

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra betonových a zděných konstrukcí



Diplomová práce

**Návrh technologie výroby a výroba betonových kanoí s využitím digitální
fabrikace**

Production technology for concrete canoes using digital fabrication

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Martin Petřík, Ph.D.
Vypracoval: Bc. Filip Fencel

Praha 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Fencel</u>	Jméno: <u>Filip</u>	Osobní číslo: <u>423193</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí - K133</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Návrh technologie výroby a výroba betonových kanoí s využitím digitální fabrikace</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Production technology for concrete canoes with use of digital fabrication</u>	
Pokyny pro vypracování:	
- návrh tvaru kanoé	
- tvorba 3D modelu jako podklad pro následné programování CNC frézy	
- návrh a výroba bednění s ohledem na odbedňování a nutnost opakovatelného použití bednění	
- návrh betonové směsi a experimentální ověření vlastností navržené směsi	
- výroba kanoí a následné povrchové úpravy	
- časový harmonogram postupu výroby kanoí	
Seznam doporučené literatury:	
- Collepardi, M. (2009). Moderní beton. Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Martin Petřík, Ph. D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>25.2.2019</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>19.5.2019</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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“.</i>	
<u>25.2.2019</u>	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Ing. Martinu Petříkovi, Ph.D. za vedení, rady, jeho pomoc při užívání CNC frézy, poskytnutí pracovního prostoru v dílně katedry a pomoc při betonáži

prof. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D., D.Eng. za rady, pomoc při betonáži a neuvěřitelnou míru dodané motivace

Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za poskytnutí vybavení

Ing. Michaele Frantové, Ph.D. za rady a pomoc při betonáži

Ing. Milanu Zukalovi, Ph.D. za pomoc při testování a vážení jednotlivých kánoi

Prof. Ing. Jaroslavu Pollertovi, Dr.Sc. za poskytnutí pracovního prostoru pro betonáž ve vodohospodářském experimentálním centru katedry hydrotechniky

Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za zapůjčení vybavení

Ing. Štěpánu Šonkovi za rady a zkušenosti z předchozích realizací a pomoc při betonáži

Ing. Vojtěchu Zachardovi za rady a zkušenosti z předchozích realizací a pomoc při betonáži

Ing. Jakubovi Žákovi za rady a zkušenosti z předchozích realizací, pomoc při výrobě 3D modelu a pomoc při betonáži

Ing. Romanu Chylíkovi za pomoc při testování zkušebních vzorků

Ing. Jiřímu Němečkovi, Ing. Stanislavu Zažirejovi, Mgr. Yulii Khmurovské, Ing. Denise Kavanové, Bc. Martinu Salákovi, Marii Husarčíkové a Anežce Paloudové za pomoc při betonáži

Abstrakt

Cílem této práce je návrh a postup pro realizaci sériové výroby betonové kánoe. Při výrobě bude použita CNC obráběcí frézka umístěná na katedře betonových konstrukcí.

Každoročně se po celém světě pořádají univerzitní závody betonových kánoí. Týmy univerzit tak neustále poměřují své síly a schopnosti.

V průběhu této práce bude navržen vhodný tvar kánoe, dále postup pro výrobu a výroba formy pro betonáž, návrh vhodné směsi pro betonáž a celkový technologický postup, který při betonáži bude použit tak, aby bylo možno vyrobit z jedné formy tři kánoe.

Kánoe se v červnu zúčastní univerzitních závodů BETONKENU KUPA v maďarském Györu tak, jako minulý rok. Tehdy jsem sám měl tu možnost si loňskou kánoi vyzkoušet a závodit v ní, proto návrh bude proveden tak, aby byly využity i loňské praktické zkušenosti.

Návrh a výroba kánoe se budou řídit pravidly této soutěže. Práce obsahuje fotodokumentaci všech významných bodů výroby.

Klíčová slova:

Beton, kánoe, digitální fabrikace, opakovatelnost výroby

Abstract

This thesis mainly aims at designing the procedure of manufacturing concrete canoes. It will include the use of a CNC machine located in the department of concrete and masonry structures.

