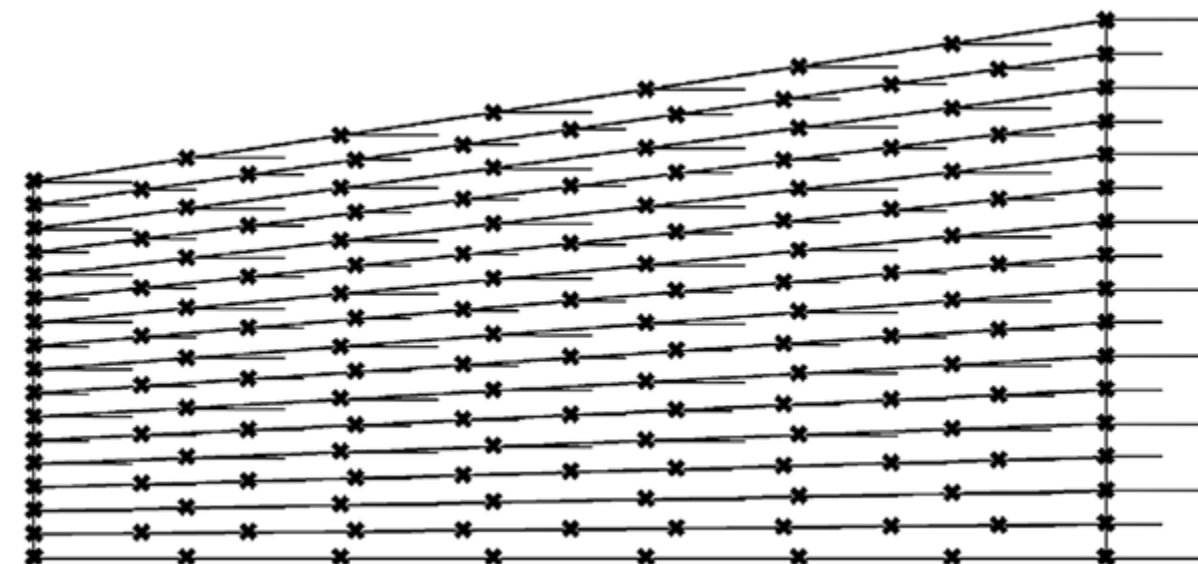
5.2 Parametrizace vzorů pomocí Grasshopperu

Proběhly zkoušky s parametrizací vzorů, které ale nebyly dostatečně vhodné pro tvorbu finálních vzorů. Vzory jsou poměrně komplikované a pravděpodobně bude nutné vymyslet pro ně vlastní skript. Ty současné jsou pouze pomocí různých tutoriálů. První uvedený příklad vzoru byl zkoušen na jednom fyzickém modelu, ale kvůli tomu, že prořezané otvory nelze natáhnout, práce s ním nebyla dále rozvíjena.



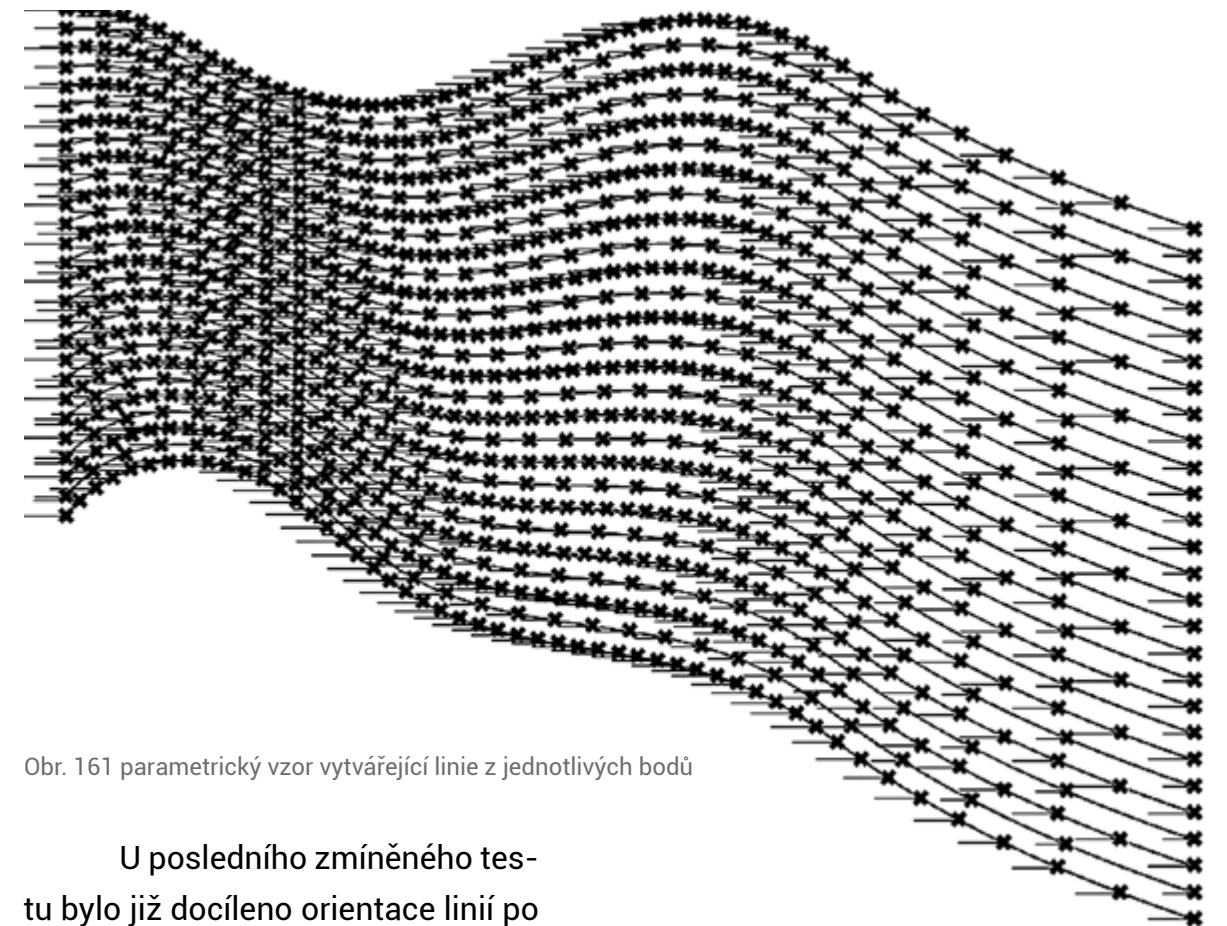
Obr. 159 2d vzor pracující s proměnou velikostí jednotlivých prořezů

Další testovaný skript tvoří linie pomocí bodů, které jsou rozděleny do dvou skupin. Dá se nastavit jednotlivá délka linek, ale jejich směr je vždy stejný.



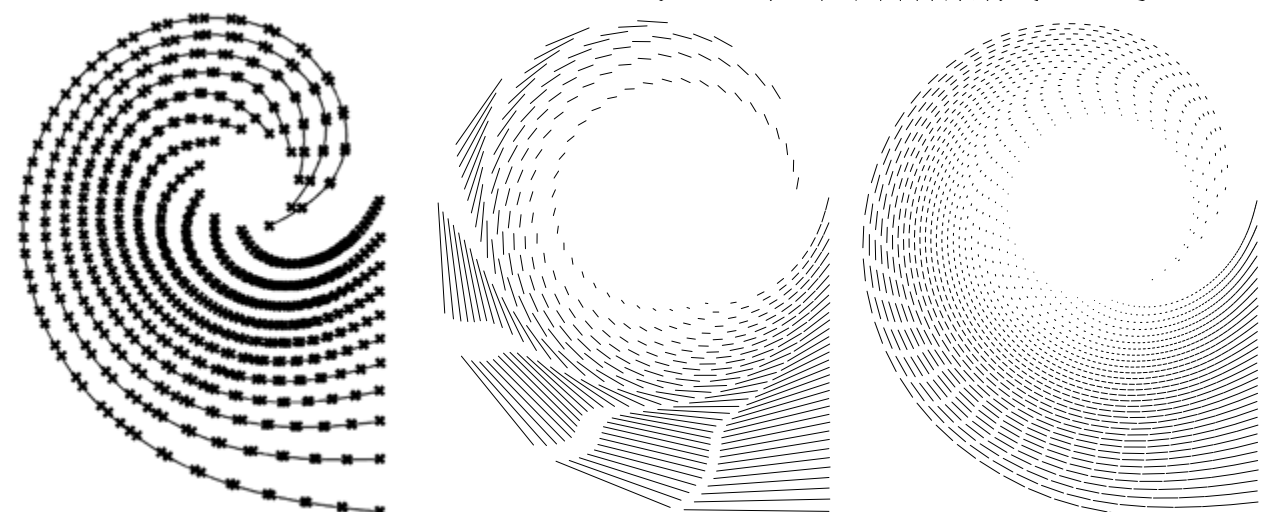
Obr. 160 parametrický vzor vytvářející linie z jednotlivých bodů

Vzor reaguje na hustotu jednotlivých bodů, ze kterých jsou linie tvořeny, a zakřivení vzoru, ale stále jsou orientované pouze jedním směrem.



Obr. 161 parametrický vzor vytvářející linie z jednotlivých bodů

U posledního zmíněného testu bylo již docíleno orientace linií po směru zakřivení. Problém nastával, že směrem ke středu vzor příliš ztrácí svou hustotu. Tento skript není tedy také použitelný pro tvorbu vzorů a dále ve výzkumu nebylo pokračováno a výsledné vzory jsou digitálně rýsovány.



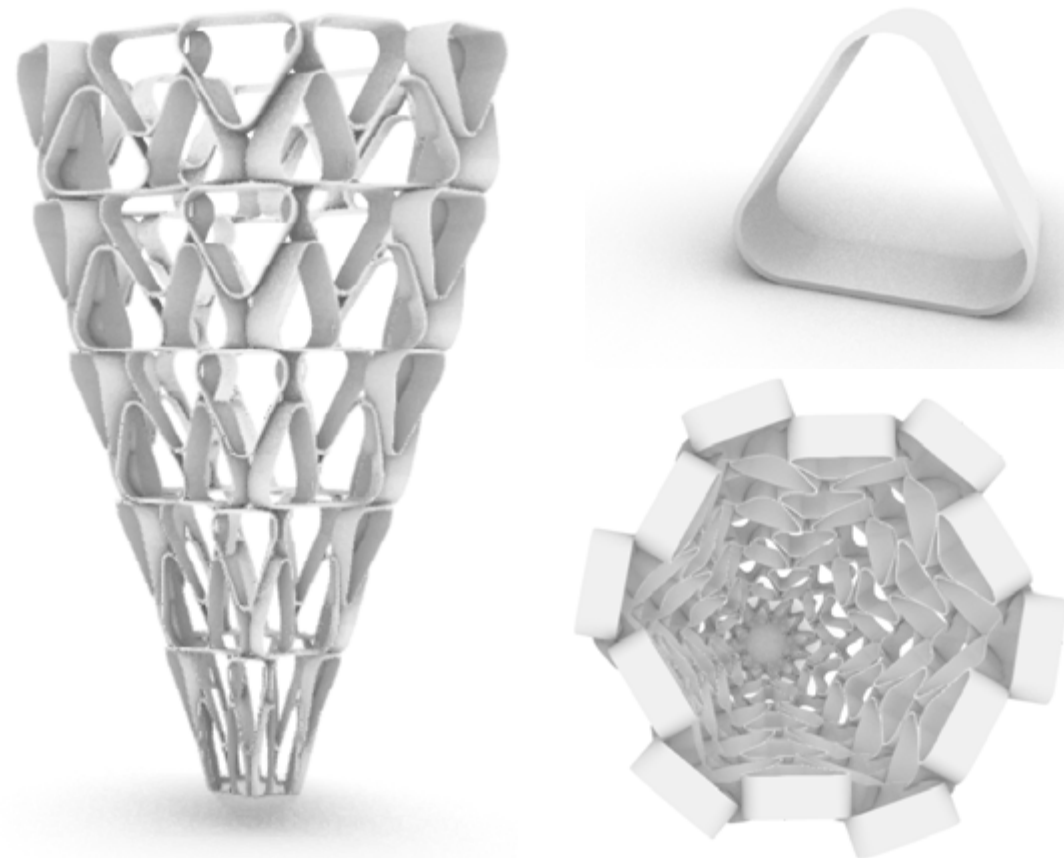
Obr. 162- 165 parametrické vzory reagující na zakřivení

5.3 Nové digitální prototypy

Na základě ponaučení z prvního prototypu bylo vytvořeno několik variant, jak by bylo možné metodou prořezávání vytvořit nový a lepší prototyp sloupu, který by nepotřeboval konstrukci, na kterou by byly panely uchyceny.

5.3.1 Trojúhelníkové skládání

Návrh vychází z dvou pavilonů, které jsou uvedeny v akademických projektech v kapitole 3.3.6. Jenže je to až moc jednoduchá cesta a pouhé zopakování něčeho, co jsme již viděli a co známe. Bylo tedy nutné přijít s jiným novým způsobem, který ještě není vymyšlen a nikým otestován.



Obr. 166-168 digitální model sloupu složeného z trojúhelníkových komponentů

5.3.2 Geometrické vrstvení, jeho princip a výhody

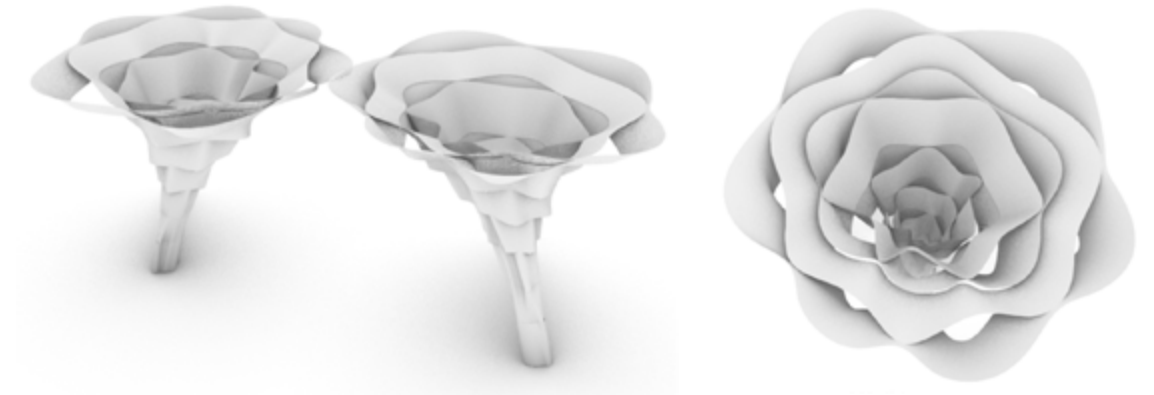
Pro tvorbu nových digitálních prototypů byla čerpána inspirace z hlávkových salátů, zelí nebo kapust. Tyto druhy zeleniny mají společné to, jak mají poskládané jednotlivé listy, které jsou přes sebe. Jednotlivé vrstvy jsou zvlněné a tím vyztužují a zpěvňují celou hlávku. Podobný princip by mohl možná být využit pro tvorbu nového prototypu sloupu. První zkoušené digitální modely jsou velmi nepravidelné, stejně jako hlávková zelenina. Postupně se hledá nejvhodnější tvarování pro fyzický prototyp.



