

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STAVEBNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2019**

**MARTIN  
SALÁK**

**České vysoké učení technické v Praze**  
**Fakulta stavební**  
**Katedra betonových a zděných konstrukcí**



**Diplomová práce**

**Betonové origami konstrukce**  
**Concrete Origami Structures**

**Vedoucí práce: Ing. Michaela Frantová Ph.D.**

**Letní semestr 2018/2019**

**Bc. Martin Salák**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Salák Jméno: Martin Osobní číslo: 426326  
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Betonové origami konstrukce  
Název diplomové práce anglicky: Concrete Origami Structures

Pokyny pro vypracování:

- Vlastnosti origami tvarů
- Betonové skořepinové konstrukce origami
  - Vývoj, využití, výstavba
- Praktická část: výroba vlastní konstrukce


Seznam doporučené literatury:

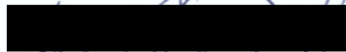
CHUDOBA, R., J. VAN DER WOERD, M. SCHMERL a J. HEGGER. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. Elsevier: Advances in Engineering Software [online]. 2014, 2013, 2014(72), 119 - 127 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997813000665?via%3Dihub>

SCHENK, Mark. Folded Shell Structures. University of Cambridge The Old Schools Trinity Lane Cambridge CB2 1TN UK, 2011. Disertace. Clare College, University of Cambridge.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Michaela Frantová Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 18. 2. 2019 Termín odevzdání diplomové práce: 19. 5. 2019  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

18. 2. 2019

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto magisterskou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury, s využitím poskytnutých odborných konzultací.

Praha 19. 5. 2019

podpis

Rád bych poděkoval své vedoucí Ing. Michaele Frantové Ph.D. za vřelé a odborné vedení této práce. Dále bych rád poděkoval všem ze smináře prof. P. Štemberka za důležité rady a milou pomoc. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, za jejich ohromnou podporu a péči, bez které bych tuto práci mohl napsat jen stěží.

## Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je popsat a postavit vlastní betonovou origami konstrukci. K tomu jsou nejdříve prozkoumávány konstrukční vlastnosti origami obecně, poté je popsána historie a současný vývoj betonových origami skořepin, a nakonec je navržena, optimalizována a postavena vlastní konstrukce. V rámci práce byl model analyzován v softwaru a postup betonování byl zkoušen před samotnou stavbou na menších částech konstrukce, aby bylo dosaženo kvalitního výsledku. Tím je vláknobetonový model mostu o rozměrech cca 1,5 x 0,75 m, který se bude účastnit mezinárodní soutěže modelů mostů v Budapešti.

**Klíčová slova:** *vláknobeton, rozptýlená výztuž, origami, bednění, historie skořepin, experimentální konstrukce, oricrete*

## Abstract:

The aim of this diploma thesis is to describe the topic of origami folded plate structures and its history, and to design and built a small-scale model of such structure. To do so, firstly the properties of origami in general are discussed, then history of folded plate structures and shell structures is described and at last the concrete model is designed and built. During the work, the model was analyzed with software and the process of building the model was experimentally tested on parts of the structure. The outcome is a fibre reinforced concrete model of a bridge with a span approximately 1.5 m, which will compete in international competition of FRC structures in Budapest.

**Keywords:** *Fibre reinforced concrete, diffused reinforcement, origami, formwork, history of folded plate structures, history of shells, experimental structure, oricrete*

## Obsah

Úvod .....	<b>8</b>
<b>1 Origami .....</b>	<b>9</b>
1.1 Konstrukční vlastnosti origami .....	10
1.2 Znamé vzory rýhování.....	13
1.3 Rigid origami .....	14
<b>2 Origami konstrukce .....</b>	<b>18</b>
2.1 Historie skořepin a prolamovaných staveb.....	19
2.2 Moderní konstrukce a současný vývoj.....	22
<b>3 Vlastní návrh origami konstrukce.....</b>	<b>25</b>
3.1 Soutěžní model .....	26
3.2 Úvodní návrhy .....	27
3.3 Výsledný návrh soutěžního modelu mostu .....	31
3.3.1 Materiál .....	31
3.3.2 Model.....	32
3.4 Bednění a betonáž.....	34
3.4.1 Papírové zkušební bednění .....	35
3.4.2 Dřevěné zkušební bednění .....	37
3.4.3 Finální verze bednění.....	39
3.4.4 Vyhodnocení modelu .....	45
<b>Závěr.....</b>	<b>49</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>50</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>54</b>

## ÚVOD

Ve stavařině často vedou nové technologie k rozvoji architektury a moderní výstavby. Betonové skořepiny jsou jedním z nejelegantnějších řešení moderních staveb, i když se stále využívají především pro monumentální stavby jako například na obrázku 01 z roku 2003, často se s tímto způsobem realizace nesetkáme.

Origami je umění skládání papíru, které z prvotního estetického a duchovního záměru proniklo se svou genialitou a hravostí do všech možných technických oborů, a právě inspirací tímto uměním ve stavařině bych se rád v této práci zabýval.

Toto téma jsem si vybral, protože mě zajímají netradiční betonové konstrukce a nové metody výstavby a design a rád bych tyto obory dále prozkoumával. Práce je rozdělena do třech kapitol, první se zabývá konstrukčními vlastnostmi origami, druhá historií a současným vývojem betonových origami skořepin a třetí vlastním návrhem takovéto konstrukce.



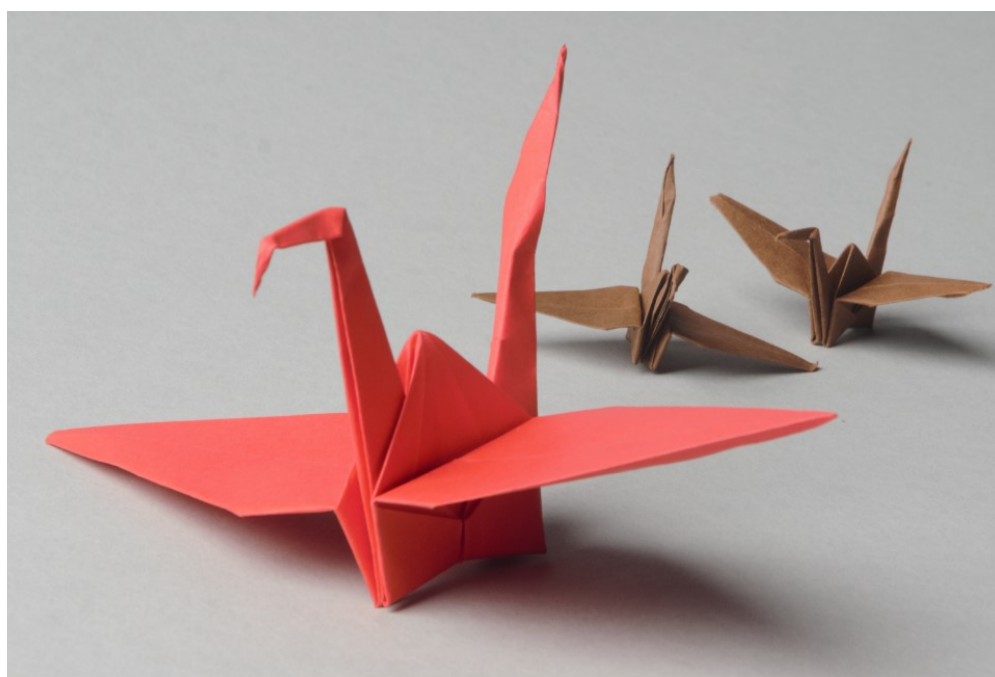
Obrázek 01: Auditorio de Tenerife "Adán Martín" z roku 2003 [01]



# 1 ORIGAMI

Origami je celosvětově užívané japonské slovo, které dnes označuje všemožné techniky skládání nejen papíru – *ori* znamená složit a *kami* znamená papír. Ač je toto slovo až z konce 19 století, tak samotné skládání je mnohem starší a velmi přirozené jak pro přírodu, tak i pro člověka, vzniklo tudíž nezávisle na sobě na různých místech po celé planetě: Například Maurové přinesli do Španělska techniky skládání papíru již ve 12. století. Nikde však nemělo takový kulturní dopad jako právě v Japonsku. [2]

Do širšího podvědomí lidí po celém západním světě se dostalo origami na konci padesátých let 19. století poté co, japonský velmistr origami Akira Jošizawa uspořádal svojí úspěšnou výstavu v Amsterdamu a v New Yorku.[3]



Obrázek 02: Origami jeřáb, když jich vyrobíte 1000, tak vám prý splní přání

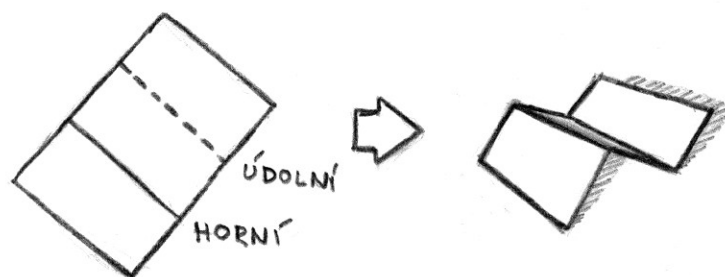
## 1.1 KONSTRUKČNÍ VLASTNOSTI ORIGAMI

Poté, co se rozšířilo povědomí o origami ve světě, tak v tomto oboru přišla opravdová změna, když se s origami propojila matematika. Tímto spojením vznikla nová disciplína, která se snaží popsat vlastnosti a limity origami. Vědci a nadšenci stále objevují nové hranice, čeho lze pomocí origami dosáhnout a dodnes se okolo tzv. *computational origami* nachází početná skupina, která tento obor dále rozvíjí.

Origami je umění skládání. Skládání je způsob, jakým z papíru, tedy plošného prvku, vytvoříme prostorový objekt, tvar. Avšak vymyslet, jak složit origami do určitého tvaru (například brouka), není vůbec jednoduché. Dříve to vymýšleli origamisté na základě citu a zkušenosti s jinými origami tvary. Později jim k tomuto úkolu pomohla matematika. Pro pochopení origami je zde vysvětleno několik pravidel a pojmů, které byly vytvořeny, aby bylo možné jednoduše reprodukovat návody na složité tvary. Odborné pojmy se v češtině občas liší, anebo neexistují vůbec, proto jsou vždy uvedeny i jejich anglické ekvivalenty.

### PŘEHYBY (*fold, crease*)

Papír lze ohnout dvěma opačnými směry: K sobě – vytvoříme údolí, či od sebe – vytvoříme tak hřeben (horu). Tyto přehyby se nazývají údolní (*valley fold*), respektive horní (*mountain fold*), přehyby pak tvoří na rozloženém papíře rýhování (*crease pattern*). Rýhování vytváří na papíře vzor. Pokud jsou přehyby předkreslovány, většinou se horní a dolní přehyb od sebe rozlišuje typem nebo barvou čáry. K této terminologii patří i vrchol (*vertex*), tedy bod, který je společný alespoň třem stranám, místo kde se potkávají horní a údolní přehyby.