Concrete canoe races take place every year worldwide. It is a great opportunity to measure and compare the skills of students and their universities.

This thesis contains the design of the canoe shape, design of technological process of formwork manufacturing, design of optimal concrete mixture and a global technological design for concreting process itself. The formwork must be used three times, for there are three canoes to make.

The canoes will take part in BETONKENU KUPA race in Hungarian city of Győr for its university organises the race there. I had a chance to take part in those races last year. All acquired experience will be used for this year's design.

The design will be subject to rules of the competition. The thesis contains photodocumentation of the whole manufacturing process.

Keywords:

Concrete, canoe, digital fabrication, repeatability

Obsah

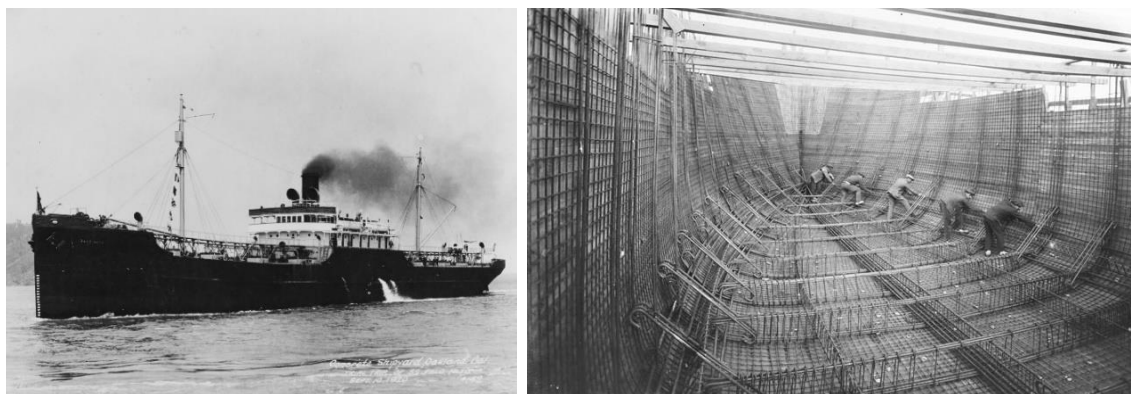
1. Úvod.....	8
2. Návrh tvaru a rozměrů kánoe.....	10
3. Návrh technologie výroby formy.....	13
3.1 Úvod do CNC.....	13
3.2 Vznik (C)NC.....	15
3.3 Výroba kopyta.....	17
4. Výroba sklolaminátové formy.....	21
4.1 Vycpávky a kapotky.....	26
5. Statická analýza.....	29
5.1 Zatěžovací stavy.....	29
5.2 Silové působení vody.....	31
5.3 Závěry analýzy.....	32
6. Betonová směs.....	35
6.1 Složky směsi.....	35
6.2 Návrh směsi.....	39
6.2 Testování zkušebních vzorků.....	42
7. Výroba.....	45
7.1 Rozdělení rolí při betonáži.....	45
7.2 Betonáž.....	45
7.3 Odbednění.....	47
7.4 Druhá betonáž.....	48
7.5 Zkoušení na vodě.....	50
7.6 Povrchové úpravy.....	51
8. Časová náročnost výroby.....	55
9. Závěr.....	57
10. Seznam zdrojů.....	58
11. Přílohy.....	60
A) Pravidla soutěže Betonkenu KUPA.....	60
B) Výsledky analýzy v Dlubal RFEM:.....	64
C) Výkresová dokumentace.....	67

1. Úvod

První myšlenka na využití betonu jako materiálu pro stavbu lodí se zrodila ve stejné době jako vyztužený beton samotný a obě myšlenky vzešly ze stejné mysli. Joseph-Louis Lambot – francouzský vědec, který poprvé přišel s myšlenkou na beton vyztužený ohybově tuhovou ocelovou výztuží, představil svůj první betonový člun v roce 1848. Do konce 19. století pak bylo postaveno mnoho malých betonových člunů, které sloužily na uzavřených kanálech.