Obr. 169-170 foto ledového salátu (vlevo) a čínského zelí (vpravo)



Obr. 171-173 princip vrstvení - vnitřní vrstva má vždy menší obvod a vyztužuje vnější



Obr. 174-175 první organické digitální prototypy

Podobný princip vrstvení využívají v projektu 3d tištěných betonových sloupů studenti z ETH Zürich (Spolková vysoká technická škola v Curychu). Byly prezentovány letos v dubnu na kulturním festivalu ve Švýcarsku.



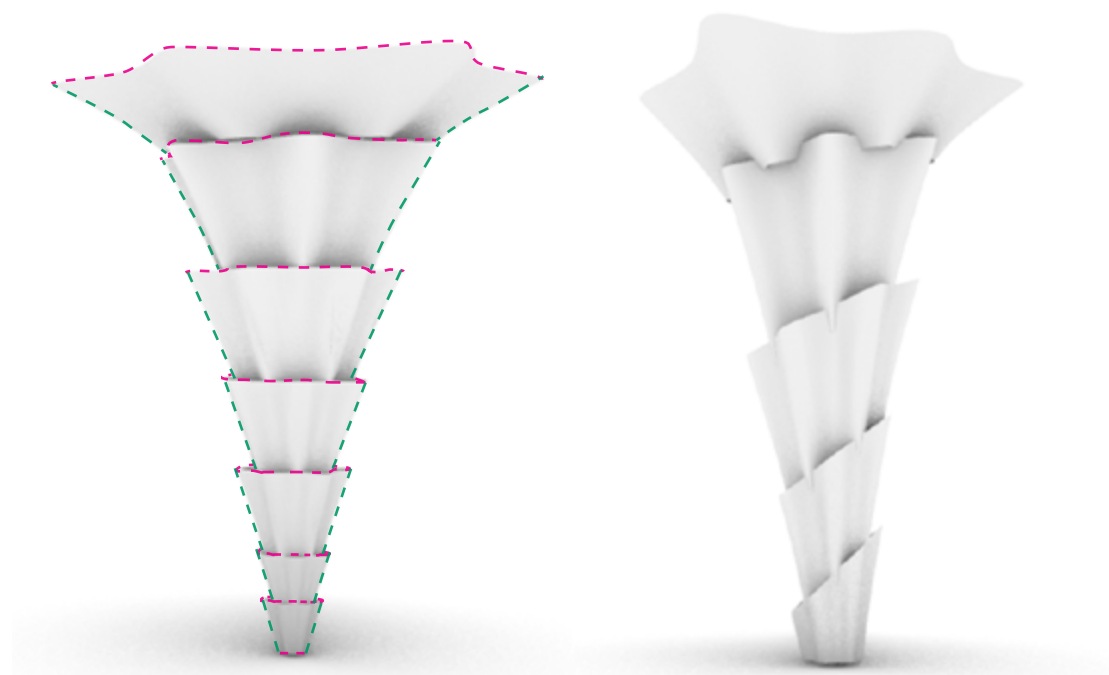
Obr. 176 prototypy 3d tištěných betonových sloupů



Obr. 177 proces 3d tisku betonu

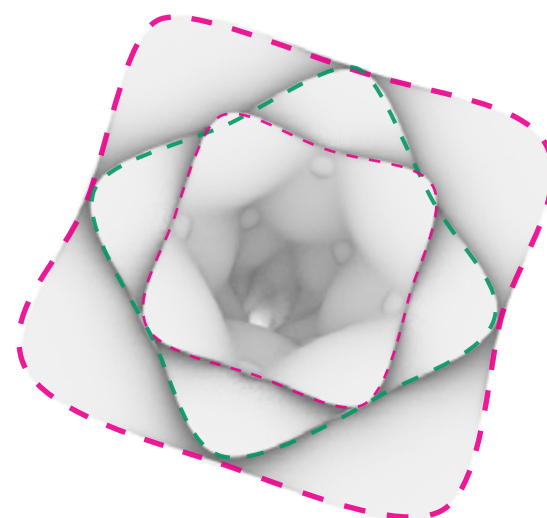
5.3.3 Možné varianty

Inspirace v přírodě byla pro tvorbu sloupu čerpána z palmy a jejího kmene. Zároveň ale i u vrstvení hlávkových listů. Jednotlivá patra sloupu jsou do sebe zasekaná, protože metoda prořezání nám umožňuje na sebe jednotlivé kusy nasadit. Nevýhodou je, že tím oslabíme materiál a hrozí jeho zlomení v namáhaných částech. Z toho důvodu bylo od tohoto prototypu upuštěno a byly modelovány další.

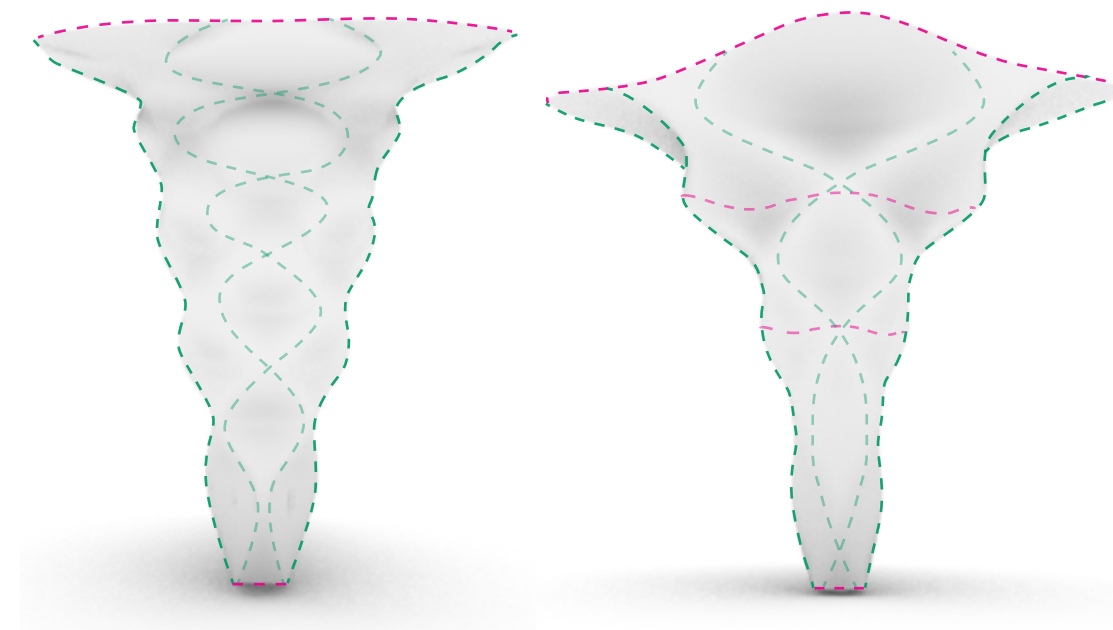


Obr. 178-180 digitální prototyp modelu inspirovaném v kmenu palmy

Další verze digitálního prototypu se vlní v horizontálním i vertikálním směru a vnitřní vrstvy by byly vždycky otočené o 45° a vzájemně by se zpevňovaly. Vzory pro prořezání tohoto prototypu by ale musely být tvořené parametricky. Byly by totiž příliš komplikované pro digitální 2D rýsování. Hledání vhodného prototypu pokračovalo dále.

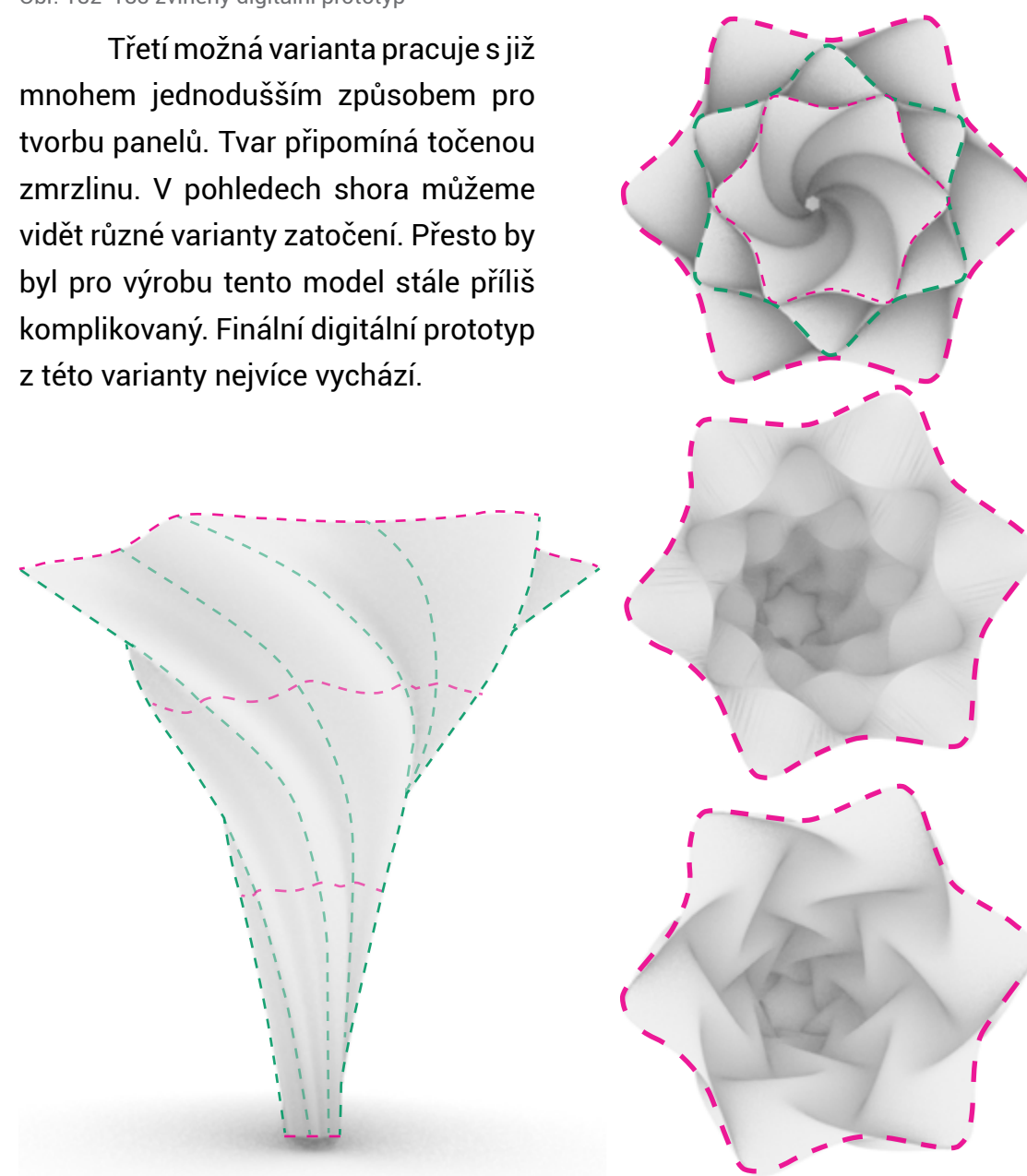


Obr. 181 zvlněný digitální prototyp



Obr. 182-183 zvlněný digitální prototyp

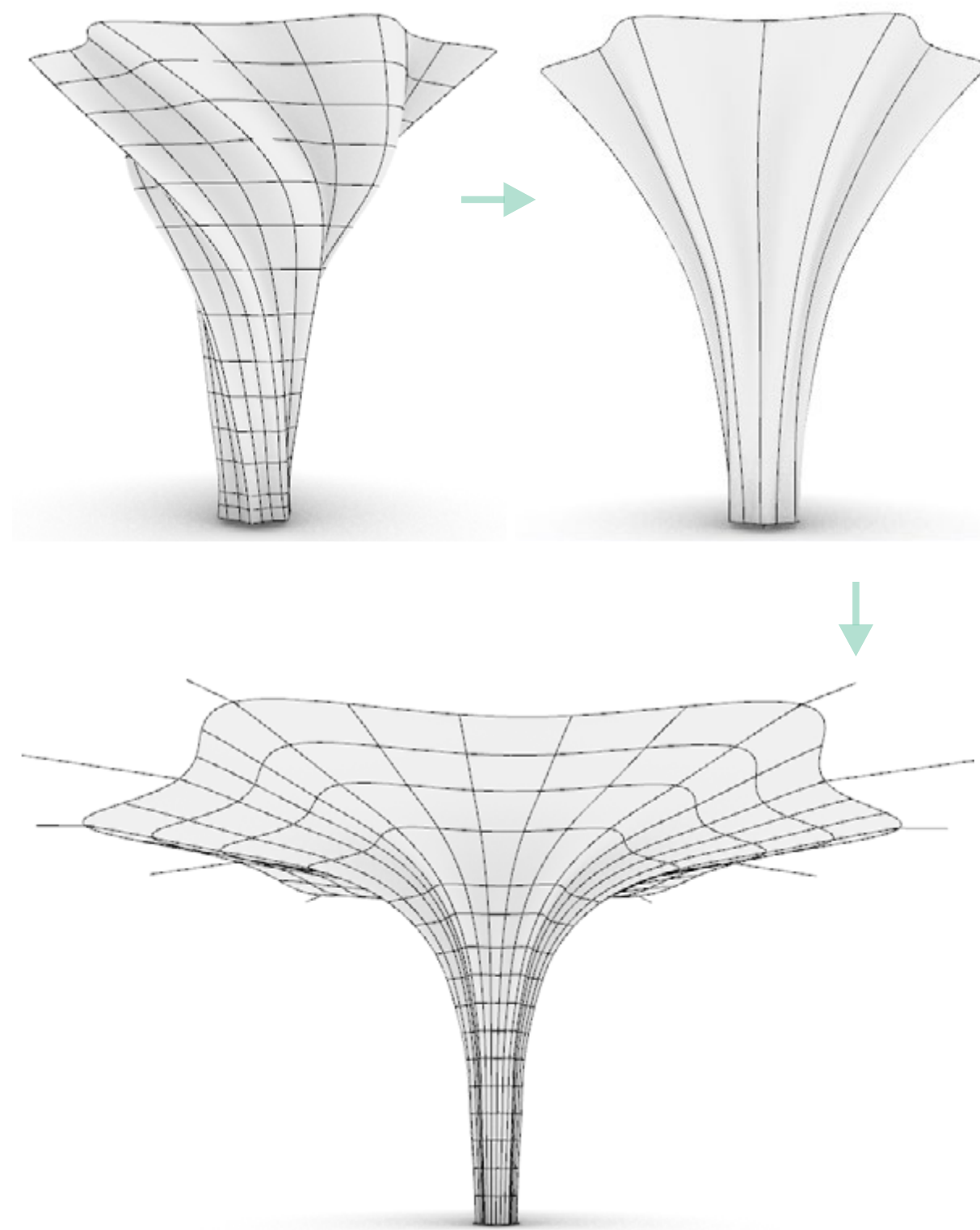
Třetí možná varianta pracuje s již mnohem jednodušším způsobem pro tvorbu panelů. Tvar připomíná točenou zmrzlinu. V pohledech shora můžeme vidět různé varianty zatočení. Přesto by byl pro výrobu tento model stále příliš komplikovaný. Finální digitální prototyp z této varianty nejvíce vychází.