Obrázek 03: Origami přehyby a jejich značení

### SLOŽITELNOST DO ROVINY (flat foldability)

Tradiční origami a také mnohé moderní využití mají jednu důležitou vlastnost a to, že již hotový, složený model lze „zmáčknout“ do roviny, aniž bychom složený model poškodili. Složený model půjde tedy například založit do knihy, či dokonce zarolovat do ruličky. Pokud chceme vytvořit takovéto origami, tak stačí dodržet tato 3 základní pravidla:

- DVOUBAREVNOST

Aby bylo možné model sestavit, musí jeho rýhování (vzor skladů na rozloženém papíře, také *crease pattern*) být vybarvitelné dvěma barvami tak, že se nikdy nepotkají dvě stejné barvy na obou stranách rýhy. Barvy se potkávají pouze přes roh, tak jako na šachovnici.

- MAEKAWOVA VĚTA

Maekawova věta říká, že rozdíl horních a údolních překladů v jednom rohu (vertex) je vždy roven  $\pm 2$ . Nemusí to splňovat každé origami, ale většina tradičních origami jsou složitelné do roviny (flat foldable), to znamená, že hotový model můžeme založit do knihy, aniž bychom ho poškodili.

- KAWASAKIHO VĚTA

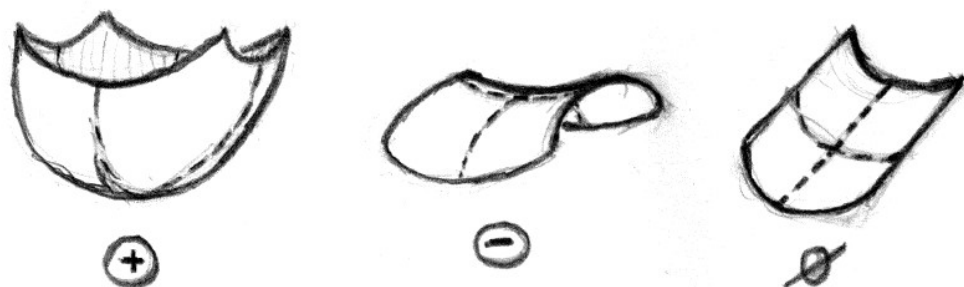
Kawasakiho věta říká že, pokud sečtete každý druhý úhel okolo vrcholu, tak vždy celkový úhel je rovná čára, tedy  $180^\circ$ . Nebo lze říci, že pokud budeme střídavě přičítat a odčítat všechny úhly okolo vrcholu, dostaneme  $0^\circ$ . [4]

### ROZLOŽITELNOST (developability)

Každé tradiční origami, které bylo složeno z jednoho kusu papíru klasickým způsobem, lze také zpět rozložit. Pokud však chceme vytvářet speciální tvary, je často nepraktické, pracovat s jedním kusem skládaného materiálu. U těchto modelů pak již nemusí být tato podmínka zachována. To může ovlivnit způsob výstavby či výroby takové konstrukce.

### GAUSSOVA KŘIVOST

Gaussova křivost patří k základním charakteristikám plochy, značí se  $G$  a vypočte se vynásobením nejmenší a největší křivosti v daném bodu. Papír nebo například tenký plech lze ohnout tak, že  $G=0$ , tzn. lze je ohnout pouze v jednom směru, druhý směr zůstává rovinný.



Obrázek 04: Různé druhy Gaussovy křivosti

Gauss dokázal, že Gaussova křivost plochy v odpovídajících bodech je neměnná, pokud povrch ohýbáme, aniž bychom ho natahovali.

(Například glóbus nemůžeme zobrazit na mapu bez zkreslení.) Tato věta se nazývá Theorema Egregium a dá se považovat za základní princip zvyšování tuhosti pomocí ohýbání.

[5] [6]

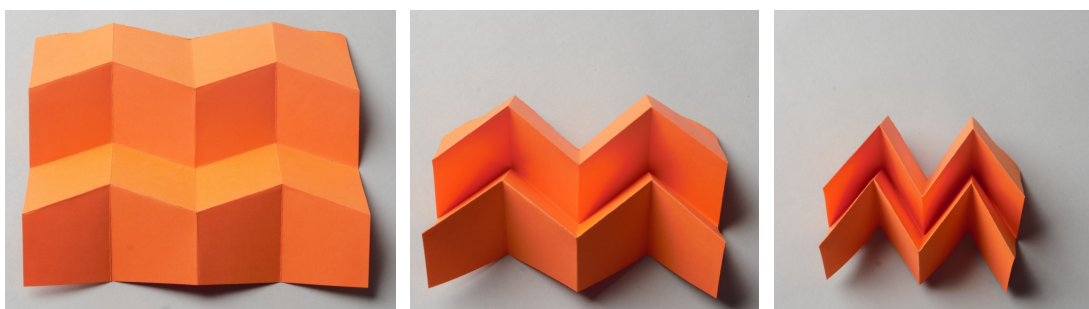
### 1.2 ZNÁMÉ VZORY RÝHOVÁNÍ

Jedno z odvětví origami se zabývá teselacemi (Origami tessellation). Teselace je mozaikování či parketování, jedná se tedy o vyplnění prostoru opakováním jednoho nebo více geometrických tvarů, bez překrývání a bez mezer.

[7]

#### MIURA-ORI

Tento vzor teselace vynalezl japonský astrofyzik Koryo Miura (odtud také název) v 80. letech minulého století pro skládání solárních panelů na raketách do vesmíru. Tyto solární panely musí být složeny, když se raketa pohybuje v atmosféře, ale jakmile je ve vesmíru musí se rozložit rychle a jednoduše, způsob skládání je znázorněn na obrázku 05.



Obrázek 05: Rozevírání vzoru Miura (foto vlastního modelu)

Jedná se o teselaci, kde se jediný vzor – kosočtverec opakuje stále dokola. Takto složený papír lze jednoduchým pohybem dvou rohů od sebe roztáhnout nebo složit v rámci jednoho jediného, plynulého pohybu. Mluvíme proto

## 1 Origami

o systému s jedním stupněm volnosti. Tyto konstrukce nejen že se plynule pohybují, ale stačí určit úhel dvou desek k definování rozevření celé teselace.

Takto složený solární panel byl opravdu poslán do vesmíru ve zkušebním japonském satelitu. Kromě toho se ujal tento vzor skládání také pro některé mapy a je inspirací pro mnohé další.

[8] [9]

### WATERBOMB BASE

Anglický název znamená základ vodní bomby neboli origami balónek. Jedná se o základní vzor, ze kterého vycházejí další modely, ať už tradiční, či nikoli. Základem těchto modelů je většinou změna tvaru nafouknutím. Nejzajímavěji využít je tento vzor pravděpodobně jako stent – tedy prostředek udržující průchodnost trubicové struktury (například cévy). Toto využití vynalezl Zhong You na Oxfordské Univerzitě. Stent je malý pro snadnou dopravu na určené místo při operaci a poté se zvětší, aby udržel dané místo v kruhovitém tvaru.

[10]



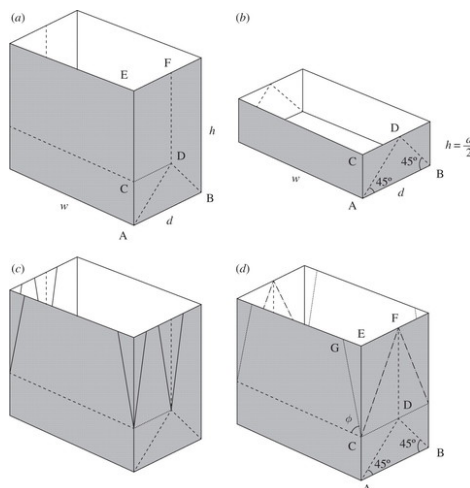
Obrázek 06: Origami stent [11]

### 1.3 RIGID ORIGAMI

Rigid znamená tuhé, jde tedy o origami skládající se z pevných, tuhých panelů, které nedovolují žádnou deformaci, a kloubů na hranách spojujících panely. Tím se přibližuje reálné konstrukci. Každý pohyb se tak projeví na celé konstrukci.

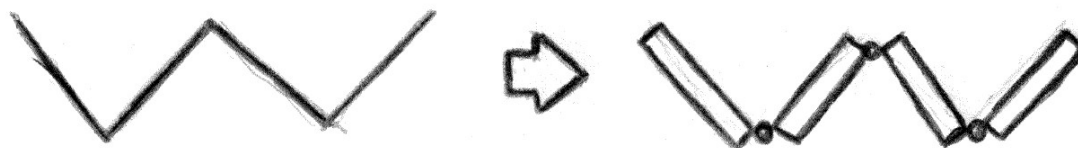
Je dokázáno, že jakýkoli mnohostěn, tudíž prakticky jakýkoli tvar, je možné složit z papíru (dokonce existuje i software, který zadaný úkol efektivně vyřeší). Ne všechny sklady, vzory jdou však složit z materiálu, který není tak poddajný jako papír (například karton, překližka či plech). Všem nejbližší příklad může být způsob skládání papírové tašky ze supermarketu. Klasický způsob, jak tašku složit nebude fungovat, pokud použijeme tuhý materiál místo ohebného. Na obrázku 07 vlevo na hoře je zobrazen klasický způsob skládání papírové tašky, vpravo od něj je nejvyšší možná taška složitelná tímto způsobem z tuhého materiálu a vpravo dole je zobrazen funkční alternativa pro tuhý materiál i pro vysokou tašku, tak jak jej navrhli v roce 2011 Weina Wu a Zhong You.

[12] [13]



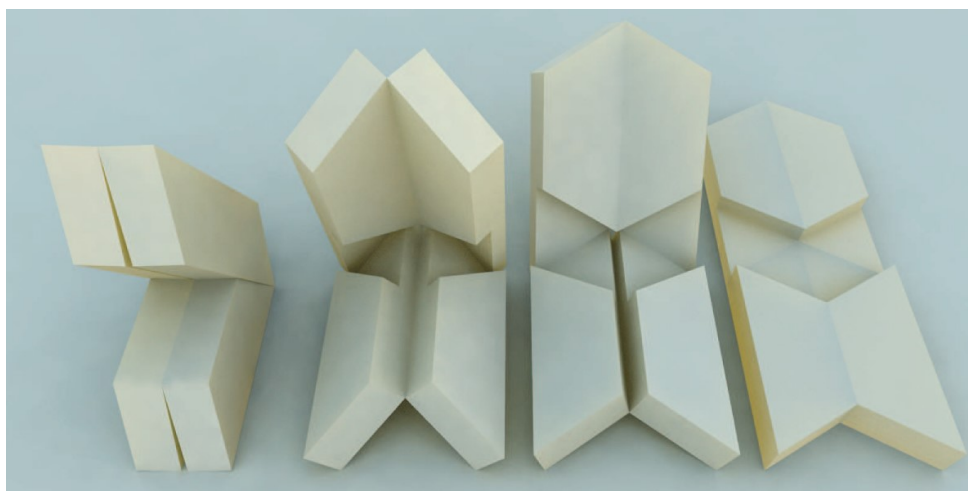
Obrázek 07: Nesložitelná (vlevo nahoře) a složitelná tuhá nákupní taška (vpravo dole) [13]

Všechny dosavadní modely předpokládaly nulovou tloušťku skládaného materiálu, tento předpoklad v celku dobře platí pro papír či velmi tenký plech, pro účely tuhých konstrukcí je třeba tuhost zajistit určitou tloušťkou materiálu. Proto je třeba upravit model na tlusté, tuhé panely spojené klouby. S přidáním tloušťky však vznikají problémy v kloubech.