Zvýšený zájem pak přitáhly betonové lodě v období první světové války, kdy byl nedostatek materiálu na stavbu klasických ocelových lodí. Tato alternativa se nabízela jako možné řešení, a tak americký prezident Woodrow Wilson pro námořnictvo objednal 24 lodí. Než však stihly být dokončeny, válka se uchýlila ke konci, a tak pozbyly významu. První americkou betonovou lodí byl parník SS Faith o délce 102,5 metrů. Vyřazen ze služby byl o pouhé tři roky později. Nakonec bylo dokončeno 12 lodí, které se však nikdy nedočkaly bojového nasazení. Byly odprodány a buď sloužily jako obchodní lodě, skladiště nebo byly vyřazeny. [15]

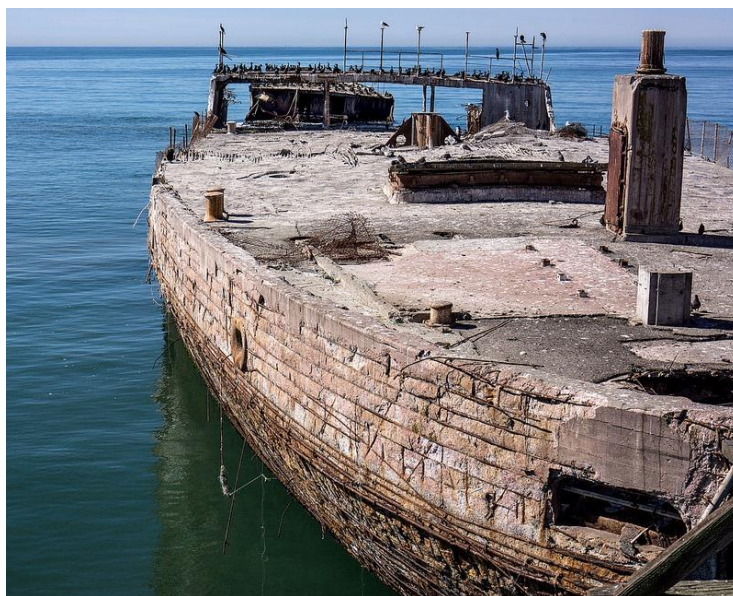
V období mezi světovými válkami pak bylo postaveno několik významných lodí jako třeba SS Palo Alto, který sloužil jako tanker. Jeho délka byla 130 metrů a výtlač přes 6000 tun. Jeho vrak je k dodnes k vidění u pobřeží v Kalifornii.



Obr. 1.1 - SS Palo Alto (vlevo) a kladení ocelové výztuže při stavbě lodi v loděnici (vpravo) [13][14]

V období druhé světové války bylo opět postaveno několik betonových lodí, a to ze stejného důvodu. Největší roli loď sehrála po vylodění spojenců v Normandii. V provizorně postavených přístavech sloužily pro transporty a skladování munice a paliva, dále jako mobilní jídelny, plovoucí bezmotorové pontony nebo byly záměrně potápěny, aby blokovaly plavbu nepřátelských lodí. [16]

Po válce nenabývaly betonové lodě většího významu. Až v šedesátých letech začala Americká inženýrská společnost (American Society of Civil Engineers – ASCE) sponzorovat národní soutěž betonových kánoí. Ta se v Americe stala velmi prestižní záležitostí a studenti předních amerických univerzit tam si každý rok poměřují své schopnosti. Tyto závody však nejsou jen americkou záležitostí. V Evropě se konají například závody Betonkanorace v Nizozemsku či Betonkenu Kupa v Maďarsku, kterých se naše kánoe zúčastní.