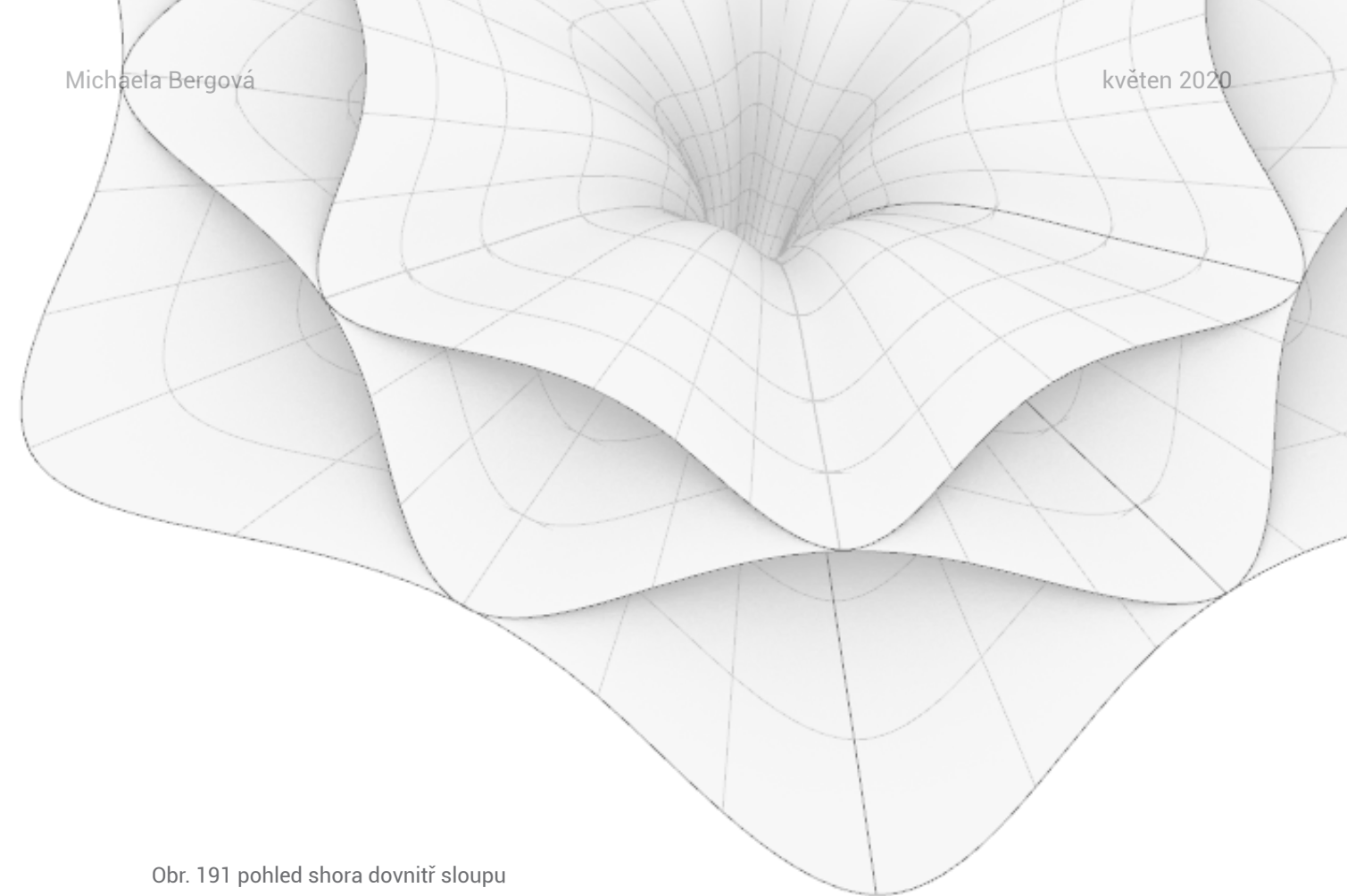
Obr. 184-187 prototyp zmrzlinového modelu, pohled z boku (vlevo), pohledy shora (vpravo)

5.4 Finální varianta a její vývoj

Tvar vychází z modelu připomínající točenou zmrzlinu. Došlo k narovnání zatočení pro zjednodušení tvaru. Díky tomu je možné vytvořit poměrně jednoduché vzory pro ohyb panelů. Také bude mnohem jednodušší řešení jejich napojování. Tento tvar byl digitálně upraven, aby měl sloup viditelné navázání do roviny stropu a byly mu dány elegantnější proporce.



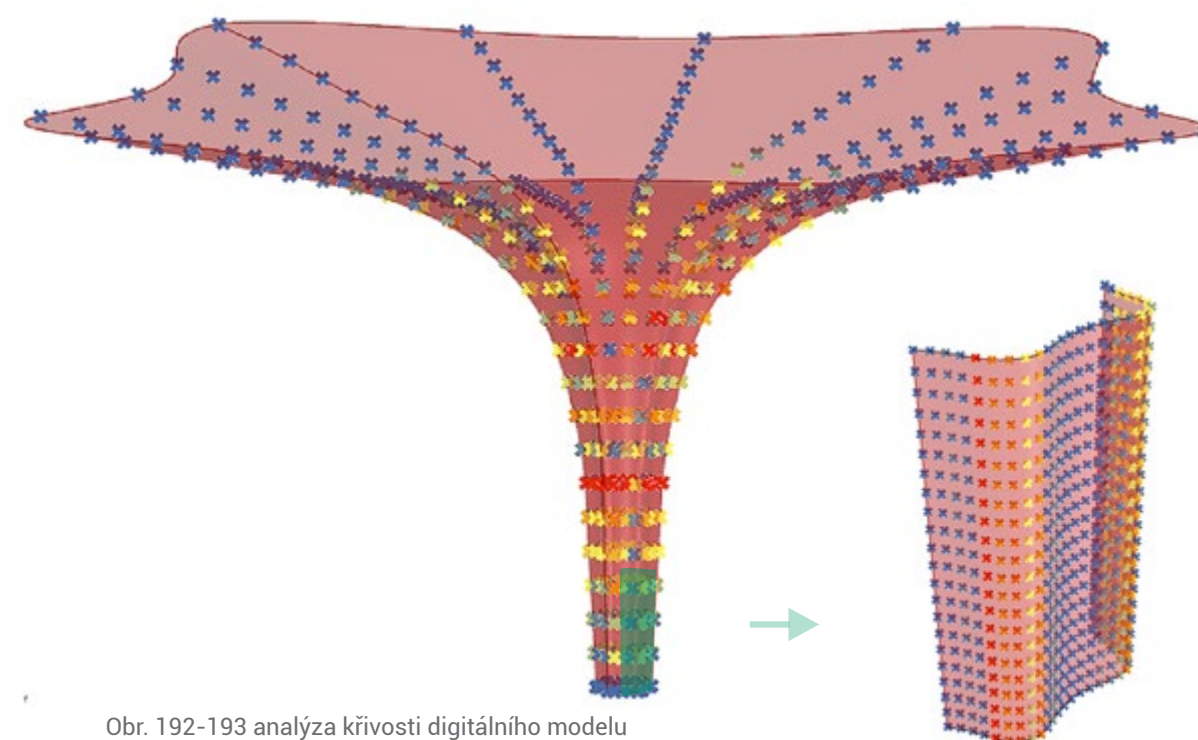
Obr. 188-190 vývoj finálního návrhu sloupu



Obr. 191 pohled shora dovnitř sloupu

5.4.1 Analýza křivosti tvaru

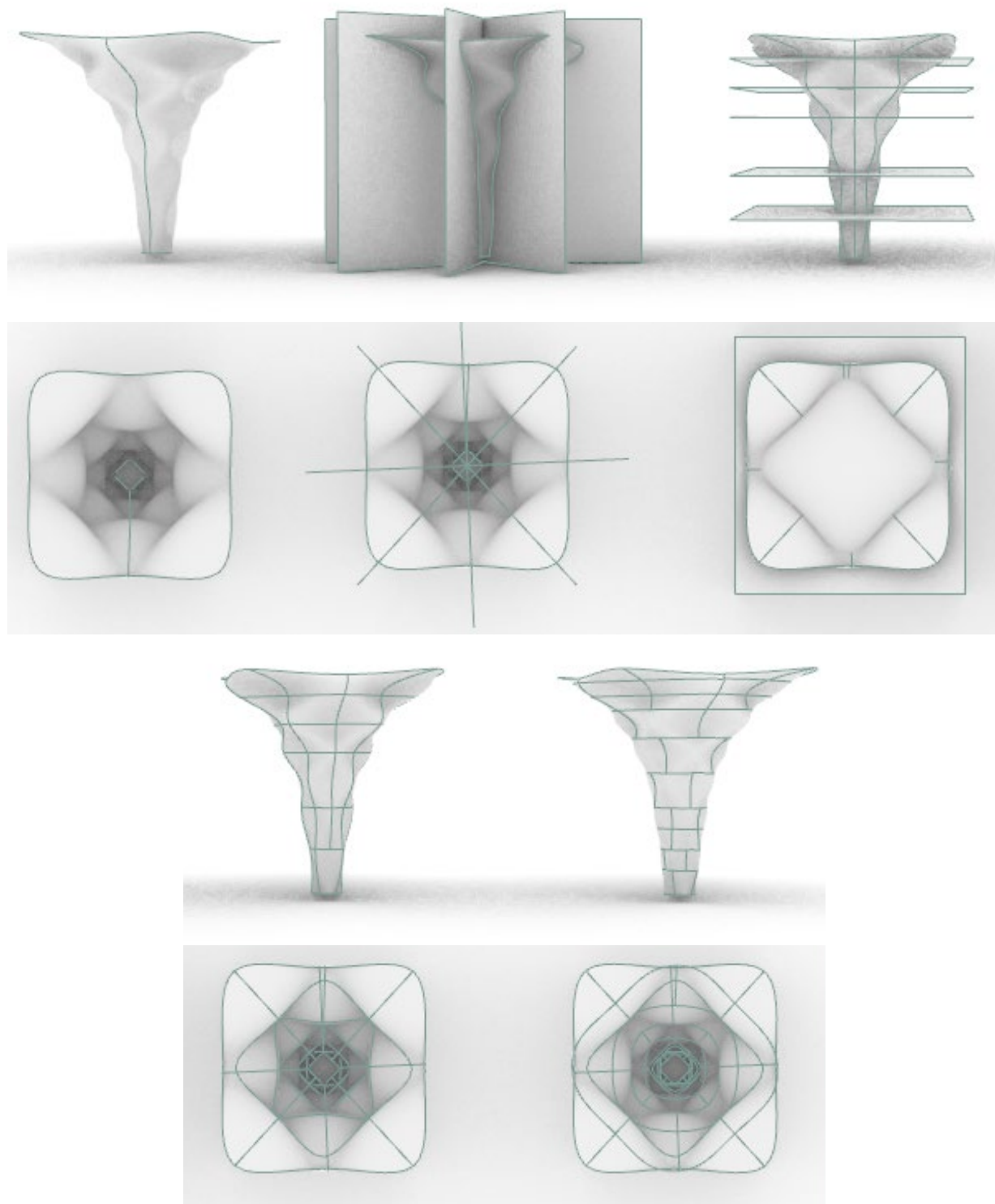
Byla provedena analýza křivosti celého tvaru pomocí Grasshopperu. Je poté důležité si každý panel, ze kterého se bude sloup skládat analyzovat samostatně a dle toho poté tvořit vzor pro prořezání. Analýza určí místa, ve kterých jsou plochy nejvíce namáhané. Je možné si nastavit hustotu bodů ve směru U i V a také je možné měnit barevnou škálu určující hodnoty namáhání.