Obrázek 08: Reálnější model origami obsahující tloušťku konstrukce

S tímto problémem se můžeme vypořádat více způsoby. Již v roce 1988 si nechal Američan Charles Hoberman patentovat způsob, jak vyrobit Miura Ori vzor z tlustých panelů za využití panelů s dvěma různými tloušťkami (obrázek 09). Tento způsob však nedovoluje vytvořit vrcholy pro jiné konstrukce než symetrické, jako je právě třeba vzor Miura Ori. [14]



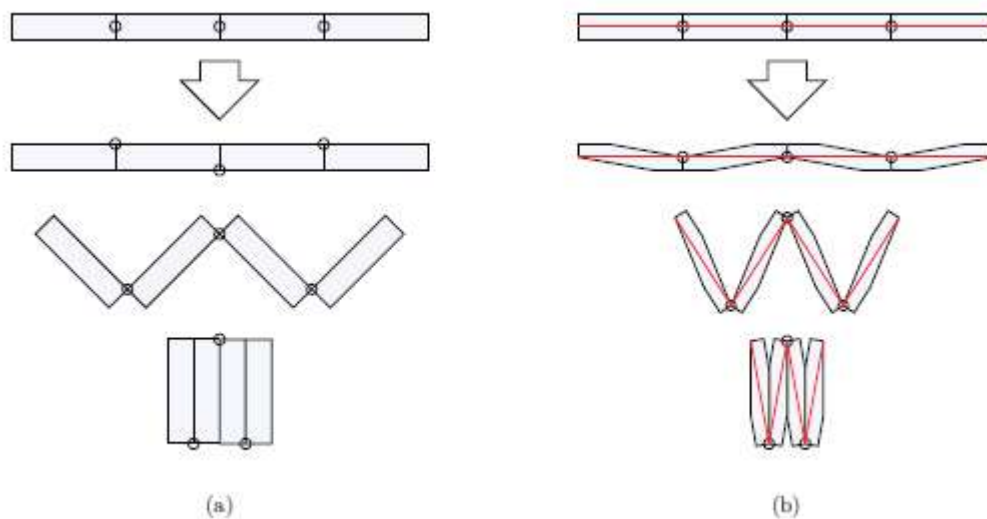
Obrázek 09: jeden způsobů vyřešení spoje rigid origami [15]

V roce 2011 Japonec Tomoio Tachi rozvíjí další způsoby, jak se s tímto problémem vypořádat. Lze předurčit směr ohýbání tím, že klouby vložíme na vnitřní strany ohybu, vlastně prostřídáme umístění kloubů (obrázek 10 vlevo). Umístění kloubů na jedné straně se však může jevit problematické při skládání větší konstrukce a narušuje plynulost pohybu. Proto můžeme také vložit klouby do střednice materiálu a poté vyříznout materiál okolo kloubu tak, aby dovolil natočení (obrázek 10 vlevo). Takové uložení kloubů lze označit za ideální, protože



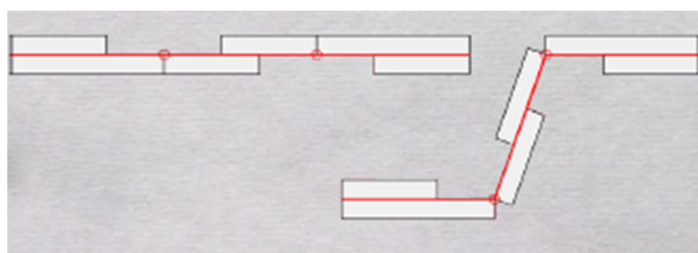
kopíruje střednici. Proto pohyb skládání bude naprosto stejný jako u klasického (papírového) origami.

[15]



Obrázek 10: různé způsoby umístění kloubů [15]

Pravou variantu z obrázku 10 lze i zjednodušit využitím spojení dvou panelů konstantní šířky, jak je zobrazeno na dalším obrázku č. 11.



Obrázek 11: Praktické zjednodušení napojení origami [5]

## 2 ORIGAMI KONSTRUKCE

Origami stavby vycházejí ze dvou typů konstrukcí, a to prolamovaných konstrukcí a skořepin. I když moderní origami stavby nemusí mít na první pohled mnoho společného s uvedenými dvěma typy konstrukcí, spojují je společné principy a to získávání tuhostí ohybem a štíhlost jednotlivých prvků. Jejich vývoj je tedy zásadní pro vývoj moderních origami konstrukcí.

Tato kapitola popisuje vývoj lomenicových konstrukcí a skořepin, dále se zabývá moderním vývojem betonových origami staveb a popisuje různé možnosti výstavby origami konstrukcí.



Obrázek 11: Kostel ve městě Neuss v Německu, dokončeno 1968 [16]

## 2.1 HISTORIE SKOŘEPIN A PROLAMOVANÝCH STAVEB

Skořepiny se obecně definují jako konstrukce, které mají jeden rozměr (tloušťku) zanedbatelné velikosti oproti ostatním ( $h \ll b, l$ ), ve stavebnictví se pak také rozlišují skořepiny a membrány jakožto hlavně tlačené, respektive tažené konstrukce. [17]

Skořepiny mají svůj původ ve starodávných klenbách, kdy tlačené konstrukce vyráběny z kamenů a cihel či betonu dokázaly překlenout obrovské rozměry již velmi dávno. Pantheon byl postaven mezi lety 118 a 126 s klenbou na rozpětí úctyhodných 43,5 m (obrázek 12 vlevo). Takovéto rozpětí si ve své době však vyžádalo svou daň na tloušťce konstrukce, klenba má ve vrcholu tloušťku 1,2 m a zdi obepínající hlavní dóm jsou až 6 m tlusté. [18]

Ač Pantheon zůstal velmi dlouho nepřemožen ve velikosti překlenutého prostoru (předčila ho až Hala století ve Vratislavi z roku 1913), vývoj pokračoval dál a byly stavěny stále štíhlejší klenby, jako příklad podobné moderní konstrukce lze uvést klenbu ve Španělském městě Algeciras, postavenou inženýrem Eduardem Torrojou v roce 1934 (obrázek 12 vpravo). Ta se klene na vzdálenost přes 47 metrů, (tedy o 4 m delší než Pantheon) s tloušťkou ve vrcholu pouhých 10 cm. [18] [19]



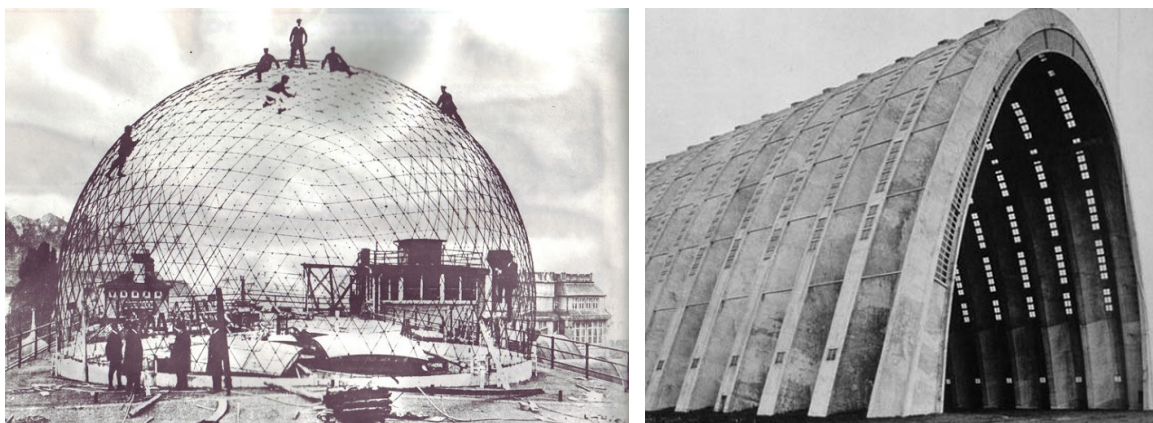
Obrázek 12: Pantheon v Římě (126) a Tržiště v Algeciras (1934) [20] [21]

Vývoj moderních skořepinových a lomenicových konstrukcí rozděljuje Martin Bechtold ve své knize *Innovative Surface Structures – Technology and Applications* do dvou hlavních období. [18]

## 2 Origami konstrukce

To první, probíhající mezi lety 1912 až 1939, začíná v Německu s firmou Dywidag, která postavila již zmíněnou Halu století ve Vratislavi a poté se spojila s firmou Carl Zeiss a vynalezly Zeiss-Dywidag systém, který byl přelomový ve výrobě tenkých skořepin. Jako první byl použit při výstavbě planetária v Jeně v Německu, na obrázku 13 vlevo je vidět samonosná trojúhelníková konstrukce z oceli, ke které byla opakovaně přikládáno jedno bednění o rozměru 3x3 m a na něj nastříkán beton. Tato kruhová konstrukce překlenula 16 m při tloušťce betonu pouhých 3 cm. Tento systém inspiroval v budoucnosti slavnou geodetickou kupoli.