Obr. 1.2 - Jeden z mnoha současných vraků betonových lodí [17]

2. Návrh tvaru a rozměrů kanoe

Kánoe musí být navržena tak, aby svým tvarem a rozměry splňovala několik základních požadavků. Mezi ty patří manipulovatelnost a doprava, nízký hydrodynamický odpor, přijatelný ponor, stabilita a kapacita pro dva závodníky. Dále musí kánoe splňovat pravidla soutěže BETONKENU KUPA, ve které bude v červnu závodit. Podle těchto pravidel musí být délka kánoe v intervalu 400 až 600 centimetrů a šířka pak mezi 60 až 100 centimetry. Výška kánoe není nijak omezena. [6]

Základní výchozí tvar vychází ze 3D zaměření čtyřkanoe kategorie C4 poskytnutého Štěpánem Šonkou, který vyráběl kánoi pro předchozí ročník této soutěže. Pro potřeby zaměření byla vybrána profesionální závodní čtyřkanoe délky 900 cm. Výstupem samotného zaměření pak bylo mračno bodů definující průřezy kánoe po vzdálenostech 20 až 40 centimetrů s přesností ± 2 mm.

Model kánoe vytvořený na základě tohoto zaměření bude upraven dle vlastních zkušeností v loňském ročníku soutěže, kdy jsem si sám mohl kánoi vyzkoušet a zúčastnit se i jednoho ze závodů.

Pro tvorbu 3D modelu byly použity programy AutoCAD 2019 a freewarový Blender 3D. Jednotlivé průřezy byly v příslušných vzdálenostech importovány do AutoCADu.

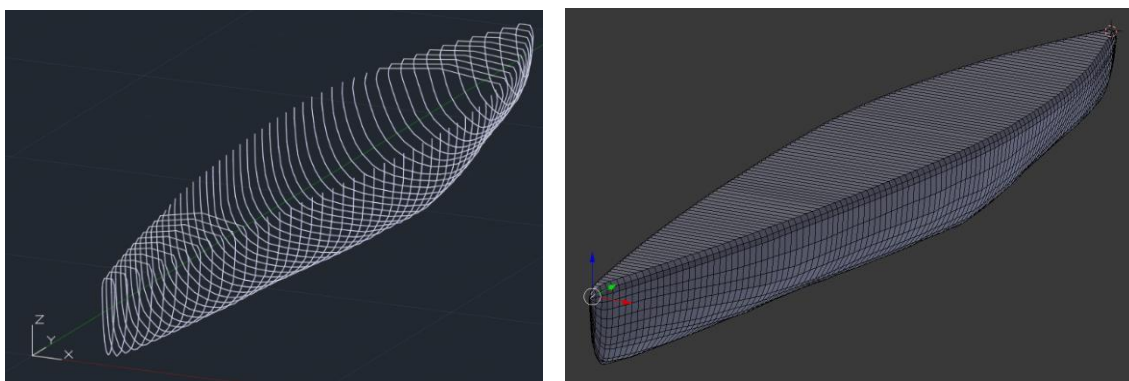
Aby loď měla co nejvíce hydrodynamický tvar umožňující zrychlení na startu a zároveň i udržování rychlosti během závodu, má téměř svislou předovou část kýlu a předové a zádové průřezy ve tvaru ostrého písmene V, které postupně přecházejí ve středové průřezy ve tvaru širokého, takřka půlkruhového písmene U.

Loď tímto nabyla efektivního tvaru, dle mého názoru však i za cenu snížené stability, kdy se závodníci museli z velké části soustředit nejen na pádlování, ale i právě na udržení stability. Proto první změnou bude úprava středových průřezů. Vyšší stability lze obecně dosáhnout buďto rozšířením průřezu nebo zploštěním dna. Aby změny tvaru nepůsobily moc výrazně, bude užito obou z nabízených možností.