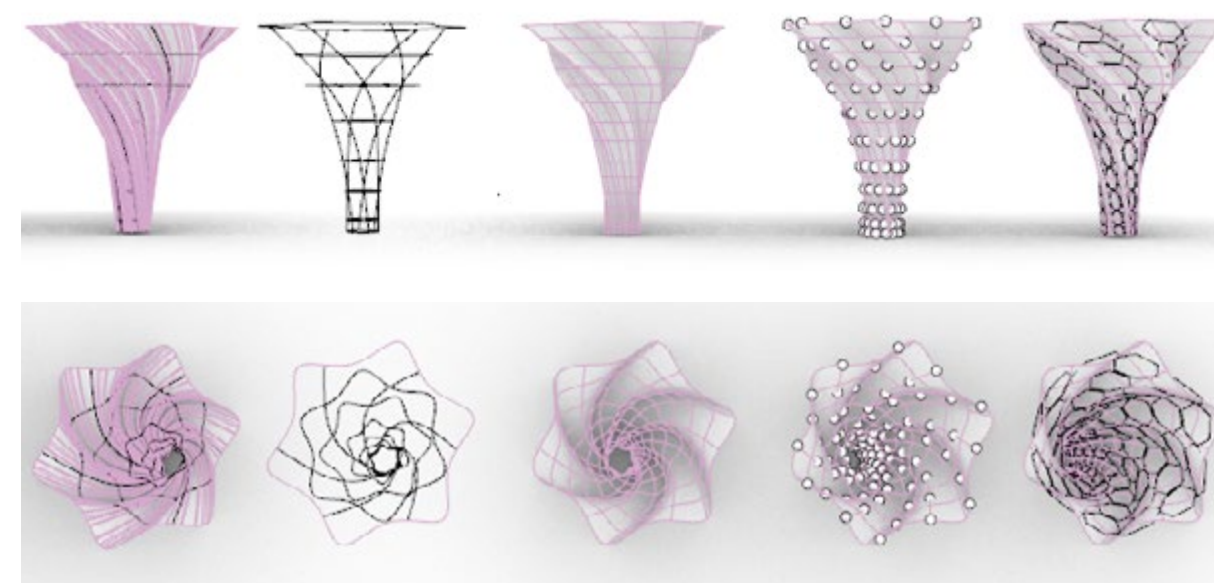
Obr. 192-193 analýza křivosti digitálního modelu

5.4.2 Možné způsoby panelizace

Z důvodu omezené možnosti výroby rozměrově velkých prořezaných panelů je nutné digitální prototypy dělit. Byla provedena analýza nejvhodnějšího způsobu dělení. První nejjednodušší možností je dělení horizontální a vertikální, ale u složitějších konstrukcí bychom mohli mít problém s jednotlivými plochami, které by byly příliš komplikované. Je tedy nutné nejdříve celý prototyp rekonstruovat pomocí iso křivek a znovu vytvořit 3d sloup z jejich sítě a tu poté dělit v horizontálním a vertikálním směru.



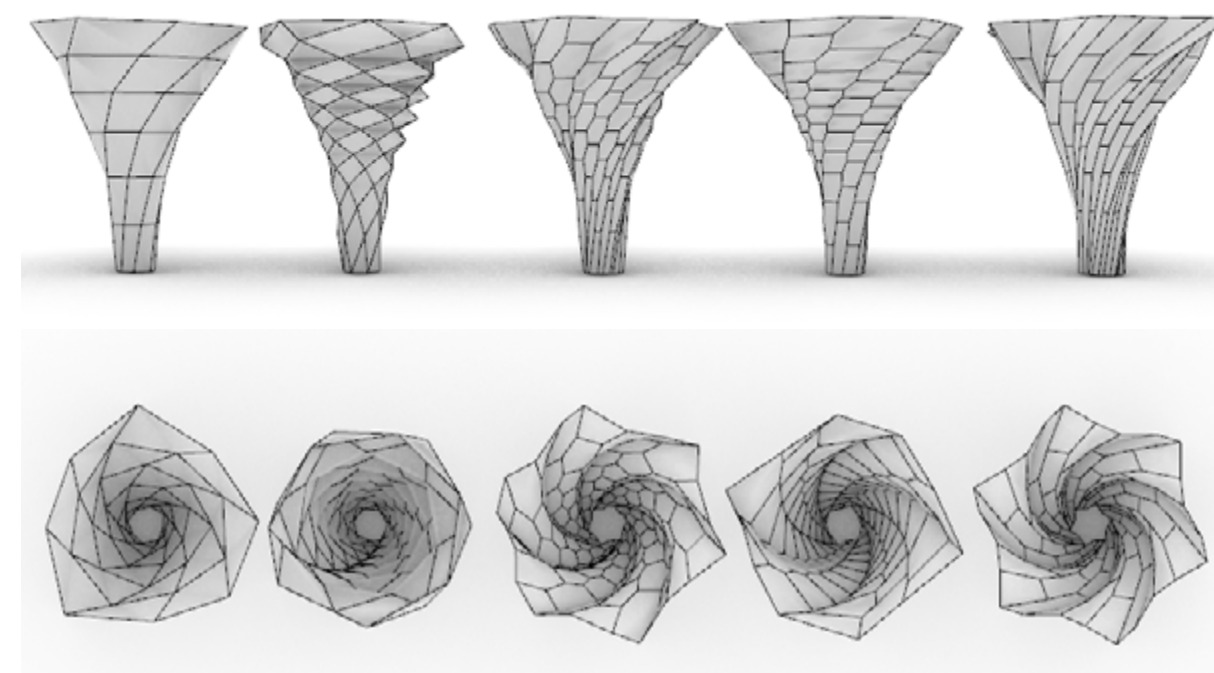
Obr. 194-195 dělení plochami horizontálně a vertikálně



Obr. 196 dělení pomocí iso křivek a možnost dělení na hexagony

Rekonstruovanou plochu můžeme rozdělit v bodech a poté jí pomocí pluginu do Rhina s názvem Paneling Tools rozdělit například na hexagony. Tento postup nám ale deformuje původní tvar

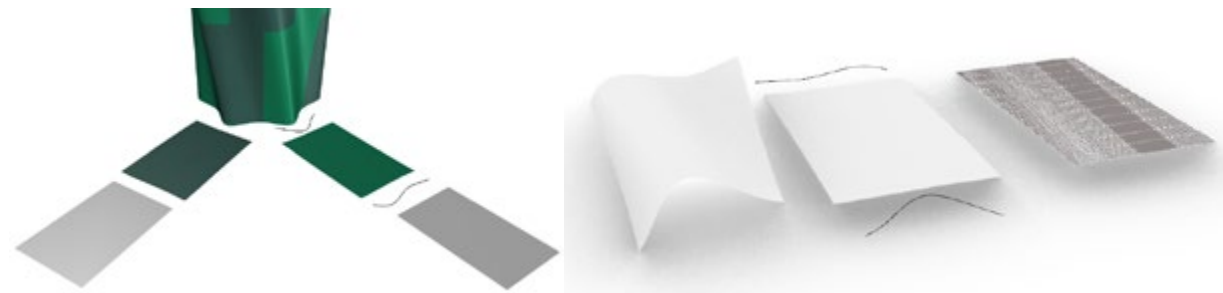
Další možností by mohlo být parametrické dělení pomocí grasshopperového pluginu NGon, který nám plochy umí rozdělit na hexagony, pentagony apod. Pro tento typ prototypu sloupu, ale není parametrické dělení vhodné. Tvar se nám opět deformuje, protože neumí počítat s roztažností jednotlivých panelů, se kterými výsledný prototyp pracuje.



Obr. 197 parametrické dělení NGon pluginem

5.4.3 Tvorba vzorů panelů

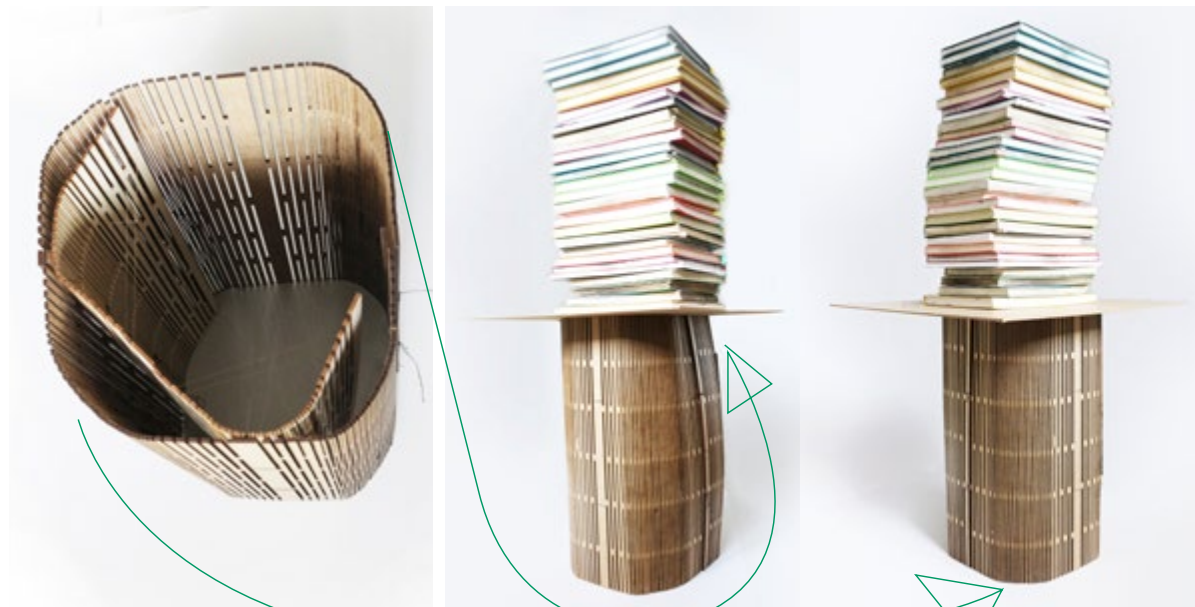
Z počátku bylo uvažováno s tvorbou fyzického prototypu ve tvaru točené zmrzliny, ale když byly začala práce na 2d vzorech pro tvarování materiálu, bylo od tohoto návrhu ustoupeno z důvodu jejich komplikovanosti v napojování jednotlivých panelů.



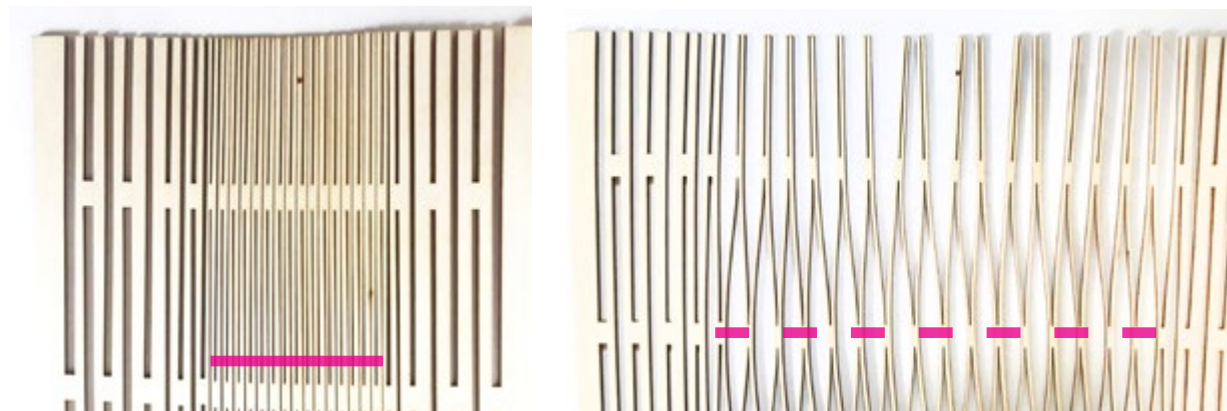
Obr. 198-199 první ukázka tvorby vzorů pro panely

První fyzický test nového prototypu - zátěžový test cca 25 kg

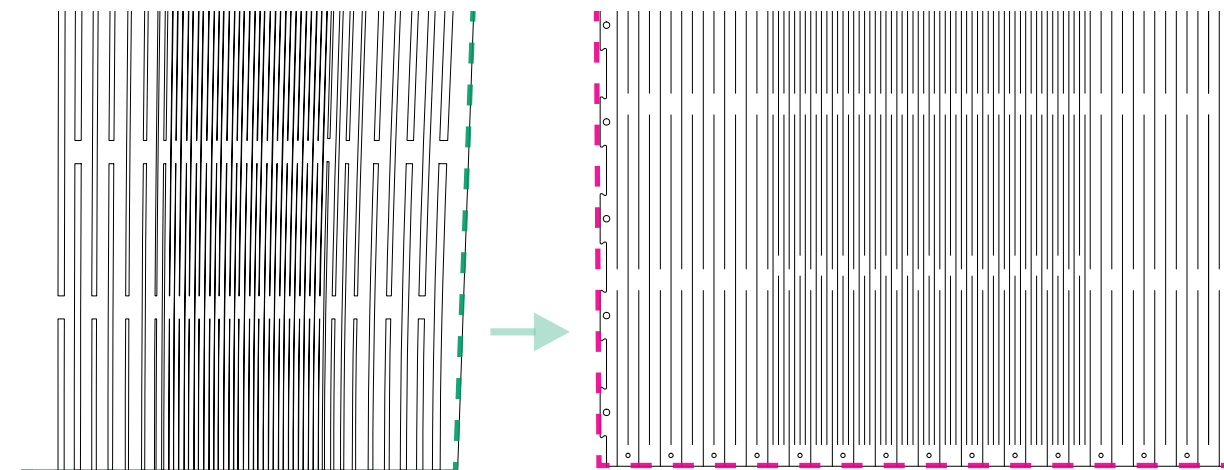
- Jedna vrstva opravdu nefunguje
- Překližka je mnohem únosnější nežli sololit
- ČASOVÁ NÁROČNOST VÝROBY -> zjednodušit vzor pouze čáry
- V místě ohybu lze menší hustotu vzoru
- Spojování panelů v jednotlivých patrech rybinovým spojem a lepením



Obr. 200-202 fyzický test zátěže, materiál 3,3 mm sololit a 3 mm překližka, rozměry modelu 48x28x28