První tenké skořepiny se však nestavěly jen v Německu, ve Francii postavil Eugène Freyssinet slavný hangár v Orly (obrázek 13 vpravo). Inspirován již dřívějšími stavbami podobného charakteru, odebral z oblouku ztužující trámy a nahradil je zvlněním samotné konstrukce. Bednění bylo široké 7,5 m a po vybetonování se posunulo dále. Tato konstrukce má rozpětí 88 m a tloušťku pouhých 9 cm ve vrcholu. Do tohoto období spadá také již zmíněné tržiště v Algeciras (obrázek 12 vpravo). [18]

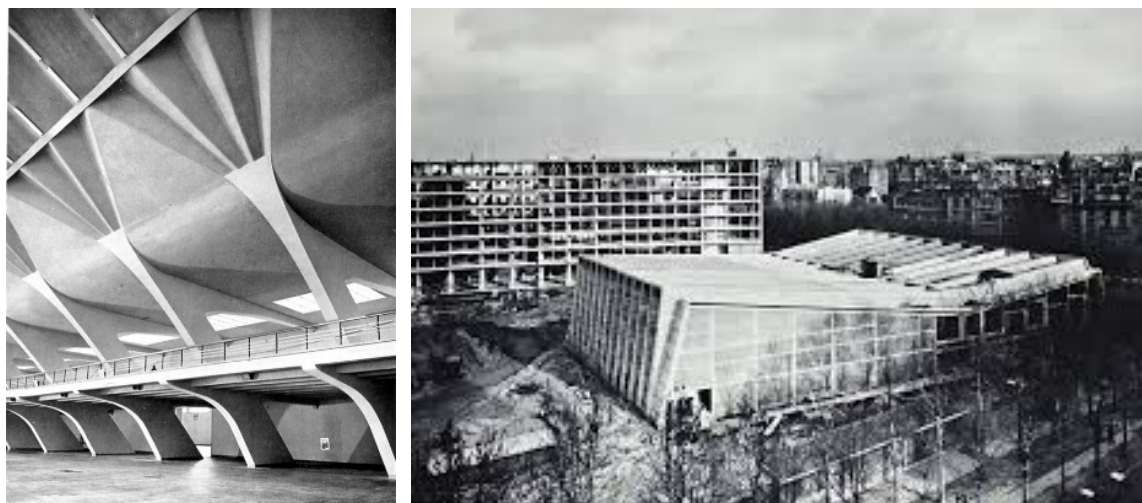


Obrázek 13: Planetárium v Jeně (1926) a hangár v Orly (1923) [22] [23]

Druhé období ve 40., 50. a 60. letech přináší celosvětový boom ve výstavbě skořepin a zároveň se objevují i složitější prolamované konstrukce. Ty dávají svým tvarem skořepinám tuhost ve směru kolmém s jejich rovinou a tím brání boulení, které může být pro tenkou skořepinu kritické.

## 2 Origami konstrukce

Kombinace nových technologií s levnou prací (v porovnání s cenou materiálů) dává vzniknout spektakulárním stavbám, jedna z nejslavnějších osobností této doby byl italský konstruktér a architekt Pier Luigi Nervi. Dvě jeho stavby jsou na obrázku 14, vlevo je část konstrukce výstavního paláce v Turíně *Palazzo per esposizioni salone B* z roku 1949 a vpravo sídlo UNESCO v Paříži dokončeno roku 1958, na kterém spolupracoval s Marcelem Breurem. [18]



Obrázek 14: Nerviho stavby z let 1949 a 1958 [24] [25]

I když se nové technologie dále vyvíjely, zájem o betonové skořepiny celosvětově upadl, a to především kvůli vysokým nákladům na stavbu, ocelové konstrukce s moderními způsoby svařování byly mnohem snazší na provedení. [18]

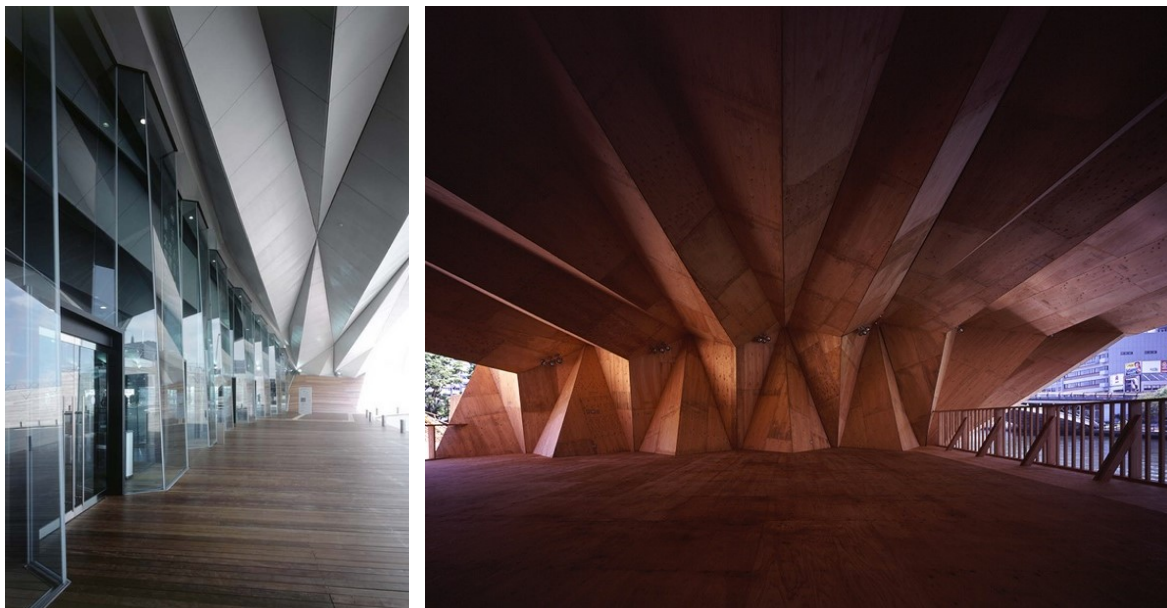
Stavba na obrázku 15 sice není betonová, ale i tak je velmi zajímavá pro tuto práci. Renzo Piano v roce 1966 navrhl kryt pro těžbu a zpracování síry, tato stavba, je velmi zajímavá pro vývoj tohoto typu architektury. Válcová klenba se skládá z opakujících se panelů ohnutých ve své diagonále, tvořících diamantový origami vzor. Panely jsou vyrobeny z průsvitného plastu vyztuženého vlákny (fibre reinforced polymer). [26] [27] [18]



Obrázek 15: Pohyblivý kryt z roku 1966 [26]

### 2.2 MODERNÍ KONSTRUKCE A SOUČASNÝ VÝVOJ

Se současnou technikou se možnosti prolamovaných konstrukcí velmi rozšiřují, CNC stroje dokáží rychle a levně vytvořit rovinné bednění pro jakékoli tvary, tím pádem je možné vytvářet nové, neopakující se vzory. Zároveň efektivita konstrukcí se dá s dnešní technikou velmi dobře optimalizovat. Ač není v současné době velkých projektů splňujících parametry betonového origami, výzkum stále probíhá a origami tvary stále inspirují architekturu. Na obrázku 16 vlevo je stavba Yokohama International Passenger Terminal od architektonické firmy Foreign Office Architects se systémem prolamovaných ocelových plechů a betonových nosníků, dokončen roku 2002. Vpravo je dřevěný pavilon v Ósace z roku 2008 od Ryuichi Ashizawi Architects. [18] [28] [29]



Obrázek 16: Moderní využití origami tvarů [28] [29]

Mnoho univerzitních týmů prozkoumává dále možnosti výroby betonového origami. Například Martin Bechtold z Harvardské univerzity postavil v roce 2006 experimentální origami oblouk (obrázek 17) na rozpětí 6,5 m při tloušťce desek 20 mm. Trojúhelníkové vláknobetonové desky byly vybetonovány v ploše, poté zvednuty do finální podoby. Vlákna vyčuhující z betonu byla navzájem slepena a celý oblouk byl v daném tvaru zmonolitněn. Dále navrhuje využití ocelového bendění s magneticky fixovanými okraji pro možnosti výroby různých panelů. [18]

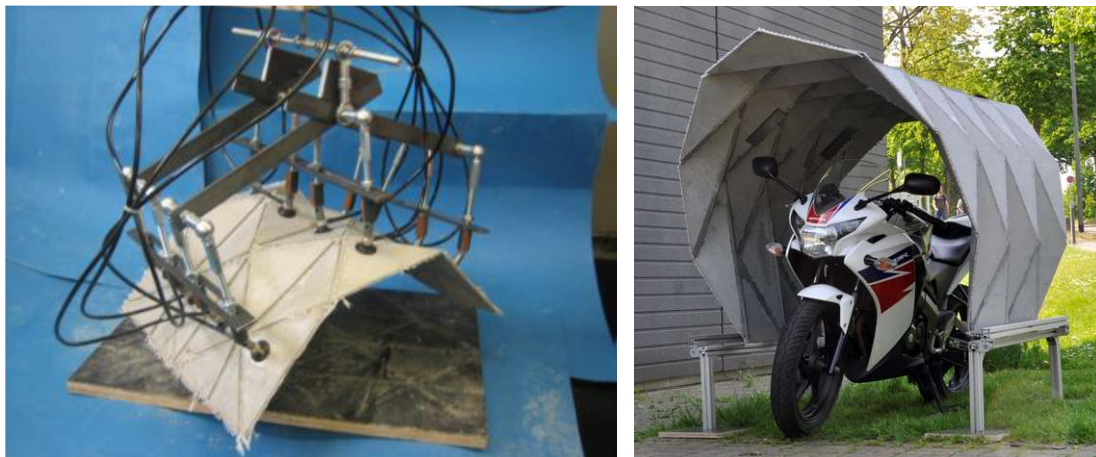


Obrázek 17: Projekt z Harvardské univerzity [30]

Na univerzitě v Cáchách Rostislav Chudoba, Jan Dirk van der Woerd a Josef Hegger vyvíjeli od roku 2011 do roku 2017 systém origami betonových konstrukcí, testovali různé způsoby výstavby, například skládání mechanickým jeřábem (na obrázku 18 vpravo), ale také věšení desek spojených textilií vzhůru

## 2 Origami konstrukce

nohama a zmonolitnění zálivkou. Výstupem byly většinou menší přístřešky, takovéto konstrukce se pak hodí i jako ztracené bednění. [31]



Obrázek 18: Vývoj betonových origami konstrukcí na univerzitě v CÁCHÁCH [31]

[32]



### 3 VLASTNÍ NÁVRH ORIGAMI KONSTRUKCE

Třetí kapitola má za cíl důležitou část diplomové práce, a to nalézt využití betonové origami konstrukce a navrhnout a realizovat její model. Zmenšené měřítko modelu dovoluje vyzkoušet celý výrobní proces v omezeném čase.

Tato část, nemá lineární průběh, je třeba navrhnout způsob výroby. Pro ověření technologických postupů a materiálu budou sloužit zkušební konstrukce nebo jejich části, tento zkušební proces se může i opakovat, dokud není docíleno kýženého výsledku. Cílem tohoto iterativního postupu je najít možné využití origami tvarů k vytvoření zajímavé betonové konstrukce. Úvodní návrhy designu probíhají v počítači za pomoci 3D CAD programu i ručních modelů (viz obrázek 19), technologický postup se zkouší v laboratoři na reálných částech konstrukce.

Celou tuto kapitolu doprovázejí vlastní fotky modelů, postupu výroby konstrukce a výstupy z programů.



Obrázek 19: Vlastní modely pro úvodní zkoumání origami tvarů

### 3.1 SOUTĚŽNÍ MODEL

Každý rok se v Maďarsku koná soutěž *Hungarian Concrete Canoe Cup*, ta slouží nejen k měření sil mezi vysokými školami zabývajícími se vývojem kompozitních materiálů a konstrukcí z nich. Soutěž slouží i k navázání mezinárodních kontaktů. Fakulta stavební ČVUT je pravidelným účastníkem této mezinárodní soutěže a i letos (2019) vyvinul student FSV v rámci své diplomové práce novou kánoi, se kterou se bude opět závodit.