Druhou změnou oproti loňskému modelu bude zkrácení kánoe. K transportu kánoe byl použit VW Crafter v konfiguraci s nejdelším možným nákladovým prostorem, přesto musela loď pro svou délku kolem 5 metrů být uložena úhlopříčně a na jedné straně

zvednuta do výšky přibližně 1,5 metru, aby se do auta bezpečně vešla. Jelikož je nyní potřeba vyrobit a převézt tímto vozem 3 kánoe, nebude úhlopříčné uložení možné. Proto bude potřeba snížit délku na co nejmenší možnou mez, tedy něco málo přes 4 metry. Zkrácení o přibližně 1 metr bude mít za následek nižší výtlač, což může vést k většímu ponoru. Výtlač by však měl být kompenzován částečným zploštěním dna a rozšířením kánoe.

Finální rozměry kánoe jsou 4040 mm na délku, 676 mm na šířku a 412 mm na výšku. Výška kánoe uvažuje v potaz i navrženou kapotáž přídě a zádě. Její výška se bude směrem ke středu zvyšovat na zmíněných 412 mm. Ve středové části se počítá s výškou o 36 mm nižší. Předběžný výpočet výšky ponoru vyšel 204 mm.

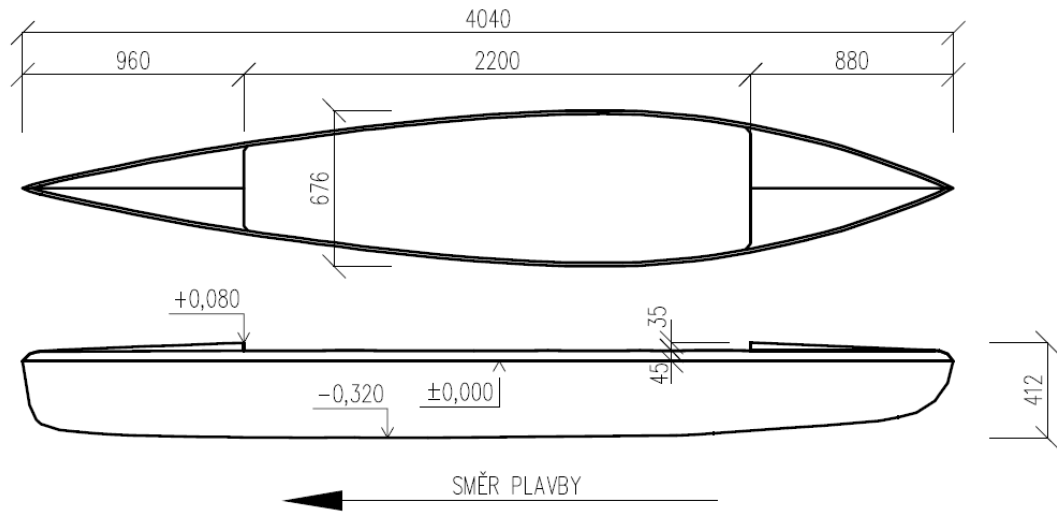


Obr. 2.1 - Návrh tvaru kánoe v programu AutoCAD (vlevo) a Blender 3D (vpravo)

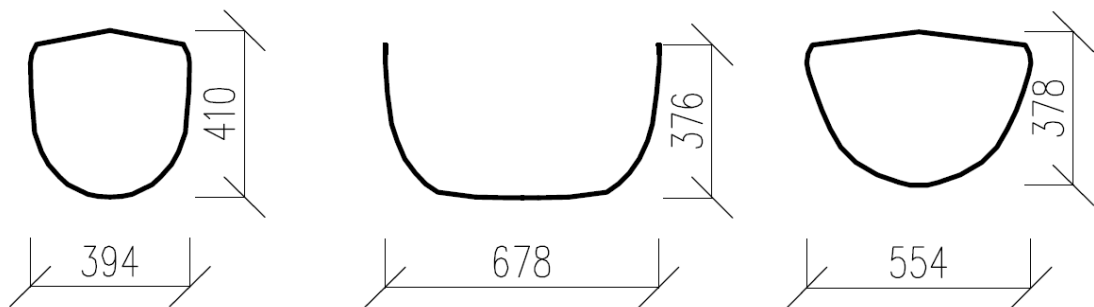
Kapotáž bude mít jednak vzhledovou funkci a dále pod ni vznikne prostor k uložení polystyrenu, který zajistí, že loď nepůjde ke dnu v případě, že by došlo k jejímu převrácení na vodě a použitá betonová směs by měla větší objemovou hmotnost než voda.