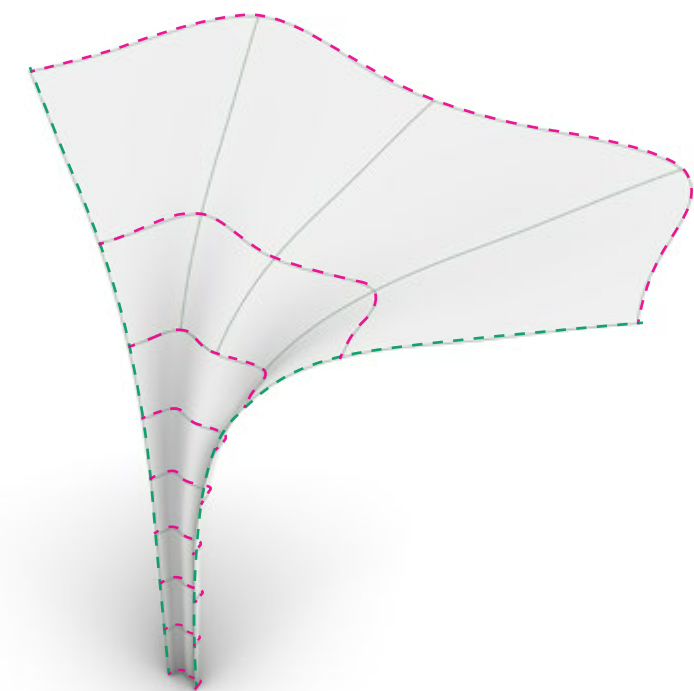


Obr. 203-204 ukázka roztažnosti 3 mm překližky po prořezání jednoduchým čárovým vzorem

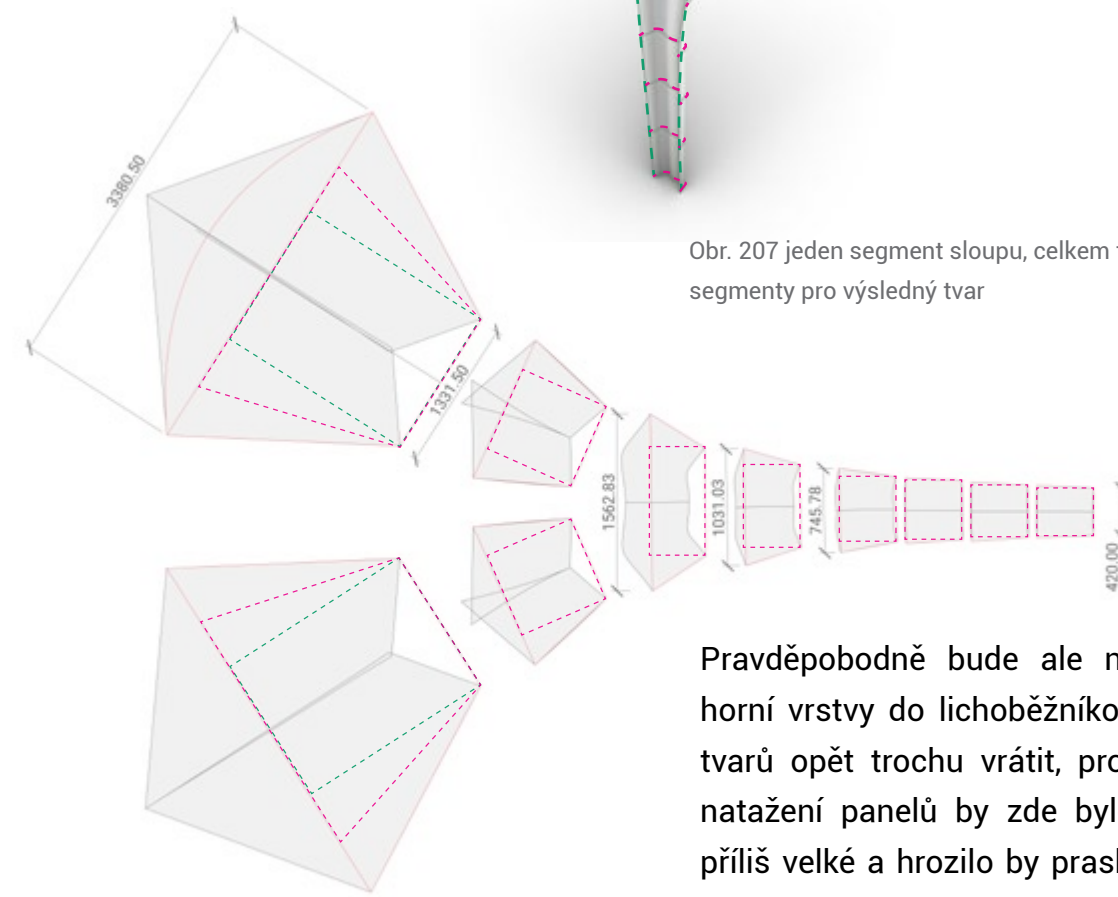


Obr. 205-206 vývoj tvorby vzorů

Velikost panelů byla z lichoběžníkových tvarů upravena na obdélníkové, jelikož díky roztažnosti po prořezání můžeme materiál natáhnout a potřebného lichoběžníkového tvaru dosáhnout tímto. Podaří se nám ušetřit množství materiálu a je dosaženo využití potenciálu metody ohybu prořezáním.



Obr. 207 jeden segment sloupu, celkem tři tyto segmenty pro výsledný tvar

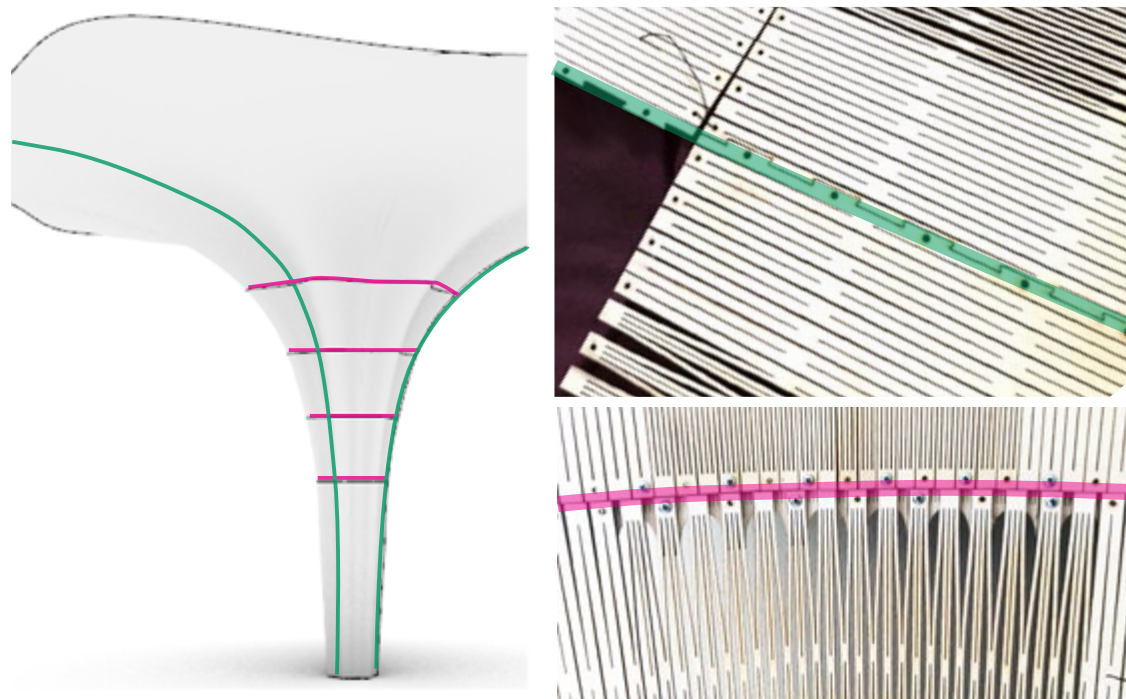


Obr. 208 rozbalené jednotlivé plochy segmentu

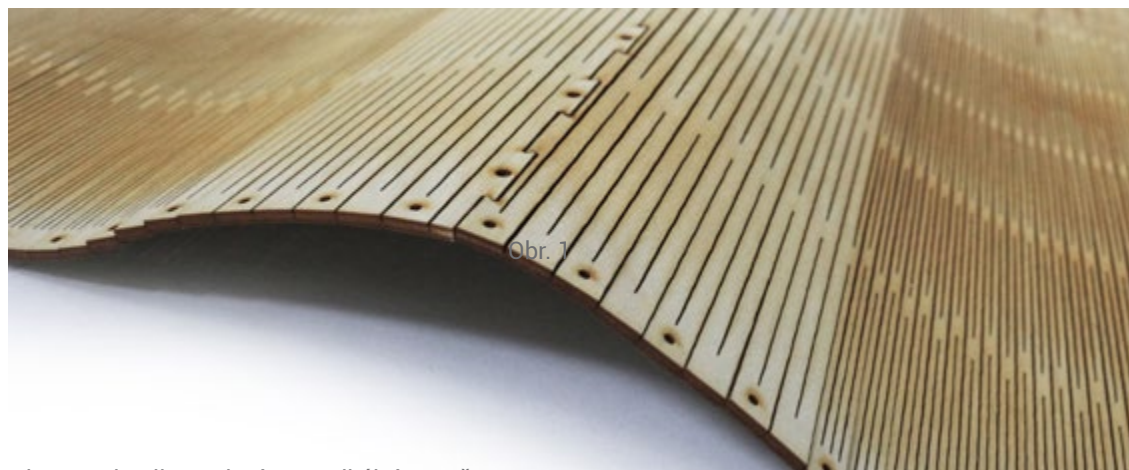
Pravděpodobně bude ale nutné horní vrstvy do lichoběžníkových tvarů opět trochu vrátit, protože natažení panelů by zde bylo až příliš velké a hrozilo by prasknutí materiálu.

5.4.4 Napojování panelů

Napojení ve vertikálním směru rybinovým spojem je velmi efektivní a spoj je dostatečně pevný. Je možné použít lepidla pro pevné vytvrzení spoje. V horizontálním směru je napojení vyřešeno páskem z vnitřní strany a prošroubováním skrz.



Obr. 209-211 znázornění principu spojování



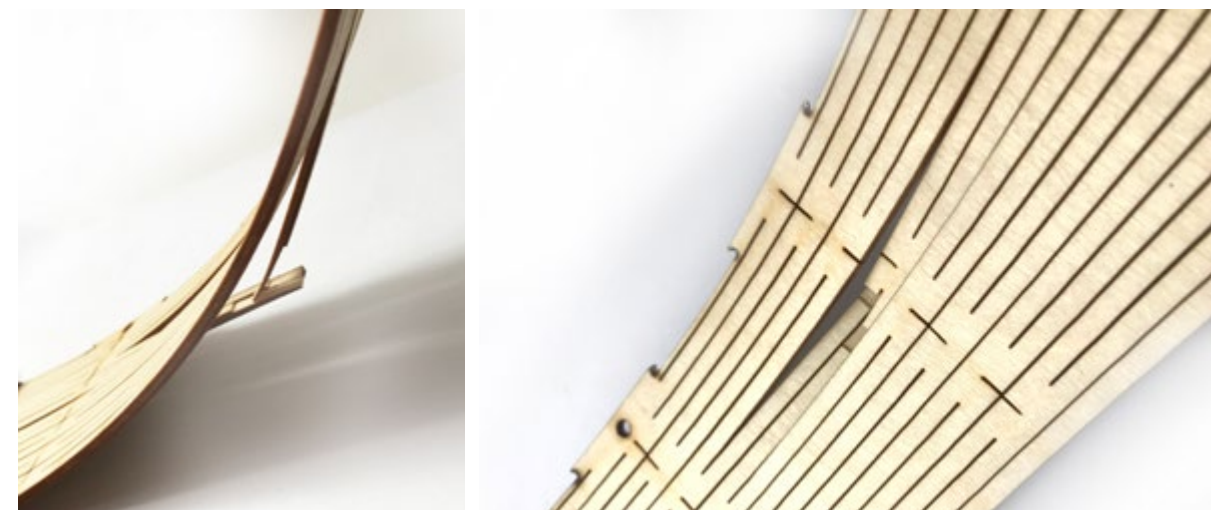
Obr. 212 detail napojení ve vertikálním směru



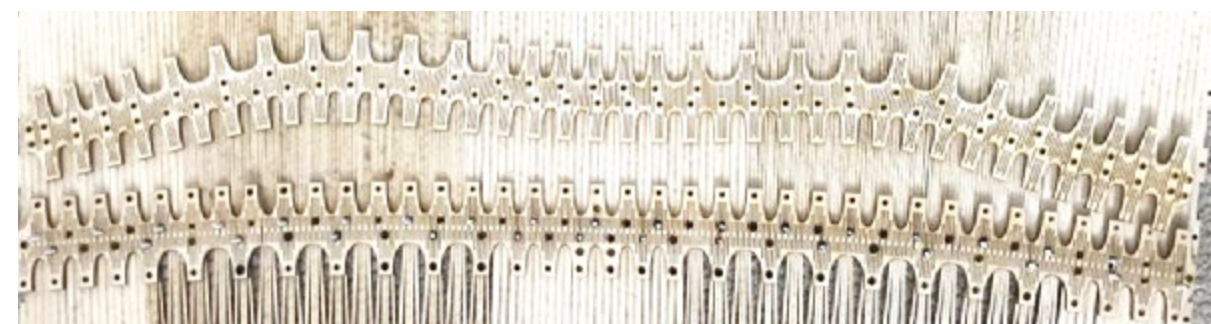
Obr. 213 pohled shora, zkouška větších kusů jednotlivých rybinových spojů a křížení ve vzoru

Spojení ve vertikálním směru je pomocí rybinového spoje, který bude zaxifován vhodným lepidlem a poté sešroubován s vnitřní vrstvou. Bylo vyzkoušeno přidání křížení v kolmém směru. Jelikož má ale překližka vlákna orientována v jednom směru, test praskl a není vhodné vzory tvořit tímto způsobem. Mnohem lépe funguje horní test, který má prořezání pouze čárové v jednom směru.