Součástí *Hungarian Concrete Canoe Cup* je též soutěž *Concrete bridge! 4.0*, kde mohou studenti porovnat své schopnosti ve výstavbě modelů mostů, nikdo z FSV se však nikdy předtím této soutěže nezúčastnil. Můj návrh origami konstrukce proto bude dodržovat pravidla soutěže a výsledkem bude origami model mostu, který bude soupeřit s ostatními na soutěži.

Tento model však nebude jediným modelem postaveným v laboratořích Fakulty stavební, který pojede na soutěž do Maďarska. Studenti Střední průmyslové školy stavební v Dušní ulici, kteří docházejí na FSV v rámci spolupráce obou škol, staví současně s tímto modelem vlastní most, se kterým budou rovněž soutěžit. To dodává oběma projektům čerstvé nápady a vzájemnou podporu.

#### PRAVIDLA SOUTĚŽE

CÍL: Konstrukce, která překlene co největší rozpon a přenese co největší zatížení

OMEZENÍ: Maximální váha 80 kg  
Minimální zatížení 75 kg  
Minimální šířka 30 cm  
Pochozí povrch, po kterém je schopen přejít člen týmu

HODNOCENÍ: Vyhrává most, který přenese největší ohybový moment

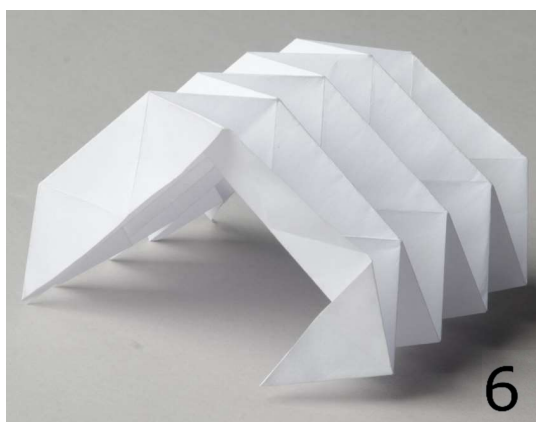
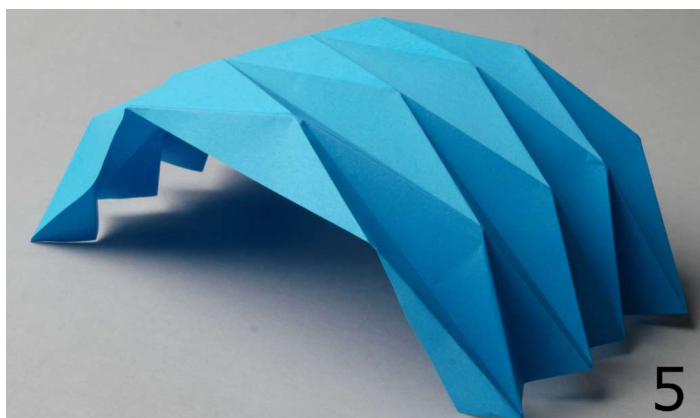
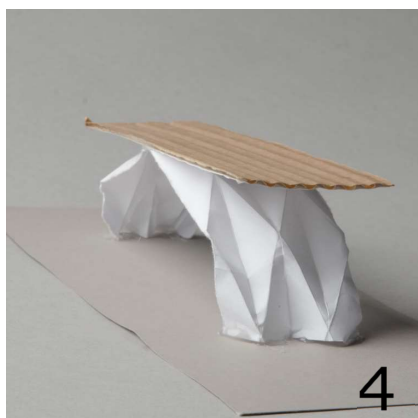
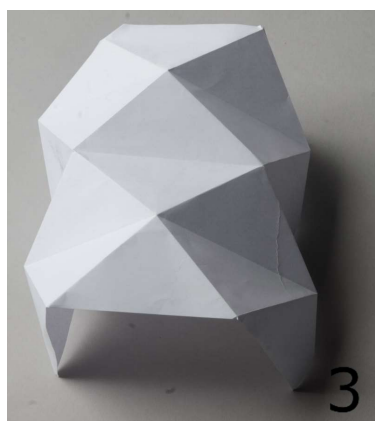
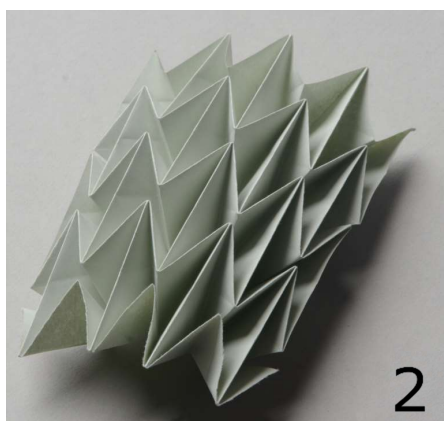
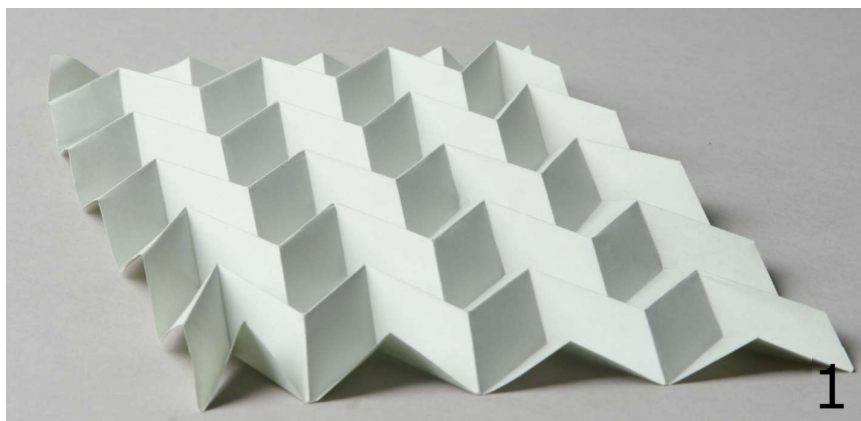
- MATERIÁL:** Cementové pojivo  
Maximální délka vlákna 6 cm  
Bez použití syntetických pryskyřic
- PRŮBĚH SOUTĚŽĚ:** Model se zvaží, postaví se na betonové nosníky 15x15x60 cm, vzdálenost vnitřních líců těchto nosníků se změní a tento rozměr je považován za rozpětí konstrukce. Dále se konstrukce zatíží 75 kg zavěšením nádrže o objemu 1 m<sup>3</sup> přes příčník umístěný na konstrukci pořadatelem, od této chvíle se zvyšuje zatížení napouštěním zavěšené nádrže až do kolapsu.

[33] Podrobnější znění pravidel v příloze 1 této diplomové práce.

## 3.2 ÚVODNÍ NÁVRHY

Úvodní myšlenky se točily okolo skládání teselací, které tvoří obloukovitý tvar. Obloukovitý tvar je vybrán, jelikož je velmi dobře využitelný pro různé konstrukce například lavičky, malé přístřešky jako třeba zastávky a v neposlední řadě i mosty. Tyto teselace mají tu výhodu, že jsou složené z jednoho kusu papíru, tím pádem otevírají všemožné způsoby výstavby. Byly skládány však nejen obloukové (obrázek 20: 3–7), ale i plošné (20: 1,2), například variace známé Miura Ori teselace (20: 1, kapitola 1.2 Znamé vzory). To proto, aby byly prozkoumány různé tvary, které by mohly sloužit jako inspirace pro celou konstrukci či její část.

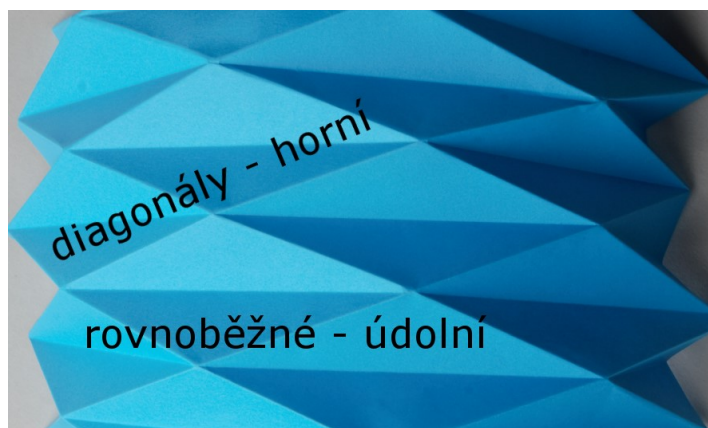
3 Vlastní návrh origami konstrukce



Obrázek 20: Fotky úvodních návrhů

Z brainstormingu vyšel požadavek na jednoduchost, opakovatelnost vzoru, proto byl zvolen pro další postup diamantový vzor (také Yoshimurův vzor). Tento vzor je pravidelný, skládá se z opakujících se rovnoramenných trojúhelníků, a to tak že všechny diagonály tvoří horní sklady a „rovnoběžné“ přehyby tvoří sklady údolní, jak je znázorněno na obrázku 21. Takováto klenba má jeden stupeň volnosti a je rozložitelná i složitelná do roviny.

[34]



Obrázek 21: přehyby diamantového vzoru

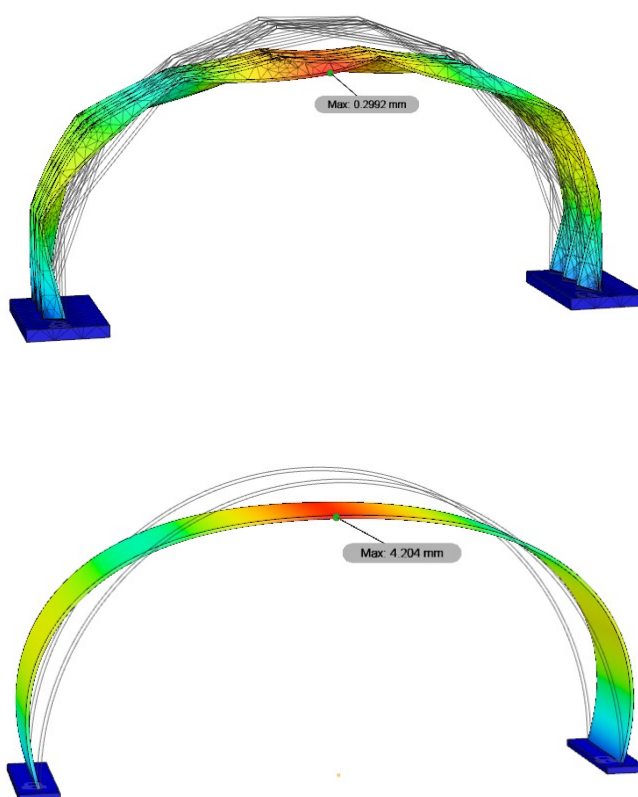
Vybraný model tvoří pouze kruhový oblouk, tvar oblouku lze upravit změnou velikosti trojúhelníků, avšak tato práce si dává za úkol nalézt jednoduché řešení i pro výrobu, tak dává přednost uniformitě. To stejné platí pro tloušťku konstrukce, celý oblouk bude proveden z jednotné tloušťky.