Po definování jednotlivých průřezů byly všechny řezy importovány do programu Blender 3D. Cílem importu bylo zjistit, zda se v návrhu neobjevují konkávní oblasti, které by jednak nebyly vzhledově pěkné, ale také by mohly způsobit problémy při případném smršťování skořepiny. Druhým důvodem byla potřeba vyrobit model v programu, který umí celý model nebo jeho části exportovat jako .STL soubor, což je nezbytné pro zvolenou technologii výroby formy.

Původní návrh řezů počítal s drobným uzavíráním řezů v horních částech středové části lodi. Vzhledem k obavám s případným odbedňováním (tuhost bednění by mohla způsobit poškození bednění) bylo od tohoto návrhu upuštěno a na místo uzavírání průřezu bylo zvoleno drobné rozevírání, případně zcela svislá stěna.



Obr. 2.2 - Navržené rozměry kánoe



Obr. 2.3 – Řezy v průřezech ukončení kapotek a v nejširším průřezu

3. Návrh technologie výroby formy

Návrh a výroba formy se odvíjí od použité technologie výroby. Nabízí se dvě možnosti, a to betonáž na vnitřní formu nebo betonáž na vnější formu. Vzhledem k tomu, že forma musí být opakovatelná a odbednění tedy musí být snadné a nedestruktivní, je vhodnější zvolit vnější formu, která bude podepřená z vnějšku a v zájmu snazšího odbednění demontovatelná. Nehrozí tak, že by vlivem případného smrštění mohla být forma poškozena sevřením vnější skořepinou. Tento postup rovněž zajistí hezčí vnější povrch, neboť právě ten bude definován formou. Vnitřní povrch pak bude definován technologií betonáže a přesností provádění.

Pro výrobu vnější formy je potřeba vyrobit co nejpřesnější negativ, tzv. kopyto. Jako nejvhodnější materiál pro toto kopyto byl vybrán extrudovaný polystyren. Přestože jeho cena je vyšší než u expandovaného polystyrénu, jeví se jako lepší možnost, protože jeho opracovatelnost je lepší.

Jelikož katedra betonových a zděných konstrukcí na ČVUT disponuje novou obráběcí CNC frézku, bylo rozhodnuto, že v zájmu co nejvěrnějšího převedení vytvořeného 3D modelu lodi do reálného XPS modelu bude užito této frézky.

3.1 Úvod do CNC

CNC je zkratka pro Computer Numerical Control. Původně jen NC stroje byly takové stroje, které oproti ručnímu ovládní byly ovládány řídicím programem z alfanumerických znaků na paměťovém médiu. Jako první takové médium se používaly děrné štítky. Tento program je vytvářen odděleně od výrobního stroje.

Dnešní CNC obráběcí stroje se dají charakterizovat jako stroje schopné manipulovat s obráběcím nástrojem kolem několika os, obvykle jde o tři nebo o pět os. Tyto stroje jsou řízeny přímo počítačem. Jde o jeden ze dvou přímých způsobů výroby objektů na základě 3D modelu vytvořeného v počítači.

Jedná se o substraktivní výrobní proces, kdy je z počátečního bloku hmoty (obrobku) pomocí obrábění hmota kontrolovaně ubírána, dokud není docíleno požadovaného tvaru. K tomu je zapotřebí vysoké přesnosti, které obráběcí frézy v dnešní

době dosahují. Přesnost běžných fréz se pohybuje kolem 0,005“, což je 0,13 mm. U strojních aplikací, pro které se vyrábějí například součásti motorů může být požadována vyšší přesnost a frézy jsou schopné se pohybovat s přesností na 0,00005“ což je 0,0013 mm.