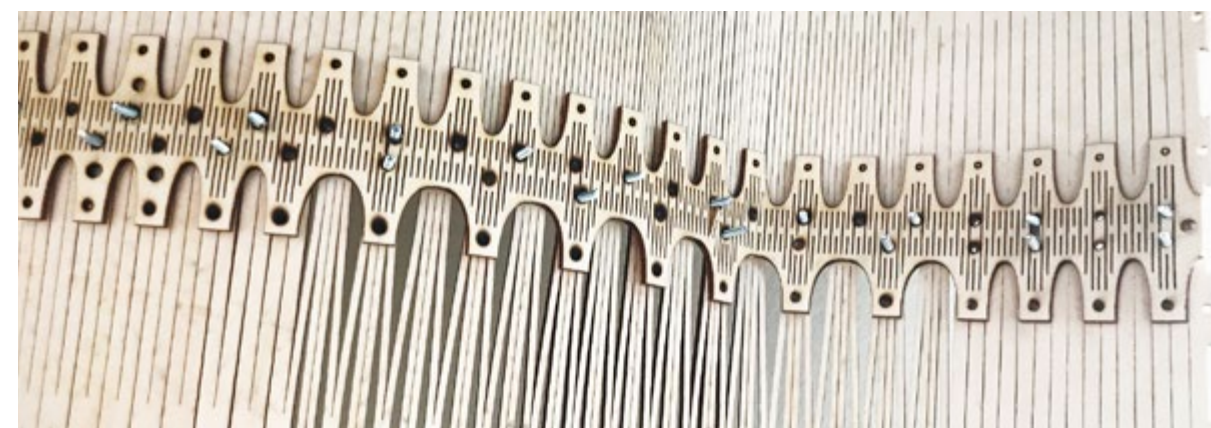
Pásek spojující jednotlivá patra sloupu v horizontálním směru by měl být z rozbaleného 3d tvaru podle zakřivení sloupu. Pokud by byl pouze rovný hrozí, že se panely nebudou správně tvarovat. Pásek je poměrně křehký a možná by bylo vhodné ho vyrobit i z jiného materiálu, než je překližka.



Obr. 214-215 nepovedený test s použitím křížení



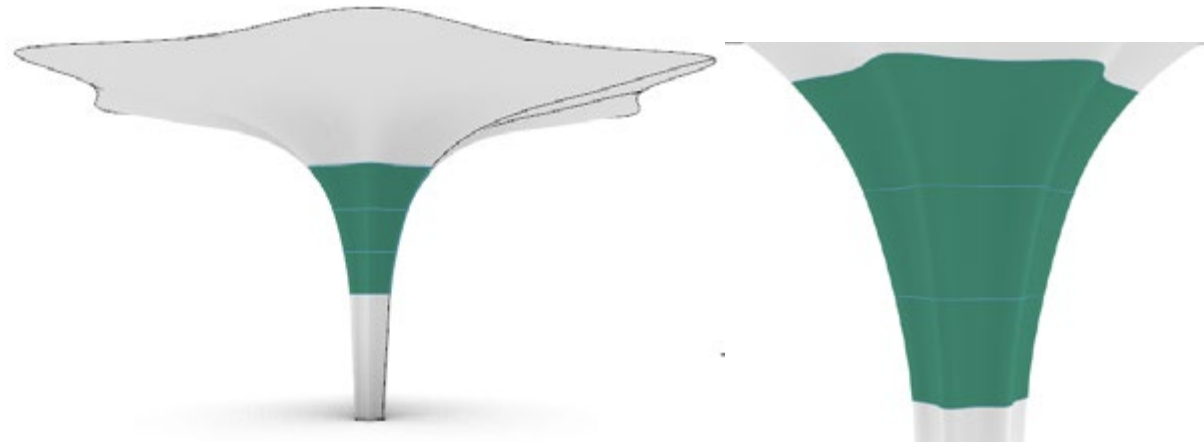
Obr. 216 horizontální spojující pásy z rozbaleného 3d tvaru (nahore) a z rovného pruhu (dole)



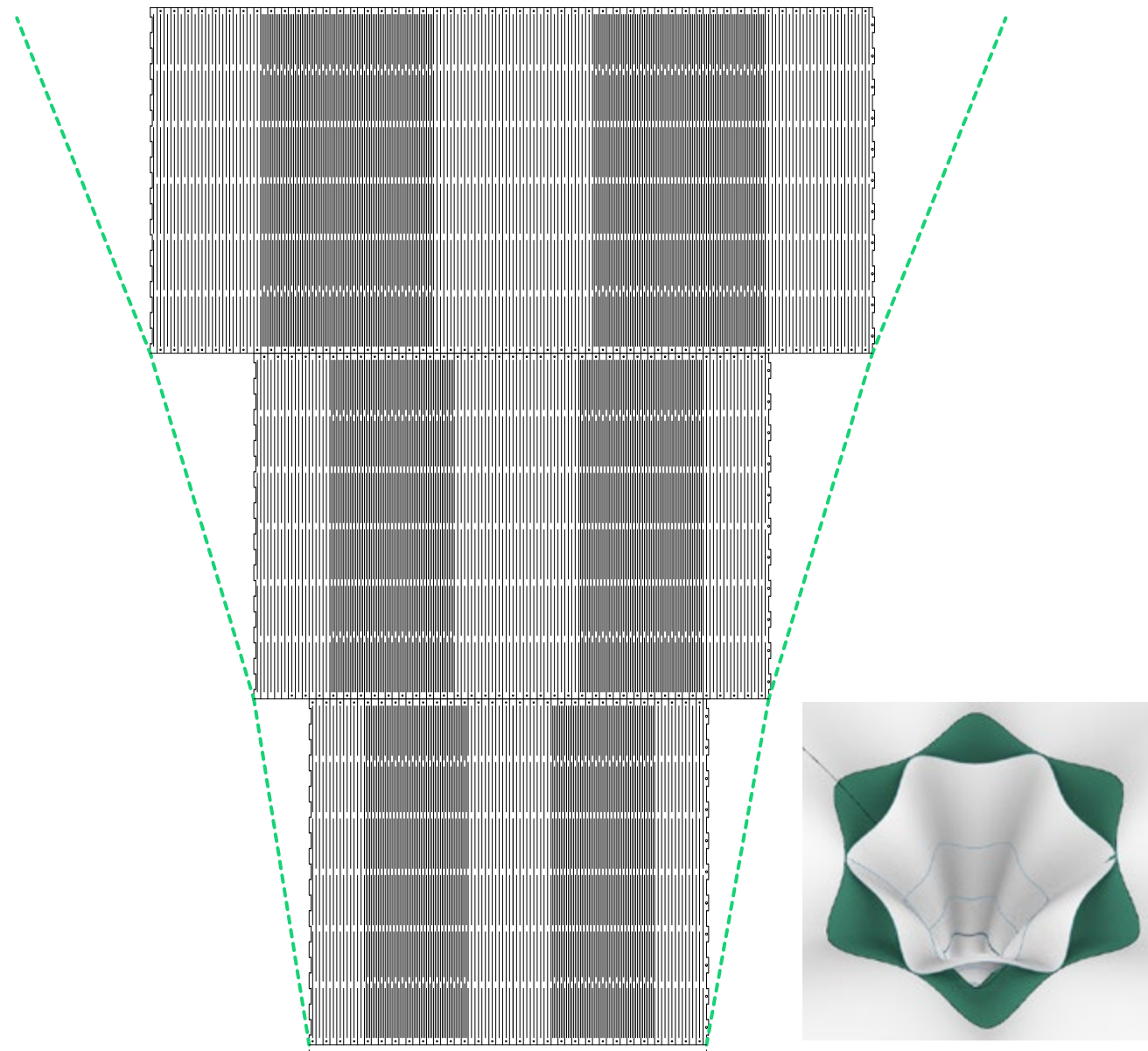
Obr. 217 detail spojujícího pásu

5.4.5 Technická výkresová dokumentace

Pro fyzický prototyp byla vybrána střední část sloupu pro ukázkou principu napojování a tvarosloví. Kompletní výkresová dokumentace bude přiložena v přílohách této práce pro lepší zobrazení na větším formátě.

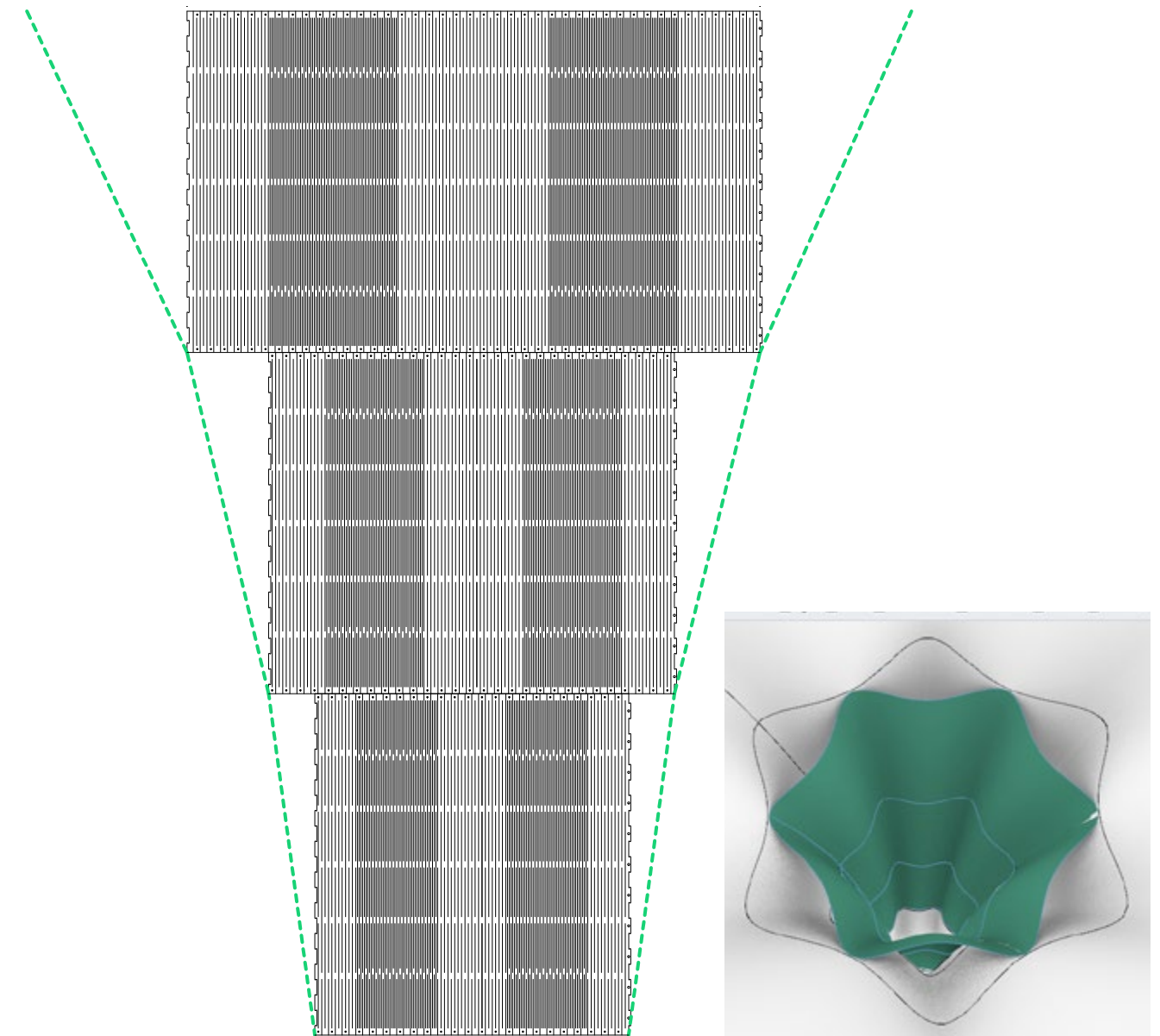


Obr. 218-219 vybraná část sloupu pro realizaci fyzického modelu



Obr. 220 linový vzor vnější vrstvy pro fyzický prototyp

Obr. 221 zvýrazněná vnější vrstva



Obr. 222 linový vzor vnitřní vrstvy pro fyzický prototyp

Obr. 223 zvýrazněná vnitřní vrstva

5.4.6 Časová náročnost provedení

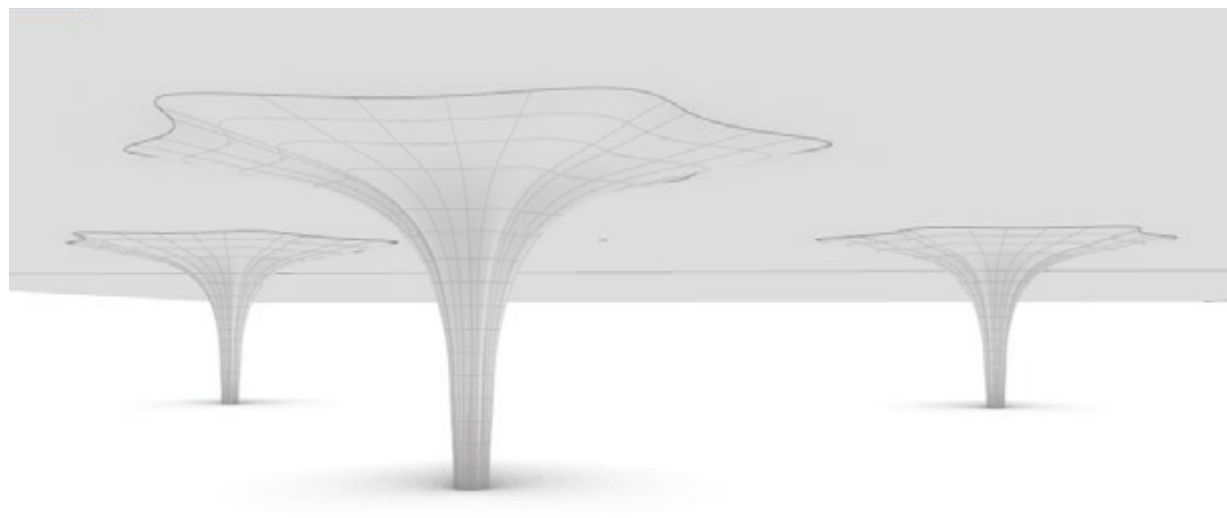
Na výrobu prvního prototypu je počítáno s tvorbou minimálně 18 kusů panelů plus jejich horizontálních spojovacích pásků. Pokud to bude možné, bude vytvořena ještě třetí vnější vrstva pro zajištění větší stability. Vyrobená bude také patka, ve které bude prototyp zafixován.