Obrázek 22: Návrh klenby s diamantovým vzorem

Tuhost klenby z diamantového vzoru byla porovnána s klasickou kruhovou klenbou v rychlém experimentu v programu Autodesk Fusion 360. Byl proveden lineární výpočet. Při kterém byly porovnávány dvě klenby s rozpětím 4,5 m a šířkou 0,9 m. Obě klenby byly vyrobeny ze stejného objemu betonu: Zatímco origami klenba (obrázek 23 nahoře) má tloušťku desek 20 mm (celková konstrukční tloušťka konstrukce je 170 mm) se prohne pod vlastní tíhou 0,3 mm, klasická klenba stejného objemu (23 dole) má tloušťku 26,5 mm a prohne se o 4,2 mm, tedy 14x tolik. Aby byl dosažen stejný poměr vlastní váhy a tuhosti konstrukce, musela by být klasická klenba tlustá 67,5 mm, to znamená využít 2,5x více materiálu.

Z tohoto výpočtu plyne výhoda origami konstrukcí, které při zachování subtilnosti konstrukce mají výrazně vyšší tuhosti než běžné tenkostěnné konstrukce rovinného průřezu.



Obrázek 23: Výsledek porovnání tuhostí

### 3.3 VÝSLEDNÝ NÁVRH SOUTĚŽNÍHO MODELU MOSTU

Jako průnik pravidel soutěže s tématem této práce byl navrhnout model, který vypadá efektně, a přitom je dostatečně tuhý, aby splnil podmínky soutěže. Origami oblouk, popsáný v kapitole 3.2, z desek tloušťky 20 mm tvoří půlkruhovou klenbu (obrázek 24: šedá barva) a podepírá mostovku (24: zelená barva), která je položena na jeho vodorovné části. Mostovku je dále třeba podepřít podporami (24: červené části), které jsou opřeny o oblouk a navazují na výstupky v mostovce.



Obrázek 24: Návrh designu soutěžní konstrukce

#### 3.3.1 MATERIÁL

Materiál byl omezen pravidly soutěže, maximální délka vlákna je omezena na 6 cm a klasická tuhá výztuž je zakázána. Velikost kameniva a konzistence čerstvého betonu se podřídily způsobu betonáže (popsáno v kapitole 3.4). Pro výrobu soutěžní konstrukce byl upraven vláknobeton, jehož složení bylo použito v minulosti na výrobu betonové kánoe. Tento vláknobeton má pevnost v tahu  $f_{ctm}$

= 8,12 MPa. Byla použita PVA vlákna MasterFiber 401 délky 12 mm od firmy BASF. Pro snadnější probetonování byla přidána superplastifikační přísada Stachema 2000.

[35] [36] [37]

SLOŽENÍ SMĚSI			
	Objem	1	l
1	CEM I 42,5 R	600	g
2	Mikrosilika	100	g
3	Vápenec	150	g
4	Voda	210	g
5	Kamenivo	0 - 0,25	150 g
		0,1 - 0,5	500 g
		0,4 - 0,85	200 g
		0,5 - 1,0	100 g
6	Plastifikátor	30	g
7	PVA vlákna	10	g

Tabulka 01: Složení použité betonové směsi

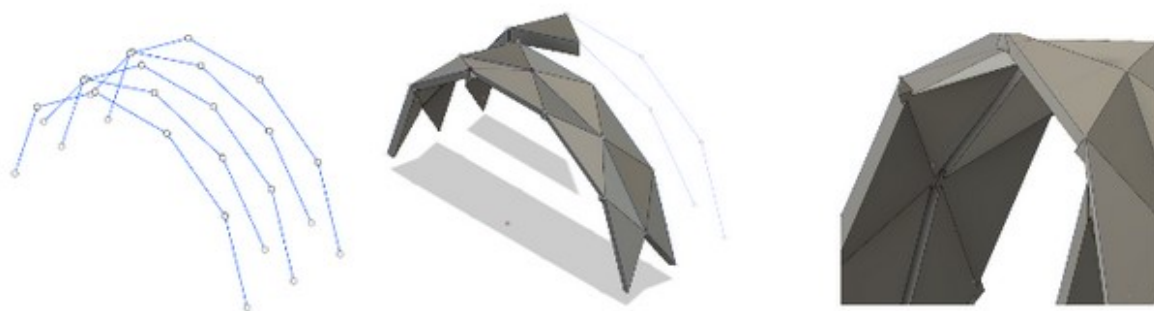
#### 3.3.2 MODEL

Pro optimalizaci rozměrů konstrukce modelu byl využit program Fusion 360 od společnosti Autodesk, byl zvolen proto, že v něm lze 3D konstrukce modelovat jak grafickým způsobem, tak matematicky, a protože je zdarma.

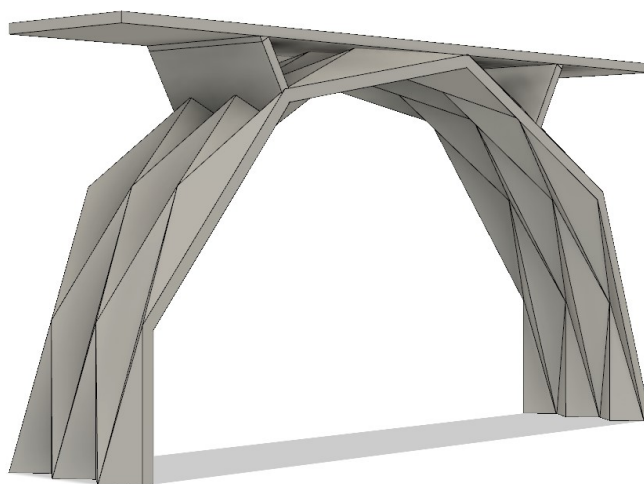
V programovacím jazyce Python byly matematicky zadány body konstrukce a implementovány do grafického prostředí programu (obrázek 25 vlevo), odtud byly dále modelovány plochy konstrukce čistě graficky, jejich tloušťka byla zadána parametrem pro dodatečné úpravy.



### 3 Vlastní návrh origami konstrukce



Obrázek 25: Postup modelování

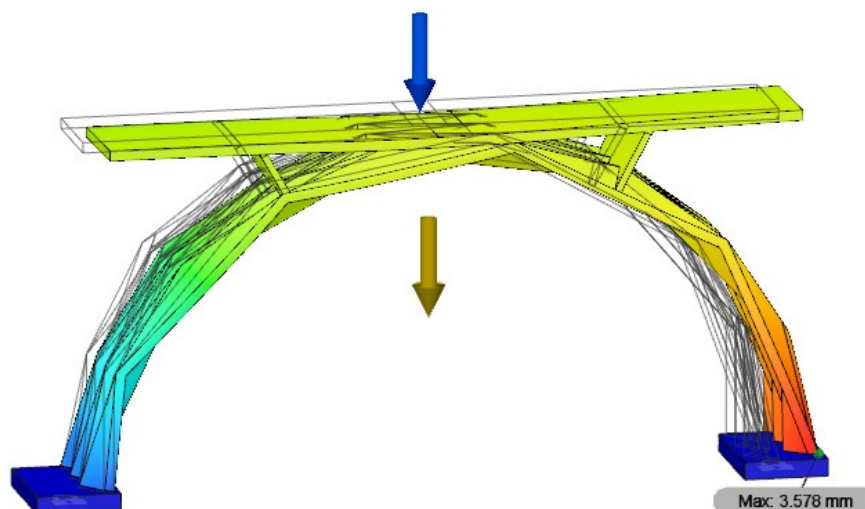


Obrázek 26: Hotový model

Program má mimo jiné implementované materiálové vlastnosti i lineární analýzu modelů. Na základě analýzy byla modifikována tloušťka a rozpětí modelu tak, aby hotový model odpovídal váhovému limitu a to takto:

	Tloušťka	Váha
Oblouk	20 mm	45,1 kg
Mostovka	20 mm	23,4 kg
Vzpěry	20 mm	2 x 1,8 kg
Celkem		72,1 kg

Tabulka 02: Předpokládané tloušťky a váhy modelu



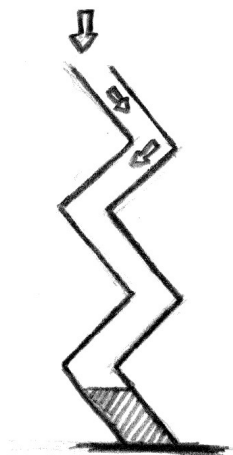
Obrázek 27: Deformace modelu zatížená základním zatížením soutěže

Rozpětí modelu bylo zvoleno 1,5 m proto, aby maximální vnitřní síly odpovídaly zatížení konstrukce při soutěžním zatěžování. Na obrázku 27 je znázorněna deformace modelu při zatížení vlastní tíhou a základním soutěžním zatížením soutěže. Model je pouze položen na rovné ploše, posunu podpor tudíž brání pouze tření. To je pro oblouk nevýhodné a snižuje jeho únosnost asi na jednu třetinu oproti uložení se zabráněním posunu podpor. V modelu je to bráno v potaz, jedna podpora je neposuvná, druhá posuvná.

## 3.4 BEDNĚNÍ A BETONÁŽ

Model mostu se skládá ze tří částí, které se budou bednit a betonovat zvlášť. Jedná se o mostovku tvořenou deskou o rozměrech 30 x 160 cm dvě vzpěry a vlastní oblouk origami tvaru, viz tabulka 02 na straně 33. Způsob výroby a betonáže byl zvolen tak, že se každý komponent bude betonovat zvlášť a poté se složí pouze na dotyk a zajistí se čepy. Deska a vzpěry se budou betonovat jako běžné deskové konstrukce naležato za použití vibračního stolu. Problematická je betonáž oblouku, vzhledem k jeho členitosti byla zvolena

betonáž z boku mostu. Oblouk se položí na bok, vyrobí se tedy vnitřní i vnější kus bednění a beton se vlije mezi ně, viz obrázek 28.



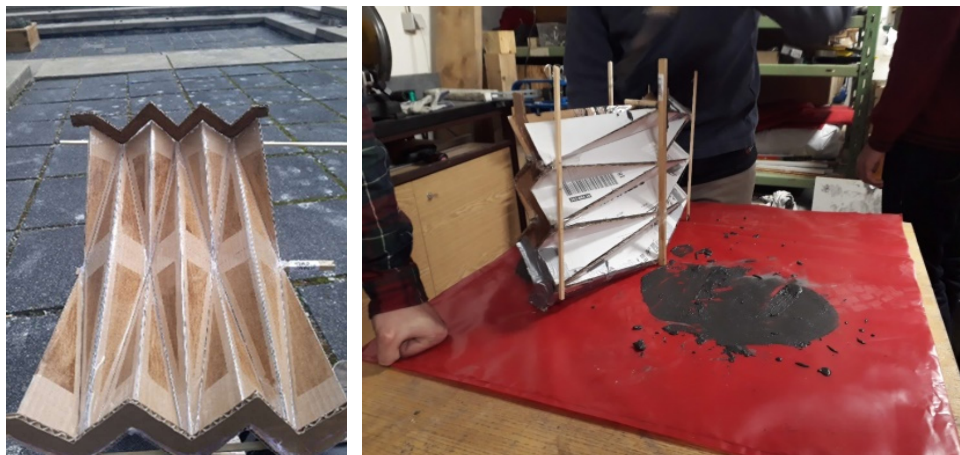
Obrázek 28: Způsob betonáže oblouku

Takovýto způsob betonáže je náročný, aby byla zajištěna probetonovatelnost takového bednění, byla směs vyzkoušena do bednění části konstrukce tak, jak je popsáno v následujících kapitolách.

#### 3.4.1 PAPIROVÉ ZKUŠEBNÍ BEDNĚNÍ

Pro rychlé vyzkoušení jak betonové směsi, tak i vhodnost způsobu výstavby bednění, byl vyroben model jedné pětiny oblouku, jeho rozměry byly mírně zmenšeny. Kartonové rovnoramenné trojúhelníky se základnou o délce 44 cm a výškou 6 cm byly spojeny lepicí páskou a natřeny lakem, aby byly odolné vodě. Následně byly vnitřní a vnější díl spojeny dohromady a zajištěny dřevěnými vzpěrami, jak je vidět vpravo na obrázku 29.

### 3 Vlastní návrh origami konstrukce



Obrázek 29: První experimentální betonáž do kartonového bednění

Směs po přidání plastifikátoru byla dostatečně tekutá, probetovatelnost tohoto tvaru by se dala označit za velmi dobrou. Bednění však nebylo dostatečně vyztuženo a pod nápořem betonu se nafouklo a na některých místech dokonce protékalo. Ač se bednění podařilo utěsnit, výsledný betonový vzorek byl tlustší, než by měl být a předem připravený objem betonu dosáhl pouze asi do dvou třetin výšky připraveného bednění. Z tohoto důvodu byl vyroben ještě jeden zkušební vzorek do tužšího, dřevěného bednění.



Obrázek 30: Betonový vzorek z papírového bednění

### 3.4.2 DŘEVĚNÉ ZKUŠEBNÍ BEDNĚNÍ

To, že je vzor rozložitelný do roviny, vychází vstříc výrobním požadavkům. Znamená to například, že při výrobě bednění lze vše vyřezat z jednoho kusu bez sebemenšího odpadu mezi dílci, jak je vidět na následujícím obrázku.

Jako další způsob testování výroby bylo sestaveno bednění 1/10 konstrukce oblouku z materiálu, ze kterého je naplánováno postavit i bednění finální, tedy z překližky tloušťky 5 mm. Bednění bylo sestaveno a pomocí tavné pistole bylo slepeno dohromady, dále bylo nalakováno, zajištěno příčnicí proti tlaku betonu a úspěšně vybetonováno. Vzorek byl vibrován pouze ručně, a to jemným třesením celého bednění, celý postup je znázorněn na obrázku 31



Obrázek 31: Skládání bednění a betonáž

### 3 Vlastní návrh origami konstrukce

Výsledek byl velmi dobrý, dřevěné bednění odolalo tlaku betonu a hotový vzorek je tak tenký, jak bylo předpokládáno. Hrubý odhad množství betonu vedl k tomu, že beton dosáhl asi 2 cm pod okraj bednění a takto vybetonovaný vzorek vážil necelé 4 kg, to odpovídá odhadu, že celá konstrukce (tato část je jedna desetina) má vážit 45 kg.

Na rozdíl od předešlého vzorku, kde na povrchu byly velké bubliny (viz obrázek 30 na straně 36) povrch tohoto dílce je již mnohem lepší (viz obrázek 32). Jsou zde pouze drobné bubliny na povrchu těch stěn, které brání vzduchu v prostupu k povrchu.



Obrázek 32: Hotový produkt

### 3.4.3 FINÁLNÍ VERZE BEDNĚNÍ

Poté co, byl shledán způsob výroby bednění a jeho betonáže vhodný, bylo postaveno finální bednění oblouku. Vnější bednění se skládá z 50 trojúhelníků z překližky tloušťky 5 mm s délkou základny 547,0 mm a výškou 77,5 mm a vnitřní oblouk z 50 trojúhelníků s délkou základny 528,5 mm a shodnou výškou 77,5 mm.

Nejdříve byl vyroben vnitřní díl za pomoci tavného lepidla, ten poté posloužil jako vzor pro vnější část bednění, která byla stavěna přímo na vnitřní části pro zachování „stejnosti“ (viz obrázek 33 na straně 40). Celková plocha dřevěného bednění je asi 2 m<sup>2</sup>, sestavit a slepit bednění trvalo 4 dny, poté ve dvou týdnech pokračovaly dokončovací práce na bednění, jako natírání či spárování mezer mezi díly bednění.

Bednění bylo dále natřeno neutrálním jednosložkovým rozlivovým tmelem Lukopren S 3782, který zabrání dřevu nasákat vodu, zároveň zatírá drobnější mezery v bednění a vytváří velmi hladký, snadno odbednitelný povrch. Větší otvory v bednění byly utěsněny univerzálním silikonem. (viz obrázek 34 na straně 41)

### 3 Vlastní návrh origami konstrukce



Obrázek 33: Sestavování bedněří



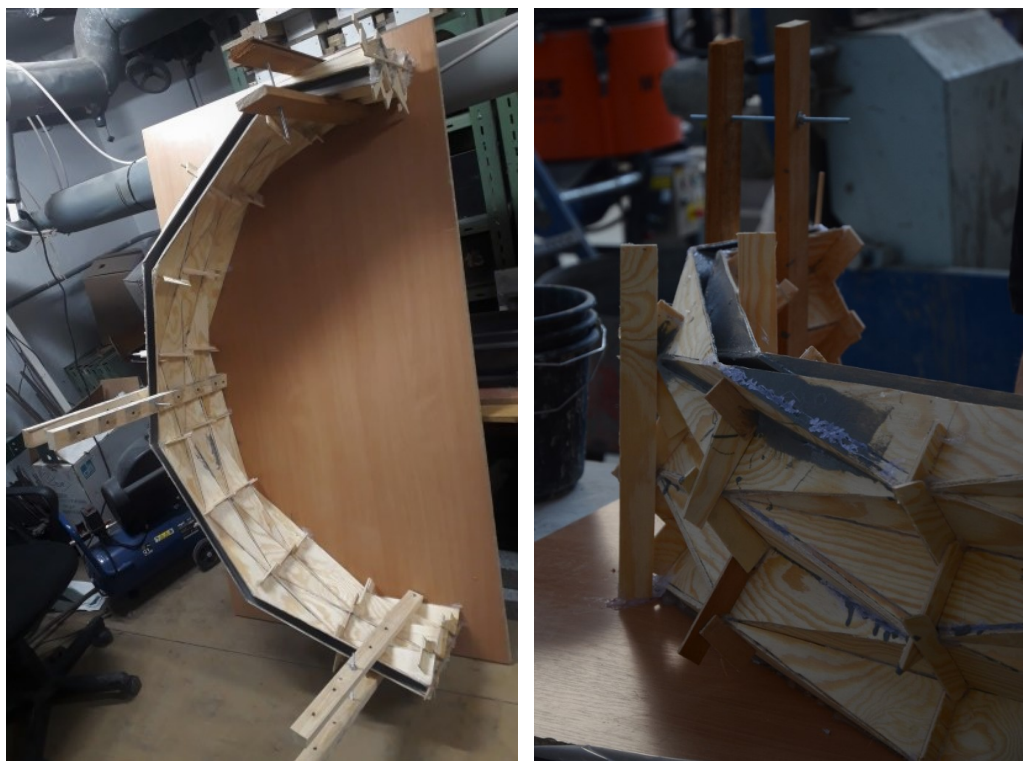
### 3 Vlastní návrh origami konstrukce



Obrázek 34: Nátěr povrchu

### 3 Vlastní návrh origami konstrukce

Bednění bylo natřeno separátorem, umístěno na dřevěnou desku a zajištěno proti tlaku betonu třemi dvojicemi latí přivrtaných do desky, nahoře spojených závitovou tyčí. Styk bednění a podkladní desky byl vyspárován univerzálním silikonem. Spolu s obloukovou částí mostu bylo připraveno i bednění pro mostovku (viz obrázek 37), vybetonování vzpěr bude probíhat až v další fázi po zaměření přesnosti vybetonovaného oblouku.



Obrázek 35: Připravené bednění

Bylo umícháno celkem 37 l betonu, nejprve byl vybetonovaný oblouk. Vzhledem k tlaku betonu na bednění bylo zjištěno, že ztužení bednění nebylo dostatečné a bednění se mírně roztáhlo, jeden z trojúhelníků dokonce odskočil a začal beton vytékat, vše bylo však záhy napraveno pomocí vrutů. Vibrování při betonáži probíhalo příložnými vibrátory, avšak po naplnění bednění se již nevíbrovalo kvůli nedostatečné tuhosti bednění.



Obrázek 36: Betonáž oblouku v dílnách FSv



Obrázek 37: Betonáž mostovky v dílnách FSv

Jeden den po betonáži byly obě části konstrukce odbedněny. Odbednit oblouk tak, aby bednění zůstalo v jednom kuse, nebylo možné, proto bylo bednění rozloženo zpět na trojúhelníky.



Obrázek 38: Odbedňování

Hotový oblouk váží 56,5 kg, to je sice více než předpokládaných 45 kg, ale uspokojující v rámci pravidel soutěže (maximální celková váha mostu 80 kg). Mostovka byla vybetonována s tloušťkou cca 1,2 cm a váhou 14,5 kg, byla však při odbedňování zlomena, bude tak vybetonována znovu s větší tloušťkou.

Po vybetonování oblouku byl zaměřen jeho přesný tvar v místě dosedání podpor a bylo vyrobeno bednění podpor tak, aby odpovídalo jeho tvaru (viz obrázek 39 vlevo). Podpory pak byly vybetonovány společně s druhou mostovkou.



Obrázek 39: Vzpěry a jejich bedně

#### 3.4.4 VYHODNOCENÍ MODELU

Model byl úspěšně vybetonován a sestaven, s váhou vyhovující pravidlům soutěže (viz tabulka 03).

	Tloušťka	Váha
Oblouk	cca 25 mm	56,5 kg
Mostovka	19–20 mm	21,0 kg
Vzpěry	10–11 mm	2 x 1 kg
Celkem		79,5 kg

Tabulka 03: Výsledné tloušťky a váhy modelu

Model nyní čekají drobné vizuální úpravy a bude připraven na mezinárodní soutěž v Maďarsku. Hotový oblouk je vidět na obrázku 40, tloušťka oblouku osciluje okolo 25 mm, tato větší tloušťka oblouku dodává tuhost namáhané konstrukci, zatímco tenčí ostatní prvky snižují celkovou váhu modelu. Sestavení celého modelu je zachyceno na obrázku 41 a hotový model je pak na obrázku 42. Výsledné rozměry jsou dodrženy, oblouk má vnitřní rozpětí cca 140 cm a výšku necelých 80 cm.