5.4.7 Užité prostředky k výrobě

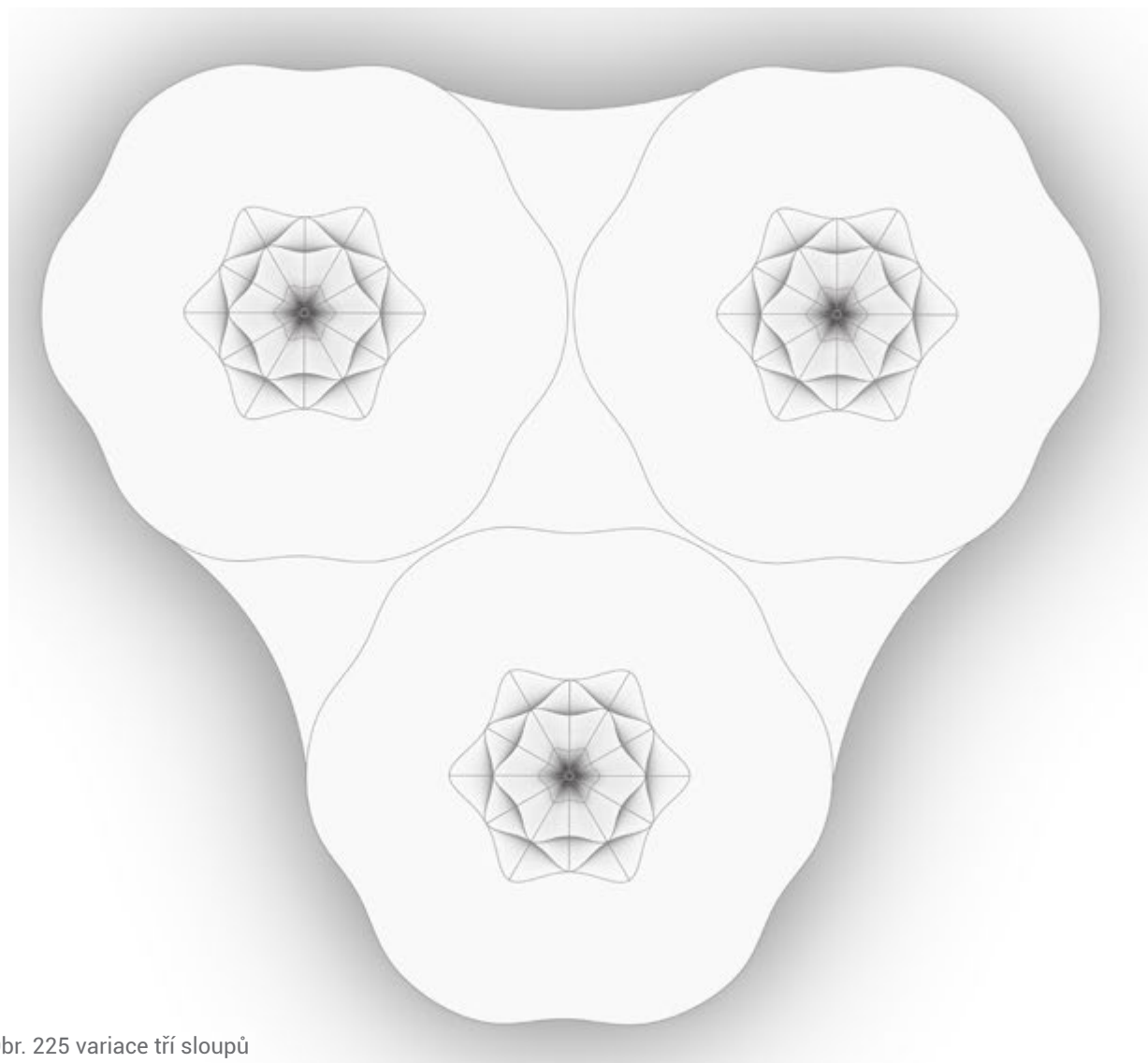
Pro digitální návrhy bylo vše zpracováno prostřednictvím programu Rhinoceros. Pro grafické práce bylo využito programů Adobe Photoshop, Illustrator a InDesign.

5.5 Variace hmotového uspořádání

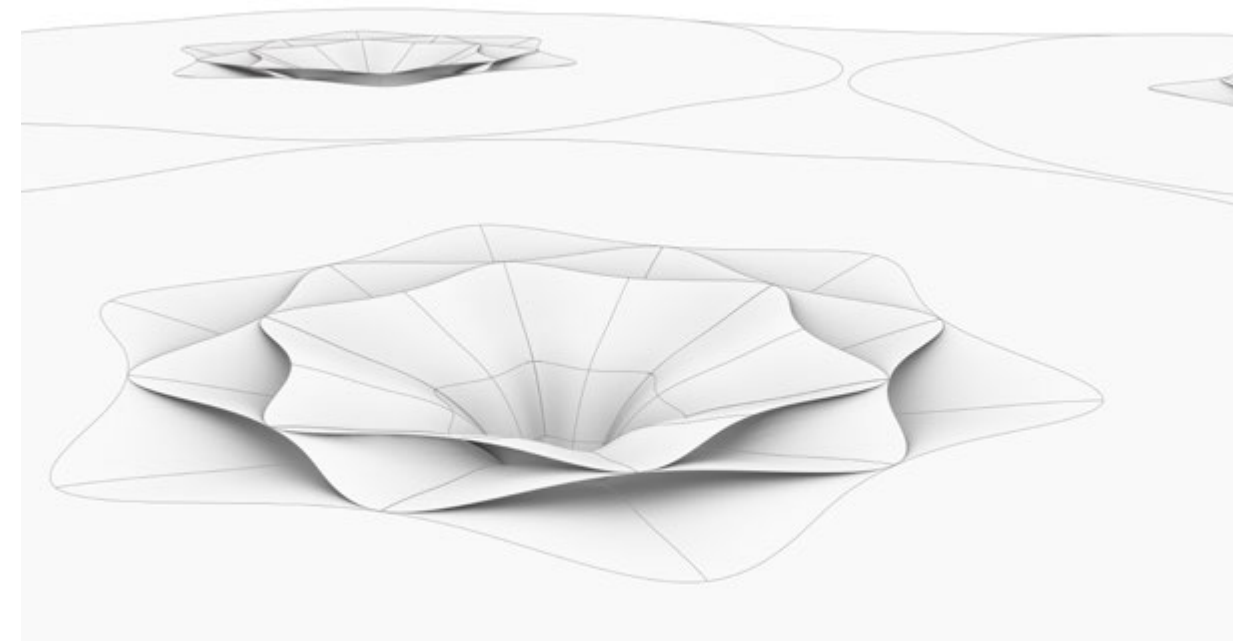
První příklady možných tvarových uspořádání.



Obr. 224 variace tří sloupů



Obr. 225 variace tří sloupů



Obr. 226 variace tří sloupů

6 Závěr

Během prvního semestru byl proveden výzkum a analýza metody prořezávání a na jeho konci vznikl první prototyp sloupu. První prototyp sloupu nepracoval vůbec s možným natažením materiálu a panely byly pouze krycí dekorační vrstvou nosné konstrukce. Prořezávaný vzor nereagoval na zakřivení jednotlivých ploch a nebyl kompletně využit potenciál tvarování deskových materiálů prořezáváním. Práce probíhala z počátku v tříčleném týmu.

U druhého prototypu sloupu bylo klíčové zjištění ověření statické součinnosti, tak aby nebylo nutné použití podpůrné konstrukce jako u prvního prototypu. Nutné bylo zajištění, aby prořezané vzory reagovaly nejen na tok sil a statickou funkci, ale zároveň aby důsledně pracovaly se zakřivením tvaru v jednotlivých částech sloupu.

Podařilo se dosáhnout návaznosti jednotlivých panelů bez potřeby další podpůrné konstrukce. Panely jsou horizontálně spojeny pomocí prořezaných překližkových pásků. Ve vertikálním směru je spojení zajištěno rybinovým spojením a lepením. Díky vrstvení se podařilo dosáhnout samonostnosti, ale i určitě statické pevnosti a na sloup je možné dále navázat.

7 Výhled do budoucna

I když prezentovaný výsledný prototyp sloupu mnohem lépe integruje statickou funkci než-li předchozí prototyp, tak celkový proces tvorby návrhů a výsledných výkresů by mohl být efektivnější, pokud by byly modely tvořeny v plně parametrickém prostředí. Modelování by umožnilo rychlejší a efektivnější navrhování a následnou výrobu. Bude žádoucí vymyslet skript, který by reagoval na zakřivení plochy a dle ní určoval hustotu prořezání. Přestože některé zkoušky o parametrizaci vzorů proběhly, nebyli příliš použitelní pro další rozvoj. Vše je momentálně rýsováno 2d pro každý panel samostatně, což by bylo u větších prototypů velmi časově náročné.

Pro další fázi projektu stojí za prostudování alternativním metod napojování jednotlivých panelů. Za zmínku stojí i otestování možnosti zpevnění překližky například pryskyřicí a vytvořit kompozitní materiál, který by byl velmi pevný a tvořil by tenkou skořepinovou konstrukci. Vzhledově by tato varianta mohla být velmi zajímavá a efektivní z hlediska menšího použití materiálu. Ohýbání dřeva prořezáváním má velký potenciál pro navrhování tenkých skořepinových struktur, protože jsme schopni docílit tvarově zajímavých vrstvených skořepinových forem.

Práce neměla za cíl konkurovat dnešním nejutilitárnějším způsobům tvorby sloupů, ale nabízí nový pohled na dnešní estetiku digitálního navrhování. Klíčová je spolupráce s dalšími profesemi pro plné využití potenciálu metody ohybu prořezáváním.

8 Seznam použité literatury a zdrojů

1 GUTOWSKI, Sarah Margaret. The bright side of failure: developing a set of lamps from an unsuccessful chair, Master thessis [online]. University of Iowa, 2017. Dostupné z: <https://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=6967&context=etd>

2 MACKEY, Chris & HOFFER, Brian & MIRANOWSKI, Dave & CRAIN, Tyler. KERF Pavilion [online]. Massachusetts Institute of Technology, 2017. Dostupné z: https://fabiap2012.files.wordpress.com/2012/01/kerf_documentation_finalw_o-spreads.pdf

3 CAPONE, Mara & LANZARA, Emanuela. Parametric Kerf Bending: Manufacturing Double Curvature Surfaces for Wooden Furniture Design [online]. University of Naples Federico II, 2019. 10.1007/978-3-030-03676-8_15. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331312443_Parametric_Kerf_Bending_Manufacturing_Double_Curvature_Surfaces_for_Wooden_Furniture_Design

4 GILLKSVIT, Oscar & HENRIKSSON, Victoria & POULSEN, Emil. Digital Wood - Design & fabrication of a full-scale exhibition structure in plywood [online]. Chalmers University of Technology, 2016. Dostupné z: <https://issuu.com/v.henriksson/docs/digitalwood>

5 FOLTMAN, Andrzej & TALAEI, Ardeshir & ALCALÁ, Luis Arturo Pachecho & PRAJAPAT, Subhash. An Exploration on Possibility of Double-Curved Wooden Panels Fabrication [online]. Institute for Advanced Architecture of Catalonia, 2019. Dostupné z: <http://www.iaacblog.com/programs/exploration-possibility-double-curved-wooden-panels-fabrication/>

6 GUZELCI, Orkan & BACINOGLU, Zeynep & ALACAM, Sema. Enhancing Flexibility of 2D Planar Materials By Applying Cut Patterns For Hands On Study Models [online]. Conference of Iberoamerican Society of Digital Graphics, 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/307138456_Enhancing_Flexibility_of_2D_Planar_Materials_By_Applying_Cut_Patterns_For_Hands_On_Study_Models

7 IU, Garis. Minimal Surface - Hyperbolic Paraboloid Folding [online]. Diploma Studio 10, Westminster University School of Architecture, 2014. Dostupné z: <https://wewanttlearn.wordpress.com/2014/11/11/minimal-surface-hyperbolic-paraboloid-folding/>

8 Kerf Spacing Calculator for Bending Wood [online]. Dostupné z: <https://www.blocklayer.com/kerf-spacingeng.aspx>

9 LUNIN, Segre & LUNIN, Pablo. Dukta flexible wood [online]. Dostupné z: <https://dukta.com/>

10 CRANE, Brad & MCGEE, Andrew & PRADO, Marshall & ZHAO, Yang. Kerf-Based Complex Wood Systems, Performative Wood Studio [online]. Harvard University Graduate School of Design, 2010. Dostupné z: <http://www.achimenges.net/?p=5006>

9 Seznam obrázků

Obr. 1-4 Ukázka několika zkoušek provedených v rámci vlastního zkoumání metody prořezávání dřeva. Testy byly prováděny převážně z plné 1-2 mm lepenky. Na horním obrázku je test proveden ze sololitové desky o tl. 3,3 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 5 Schéma druhů ohybu. Zdroj: vlastní

Obr. 6 Schéma principu metody ohybu prořezáním. Zdroj: vlastní

Obr. 7 Schéma dvou typů dřevěných deskových materiálů. Zdroj: vlastní

Obr. 8 Výroba klavíru. Zdroj: https://wac.edgecastcdn.net/001A39/prod/media/6f2ilJdfiy1XrhEsite/F630C583CE6A70EAA7A780FF788A50B3.app1_1545159961127-0_L1800.jpeg

Obr. 9-12 Proces z výroby kytary. Zdroj: https://www.mimf.com/library/Laminating_multi-ply_acoustic_guitar_backs_and_sides__Picture_-12-21-2007.html <https://www.jazzguitar.be/forum/builders-bench/74030-first-timer-archtop-build.html>

Obr. 13-15 Proces výroby stoličky. Zdroj: <https://www.finewoodworking.com/2018/08/15/kerf-bending-plywood>

Obr. 16-17 Stolička TRYST. Zdroj: <https://www.milouket.tv/2012/10/11/craftmanship-2/>

Obr. 18 Kovový prořezávaný set sezení. Zdroj: <https://www.core77.com/posts/38361/More-Laser-Kerf-Steel-Bending-The-HandBend-Furniture-Design-System>

Obr. 19 Schéma principu synchronizace fyzických a digitálních modelů. Zdroj: vlastní

Obr. 20-21 3d model pavilonu. Zdroj: <http://saise.fr/pavillon-nautille-sylvestre-demo-forest>

Obr. 22-25 Proces výstavby pavilonu. Zdroj: <http://saise.fr/pavillon-nautille-sylvestre-demo-forest>

Obr. 26 Analýza ukazuje posuny celé konstrukce (eng. 3D displacement), Můžeme vidět, jak je díky horizontálním zpevňujícím schodům uvnitř pavilonu celá zpěvněná a posuny jsou zde minimální pouze v horní části. Zdroj: <http://saise.fr/pavillon-nautille-sylvestre-demo-forest>