Obrázek 40: Hotový origami oblouk



Obrázek 41: Sestavení mostu a detail napojení



Obrázek 42: Sestavený model mostu



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat vývoj a současný stav betonových origami konstrukcí a následně navrhnout a postavit vlastní konstrukci podobného charakteru. Pro vlastní návrh jsem si vybral model mostu, který po skončení semestru bude soutěžit v mezinárodní soutěži v Maďarsku s ostatními vláknobetonovými modely.

Diplomová práce zahrnovala komplexní přístup k řešení návrhu, který probíhal od úplného začátku návrhu designu stavby až po konečné úpravy hotového modelu. Vlastnoručně jsem vyráběl papírové origami modely, dále jsem návrh ověřil pomocí lineární analýzy v softwaru.

Způsob betonáže byl upraven s ohledem na specifika modelu, na potřebnou rychlost výstavby a požadovanou tuhost konstrukce. Dříve než se započalo s výstavbou hotového modelu, provedl jsem dvě testovací betonáže na částech konstrukce, aby byl tento postup ověřen. První experimentální test byl proveden do bednění z kartonu, druhým byl úspěšně ověřen způsob výstavby bednění z dřevěné překližky.

Po provedení zkušebních betonáží byly vybetonovány všechny komponenty modelu a sestaveny dohromady, model je připraven na závody v Budapešti v červnu 2019.

## LITERATURA

- [1] ELSO, Diego. Auditorio de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife, España. In: <https://commons.wikimedia.org/> [online]. 2012 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Auditorio\\_de\\_Tenerife,\\_Santa\\_Cruz\\_de\\_Tenerife,\\_Espa%C3%B1a,\\_2012-12-15,\\_DD\\_02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Auditorio_de_Tenerife,_Santa_Cruz_de_Tenerife,_Espa%C3%B1a,_2012-12-15,_DD_02.jpg)
- [2] ENGEL, Peter. *Origami from angelfish to Zen*. New York: Dover Publications, 1994. ISBN 978-0486281384.
- [3] BURI, Hans Ulrich. *Origami - Folded Plate Structures*. Route Cantonale, 1015 Lausanne, Suisse, 2010. Disertace. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [4] POMA, Flavia. *On the Flat-Foldability of a Crease Pattern* [online]. 2009 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://poisson.phc.dm.unipi.it/~poma/Ffcp.pdf>. Università di Pisa.
- [5] DEMAINE, Erik. *6.849 Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Fall 2012. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>. License: Creative Commons BY-NC-SA.
- [6] Gaussova a střední křivost plochy. <https://www.fd.cvut.cz/> [online]. Praha [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/Diffgeometry/MapleNET/10\\_gauss.html](https://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/Diffgeometry/MapleNET/10_gauss.html)
- [7] KOLÁŘOVÁ, Dana. Teselace rovinné i prostorové. <https://www.fa.cvut.cz/cs> [online]. Praha: FA ČVUT v Praze [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [http://15122.fa.cvut.cz/?download=\\_\\_/elektronicka\\_skripta/teselace-kolarova.pdf](http://15122.fa.cvut.cz/?download=__/elektronicka_skripta/teselace-kolarova.pdf)
- [8] The Mathematics, Laws and Theory Behind Crease Patterns. *Origami.me* [online]. 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://origami.me/crease-pattern-theory/>
- [9] YUTAKA, Nishiyama. MIURA FOLDING:APPLYING ORIGAMI TO SPACE EXPLORATION. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* [online]. 2012, **2012**(Volume 79 No. 2), 269 - 279 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://ijpam.eu/contents/2012-79-2/8/8.pdf>
- [10] ZHONG, You a Kuribayashi KAORI. *A NOVEL ORIGAMI STENT* [online]. Summer Bioengineering Conference, Florida, 2003 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.organicorigami.com/thrackle/class/hon394/papers/OrigamiStent.pdf>

- [11] MANUFACTURING ORIGAMI STENT GRAFT. *Oxford University Research Archive* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a2a7d876-a1b5-4509-9ca5-0b8bd86da360/download\\_\\_file?safe\\_\\_filename=kurib\\_\\_chapter6\\_\\_part1.pdf&file\\_\\_format=application%2Fpdf&type\\_\\_of\\_\\_work=Thesis](https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a2a7d876-a1b5-4509-9ca5-0b8bd86da360/download__file?safe__filename=kurib__chapter6__part1.pdf&file__format=application%2Fpdf&type__of__work=Thesis)
- [12] TURNER, Nicholas, Bill GOODWINE a Mihir SEN. A review of origami applications in mechanical engineering. *Mechanical Engineering Science* [online]. **2016**(Vol. 230(14), 2345–2362 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0954406215597713>
- [13] WEINA, Wu a You ZHONG. A solution for folding rigid tall shopping bags. *The Royal Society* [online]. **2011** [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.2011.0120>
- [14] HOBERMAN, Charles. *Reversibly expandable three-dimensional structure*. USA. 4,780,344.
- [15] TACHI, Tomohiro. *Rigid-Foldable Thick Origami* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://origami.c.u-tokyo.ac.jp/~tachi/cg/ThickRigidOrigami\\_\\_tachi\\_\\_5OSME.pdf](http://origami.c.u-tokyo.ac.jp/~tachi/cg/ThickRigidOrigami__tachi__5OSME.pdf)
- [16] <https://i.pinimg.com/564x/c3/1c/93/c31c9325674ee1287f749d444fda09e4.jpg>
- [17] VRÁBLÍK, Lukáš. [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrabluk/Prednasky/B03CK\\_\\_3-Skorepinove\\_\\_konstrukce.pdf](http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrabluk/Prednasky/B03CK__3-Skorepinove__konstrukce.pdf)
- [18] BECHTHOLD, Martin. *Innovative surface structures: technology and applications*. New York: Tylor and Francis, 2008. ISBN 978-0-415-41966-6.
- [19] [online]. In: . TORROJA INGENIERÍA SL [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.torrojaingenieria.es/TRABAJOS/EDIFICIOS/9510-MERCADO%20ALGECIRAS%20DESCRIPCION/ENGLISH%20PAPER/EP-9510-MERCADO%20ALGECIRAS%20DESCRIPCION.pdf>
- [20] Pantheon: By Roberta Dragan - Own work, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1597477>
- [21] Algeciras: YOSHITO, Isono. Image No. 52777. In: *Structurae* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://structurae.net/photos/52777-algeciras-market-hall>

- [22] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Dome\\_\\_Jena\\_\\_UnderConstruction.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Dome__Jena__UnderConstruction.jpg)
- [23] <http://arquiscopio.com/archivo/2013/02/02/hangares-para-dirigibles-de-orly/?lang=de>
- [24] <http://anengineersaspect.blogspot.com/2009/10/22-pier-luigi-nervi-structures-on.html>
- [25] <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIAB/CIAB8/paper/viewFile/7424/3428>
- [26] Renzo Piano's 1966 Sulfur Extraction Facility. *Composites and Architecture* [online]. Composites and Architecture, 2012 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://compositesandarchitecture.com/?p=100>
- [27] MESNIL, Romain. *Structural explorations of fabrication-aware design spaces for non-standard architecture*. Paříž. Disertační. UNIVERSITE PARIS-EST École doctorale Science, Ingénierie et Environnement.
- [28] LANGDON, David. AD Classics: Yokohama International Passenger Terminal / Foreign Office Architects (FOA). *ArchDaily* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/554132/ad-classics-yokohama-international-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa>
- [29] ASHIZAWA, Ryuichi. BAMBOO FOREST & HUTS WITH WATER 水都大阪 2009 - 水辺の文化座- Aqua Metropolis Osaka 2009. RAA [online]. 2009 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.r-a-architects.com/prj/2009/bambooforest.html>
- [30] <https://www.gsd.harvard.edu/project/concrete-origami-1/>
- [31] VAN DER WOERD, Jan Dirk, Rostislav CHUDOBA a Josef HEGGER. Single-curved shell structure made out of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: *Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013*.
- [32] CHUDOBA, Rostislav a Jan Dirk VAN DER WOERD. Thin-walled folded plate structures made of cementitious composites. *Institute of Structural Concrete* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.imb.rwth-aachen.de/en/research/finished-projects/231-thin-walled-folded-plate-structures>
- [33] *BETONKENU KUPA* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.betonkenu.hu/versenykiirasrules/>
- [34] WOERD, Jan, Rostislav CHUDOBA a Josef HEGGER. *Single-curved shell structure made out of textile-reinforced concrete plate using a folding technique*. In: . 2013.

- [35] ŠONKA, Štěpán. *Návrh technologie výroby pro betonové kánoe*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [36] *BASF - MasterFiber 401* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://assets.master-builders-solutions.basf.com/cs-cz/basf-masterfiber-401-tl.pdf>
- [37] *Technický list Stachement 2000* [online]. 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/files/files/TL-Stachement-2000.pdf>

# PŘÍLOHY

## PŘÍLOHA 1: VÝŇATEK Z PRAVIDEL BETONKENU KUPA

Date of event: **21 JUNE 2019**

Venue: Budapest, Kopaszi-gát

The planned distance of concrete canoe rowing race: **approx. 200 m**

Planned number of concrete canoe events: **4 (2 Men, 1 Mixed Gender and 1 Women)** Completion of events according to attached courses. Please see Appendix 1.

...

### 2. Concrete bridge! 4.0

The teams should make a concrete object with the aim of bridging the longest distance possible. The bridge is not to weigh more than 80 kg and it must withstand the pressure of a 75kg load placed in its middle without collapsing.

The basis of the evaluation of the bridges will be the magnitude of torque measured from the distance between the points of support and the biggest load endurance in the middle while intact.

The length of the bridge is the distance between the two concrete beams: 250 cm

Minimum width should be 30 cm, its height/thickness can be of the creators' choice. With regard to form, it is a requirement that it must have a walking surface where a member of the team can walk through between the pillars, also the structure will be loaded in the middle of this walking surface.

#### Rules:

The material is cement bound. Only materials with a maximum fibre length of 6cm can be used for making the bridge. Only cement bound materials can be used for repairs and adhesion. The synthetic resin must not be used for the making or assembling of the bridge.

The loading test happens with the following method: the ends of the bridge need to be placed onto 15x15x60 concrete beams the distance between which is variable.

The length of the bridge is the distance between the two concrete beams, measured to the centimetre. Having ascertained the length, the load test follows, during which the organizers place a 75 kg load on the centre point of the bridge. Only the bridges that stay standing will be evaluated. Following this test, the team members can constantly increase the load by filling up a water balloon. The increased load will have to be taken note of by the judges. Only registered load, without span change will be taken into consideration by the judges when giving points.

...