Obr. 27 Dukta panel. Zdroj: <https://dukta.com/en/>

Obr. 28 Prořezaný ohebný pruh. Zdroj: <https://dukta.com/en/>

Obr. 29-32 Ukázky použití dukta panelů v interiéru. Zdroj: <https://dukta.com/en/>

Obr. 33 Sál koncertní haly Toni Areal. Zdroj: <https://www.architonic.com/en/project/dukta-concert-hall-toni-areal/5103200>

Obr. 34 Rozměry prořezaných panelů a druhy zvlnění. Zdroj: <https://www.spinneybeck.com/index.php?/products/categories/category/flexible-wood-collection>

Obr. 35-38 Ukázka použití dukta panelů v interiéru. Zdroj: <https://www.spinneybeck.com/index.php?/products/categories/category/flexible-wood-collection>

Obr. 39-40 Výroba geodetické kupole. Zdroj: <https://jackmorris.myportfolio.com/geodesic-dome>

Obr. 41 Tvarování živoucího vzoru. Zdroj: <http://fabacademy.org/2019/labs/vigyanashram/students/vaibhav-saxena/Week%204.html#single-project>

Obr. 42 Ukázka, jak je možné fyzický test tvarovat. Zdroj: <https://wewanttlearn.wordpress.com/2014/11/11/minimal-surface-hyperbolic-paraboloid-folding/>

Obr. 43 Výchozí digitální 3d model. Zdroj: <https://wewanttlearn.wordpress.com/2014/11/11/minimal-surface-hyperbolic-paraboloid-folding/>

Obr. 44 Připravená polovina vzoru. Zdroj: <https://wewanttlearn.wordpress.com/2014/11/11/minimal-surface-hyperbolic-paraboloid-folding/>

Obr. 45 Digitální model struktury. Zdroj: <http://pr2014.aaschool.ac.uk/DRLPHASE2/Protean-Pattern#image-12>

Obr. 46 Struktura umístěná v městském prostředí. Zdroj: <http://pr2014.aaschool.ac.uk/DRLPHASE2/Protean-Pattern#image-12>

Obr. 47 Roztažený fyzický model. Zdroj: <http://pr2014.aaschool.ac.uk/DRLPHASE2/Protean-Pattern#image-12>

Obr. 48-49 Experiment s vytvarováním vzoru podle ruky. Zdroj: <https://collectiftextile.com/renee-verhoeven/>

Obr. 50 Pavilon studentů z Massachusettského technologického institutu. Zdroj: <https://architecture.mit.edu/architecture-and-urbanism/project/kerf-pavilion>

Obr. 51-53 Pavilon studentů z Technologické univerzity Chalmers ve Švédsku a jeho detaily. Zdroj: <https://issuu.com/v.henriksson/docs/digital-wood>

Obr. 54 Schéma čtyř druhů vzorů a jejich způsob ohybu. Zdroj: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0266351118804954>

Obr. 55 Překreslený výsledný úspěšný vzor výzkumu. Zdroj: vlastní

Obr. 56 Znázornění způsobu ohybu jednoho komponentu. Zdroj: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0266351118804954>

Obr. 57 Ukázka vzoru a jeho aplikace na fyzickém modelu. Zdroj: https://www.researchgate.net/publication/307138456_Enhancing_Flexibility_of_2D_Planar_Materials_By_Applying_Cut_Patterns_For_Hands_On_Study_Models

Obr. 58 Experiment s tvarováním kokonu. Zdroj: https://www.researchgate.net/publication/331312443_Parametric_Kerf_Bending_Manufacturing_Double_Curvature_Surfaces_for_Wooden_Furniture_Design

Obr. 59 Experiment s tvarováním parabolického hyperboloidu. Zdroj: https://www.researchgate.net/publication/331312443_Parametric_Kerf_Bending_Manufacturing_Double_Curvature_Surfaces_for_Wooden_Furniture_Design

Obr. 60-62 Panely akustického podhledu. Zdroj: <https://mamou-mani.com/project/wooden-waves/>

Obr. 63 Digitální model očekávaného žádoucího chování testu - všechny čtyři strany v rovině. Zdroj: vlastní

Obr. 64 Reálné chování sololitového testu - kroucení materiálu. Zdroj: vlastní

Obr. 65-66 Ukázka tvarovatelnosti prořezaného sololitu. Zdroj: vlastní

Obr. 67 Digitální model. Zdroj: vlastní

Obr. 68 Vzor vytvořený pomocí parametrického skriptu. Zdroj: vlastní

Obr. 69 Parametrická analýza křivosti 3d plochy. Zdroj: vlastní

Obr. 70-72 Fyzický test s 3,3mm sololitovou deskou s rozměry přibližně 500x700 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 73-76 Další testované příklady jednoduchého čárového vzoru. Zdroj: vlastní

Obr. 77-78 Zkouška modularity prvku. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 79-80 Tvarování sololitového panelu za pomoci režné nitě . Zdroj: vlastní

Obr. 81 Parametrická bodová analýza parabolického hyperboloidu a jeho rozbaleného tvaru. Zdroj: vlastní

Obr. 82 Parabolický hyperboloid. Zdroj: vlastní

Obr. 83 Analýza křivosti plochy upraveného parabolického hyperboloidu. Zdroj: vlastní

Obr. 84 Uskupení 3d ploch k použití na fasádě. Zdroj: vlastní

Obr. 85 2d testovaný vzor. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 86-87 Fyzický model. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 88-89 Fyzický model. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 90 2d Testovaný vzor. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 91 2d Testovaný vzor. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 92-93 Fyzický model. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 94 Schéma žádoucího chování fyzického testu. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 95-97 Reálné chování fyzického testu. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 98 2d Výkres testovaného vzoru. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 99-103 Ukázka fyzických testů s plynulými liniemi. Zdroj: vlastní

Obr. 104-106 Tvorba digitálního testu podle předchozího fyzického. Zdroj: vlastní

Obr. 107 Analýza maximálního rádiusu ohybu. Zdroj: vlastní

Obr. 108 Analýza průměrného zakřivení plochy. Zdroj: vlastní

Obr. 109-114 Ukázka fyzických testů s křížovými vzory. Zdroj: Ilya Kovalenko

Obr. 115 Fyzický test trojúhelníkového vzoru na 2 mm plné lepence v rozměrech 300x300 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 116-119 Fyzický test trojúhelníkového vzoru na 2 mm plné lepence v rozměrech 300x300 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 120-125 Fyzické test trojúhelníkového vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 126-129 Fyzické test dvou vzorů na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm. Zdroj: Ilya Kovalenko

Obr. 130 Fyzický test vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x100 mm. Zdroj: Ilya Kovalenko

Obr. 131 Digitální 3d model s aplikovaným vzorem bludiště. Zdroj: vlastní

Obr. 132 Fyzický test hvězdicového vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech cca 400x200 mm. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 133-134 Fyzické testy s kombinací vzorů na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 100x200 mm (vlevo) a 200x200 mm (vpravo). Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 135-136 Fyzické testy kombinací vzoru na 1,5 mm plné lepence v rozměrech 400x200 mm (vlevo) 300x300 (vpravo, první pokus o vytvoření antiklastické plochy). Zdroj: Laureen Le Bras a Ilya Kovalenko

Obr. 137-140 Fyzické testy kombinací vzorů při pokusu o vytvoření antiklastické plochy na 2 mm plné lepence v rozměrech 400x400 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 141 Fyzický test kombinací vzorů při pokusu o vytvoření antiklastické plochy na 2 mm plné lepence v rozměrech 400x400 mm. Zdroj: vlastní

Obr. 142-143 2d výkres jedné z možných variant kombinací vzorů. Zdroj: vlastní

Obr. 144-147 Fyzický test podle referenční studie anatomie ruky. Zdroj: Laureen Le Bras

Obr. 148 Digitální model prvního prototypu sloupu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras, Ilya Kovalenko

Obr. 149 Foto fyzického modelu sloupu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras, Ilya Kovalenko

Obr. 150 MeshMachine teselace. Zdroj: vlastní

Obr. 151 Extrakce jednotlivých panelů. Zdroj: vlastní

Obr. 152 První prototyp sloupu z parametrických křivek pluginu MeshMachine. Zdroj: vlastní

Obr. 153 Geometrie sloupů 1 pentagon, 2 hexagon, 3 octagon. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 154 Postup tvorby 3d modelu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 155 Finální digitální verze prvního prototypu pohled zepředu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 156 Finální digitální verze prvního prototypu perspektivní pohled. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 157 Nosná konstrukce sloupu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 158 Fotografie koruny fyzického modelu sloupu. Zdroj: vlastní, Laureen Le Bras

Obr. 159 2d vzor pracující s proměnou velikostí jednotlivých prořezů. Zdroj: vlastní

Obr. 160 Parametrický vzor vytvářející linie z jednotlivých bodů. Zdroj: vlastní

Obr. 161 Parametrický vzor vytvářející linie z jednotlivých bodů. Zdroj: vlastní

Obr. 162-165 Parametrické vzory reagující na zakřivení. Zdroj: vlastní

Obr. 166-168 Digitální model sloupu složeného z trojúhelníkových komponentů. Zdroj: vlastní

Obr. 169-170 Foto ledového salátu (vlevo) a čínského zeli (vpravo). Zdroj: vlastní

Obr. 171-173 Princip vrstvení - vnitřní vrstva má vždy menší obvod a vyztužuje vnější. Zdroj: vlastní

Obr. 174-175 První organické digitální prototypy. Zdroj: vlastní

Obr. 176 Prototypy 3d tištěných betonových sloupů. Zdroj: vlastní

Obr. 177 Proces 3d tisku betonu. Zdroj: vlastní

Obr. 178-180 Digitální prototyp modelu inspirovaném v kmenu palmy. Zdroj: vlastní

Obr. 181 Zvlněný digitální prototyp. Zdroj: vlastní

Obr. 182-183 Zvlněný digitální prototyp. Zdroj: vlastní

Obr. 184-187 Prototyp zmrzlinového modelu, pohled zboku (vlevo), pohledy shora (vpravo). Zdroj: vlastní

Obr. 188-190 Vývoj finálního návrhu sloupu. Zdroj: vlastní

Obr. 191 Pohled shora dovnitř sloupu. Zdroj: vlastní

Obr. 192-193 Analýza křivosti digitálního modelu. Zdroj: vlastní

Obr. 194-195 Dělení plochami horizontálně a vertikálně. Zdroj: vlastní

Obr. 196 Dělení pomocí iso křivek a možnost dělení na hexagony. Zdroj: vlastní

Obr. 197 Parametrické dělení NGon pluginem. Zdroj: vlastní

Obr. 198-199 První ukázka tvorby vzorů pro panely. Zdroj: vlastní

Obr. 200-202 Fyzický test zátěže, materiál 3,3 mm sololit a 3 mm překližka, rozměry modelu 48x28x28. Zdroj: vlastní

Obr. 203-204 Ukázka roztažnosti 3 mm překližky po prořezání jednoduchým čárovým vzorem. Zdroj: vlastní

Obr. 205-206 Vývoj tvorby vzorů. Zdroj: vlastní

Obr. 207 Jeden segment sloupu, celkem tři tyto segmenty pro výsledný tvar. Zdroj: vlastní

Obr. 208 Rozbalené jednotlivé plochy segmentu. Zdroj: vlastní

Obr. 209-211 Znázornění principu spojování. Zdroj: vlastní

Obr. 212 Detail napojení ve vertikálním směru. Zdroj: vlastní

Obr. 213 Pohled shora, zkouška větších kusů jednotlivých rybinových spojů a křížení ve vzoru. Zdroj: vlastní

Obr. 214-215 Nepovedený test s použitím křížení. Zdroj: vlastní

Obr. 216 Horizontální spojující pásy z rozbaleného 3d tvaru (nahore) a z rovného pruhu (dole). Zdroj: vlastní

Obr. 217 Detail spojujícího pásku. Zdroj: vlastní

Obr. 218-219 Vybraná část sloupu pro realizaci fyzického modelu. Zdroj: vlastní

Obr. 220 Linový vzor vnější vrstvy pro fyzický prototyp. Zdroj: vlastní

Obr. 221 Zvýrazněná vnější vrstva. Zdroj: vlastní

Obr. 222 Linový vzor vnitřní vrstvy pro fyzický prototyp. Zdroj: vlastní

Obr. 223 Zvýrazněná vnitřní vrstva. Zdroj: vlastní

Obr. 224 Variace tří sloupů. Zdroj: vlastní

Obr. 225 Variace tří sloupů. Zdroj: vlastní

Obr. 226 Variace tří sloupů. Zdroj: vlastní

10 Přílohy

Přiloženy k této bakalářské práci budou výrobní výkresy pro výsledný prototyp sloupu

- prořezávané vzory pro jednotlivé panely
- výkresy spojovacích prvků

curriculum vitae

Michaela Bergová

Datum narození 26.12.1995
Adresa Marie Majerové 285, 533 53 Pardubice
Mobilní telefon 775 722 933
E-mail bergova.misa@gmail.com

Vzdělání

září 2011 – červen 2015
Střední uměleckoprůmyslová škola Ústí nad Orlicí
Produktový design

září 2015 – červen 2019
Technická univerzita Liberec
Architektura a urbanismus - bakalářské studium

září 2016 – současnost
Technická univerzita Liberec
Environmental design - bakalářské studium

září 2019 – současnost
Technická univerzita Liberec
Architektura a urbanismus - navazující studium

Pracovní zkušenosti

květen 2013
eBRÁNA Pardubice – odborná praxe na grafickém oddělení

červen 2014 – srpen 2014
Au pair - Lorraine, Francie

leden 2019 – listopad 2019
Ateliér Architekti Chmelík a partneři – architektonická praxe

Jazyky

Anglický jazyk Upper-Intermediate B2
Francouzský jazyk Beginner A1

Grafické a 3d modelovací programy

Adobe Photoshop, Illustrator, Indesign
Rhinoceros, Revit, AutoCad, Archicad, Lumion

Ocenění

- Nejlepší praktická maturitní práce oboru Produktový design
- 1. místo v ČR v soutěži Multikomfortní bydlení v Dubaji od společnosti Saint-Gobain a účast v mezinárodním kole
- Cena děkana za bakalářskou práci na téma České Ambasády v Addis Abebě
- Umístění mezi 25 top projekty z celkových 281 z celého světa v soutěži Inspireli Awards