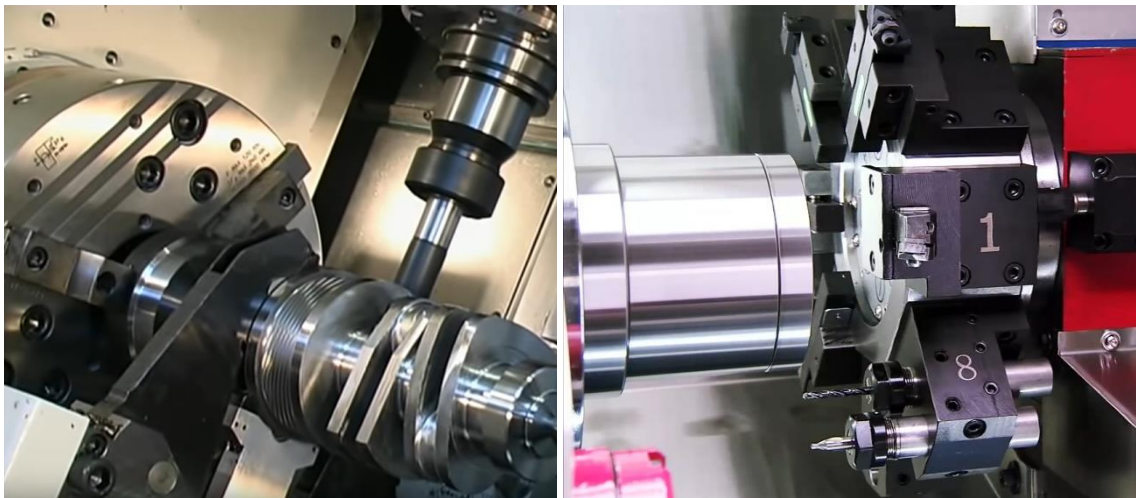


Obr. 3.1 - Ukázka, jak moc komplexních tvarů se dá při použití pětiosé frézy docílit [7]

Nejčastěji se lze setkat s tříosými či pětiosými frézami. Počet os charakterizuje počet stupňů volnosti obráběcího nástroje. Tříosá je schopna pohybovat nástrojem ve třech směrech – x, y a z. Pětiosá je pak schopna k těmto osám přidat i náklon kolem os x a y.

Při obrábění se užívá tři základních technik. První je vrtání, kdy jsou za pomoci vrtacího nástroje do stacionárního obrobku vrtány otvory. Pro tento typ obrábění postačuje tříosá fréza. Dalším typem je soustružení, což je vlastně reverzní způsob vůči vrtání – obráběná hmota je roztočena kolem jedné osy a obráběcí nástroje jsou k ní přikládány, nicméně se samy nehýbou. Tento způsob má omezené možnosti výroby, nicméně s dnešními technologiemi je možno docílit i tak velmi různorodých tvarů a požadavků při zachování přesnosti. Typickým příkladem užití může být výroba klikové hřídele do motoru auta či letadla. Posledním způsobem je pak frézování. Při frézování je k docílení požadovaného tvaru užito rotačních obráběcích nástrojů. Obráběná hmota je fixovaná k podkladní podložce, která může být buď stacionární či nestacionární. Lze tak v případě kombinace nestacionární podložky, která je schopná hmotu natočit pod libovolným úhlem, a pětiosé frézy docílit obrovské variability při výrobě.

Frézy mohou využívat celou řadu obráběcích nástrojů. Některé jsou schopné si nástroje samy měnit, u jiných se nástroj musí vyměnit ručně. Je celá řada kritérií, podle kterých se nástroje dají rozdělovat – například podle ploch na nichž jsou bříty (válcové, kotoučové, kuželové...), podle způsobu upínání (nástrčné, stopkové), podle způsobu výroby břitů (frézované, lité, soustružené), podle směru otáčení (pravořezné, levořezné) či podle materiálu břitu (ocel, slitiny karbidu). Zvolený nástroj samozřejmě musí být v souladu s materiálem obrobku. Obráběným materiálem může v dnešní době být takřka vše – od dřeva či polystyrénu po hliník, ocel či titan. [7]



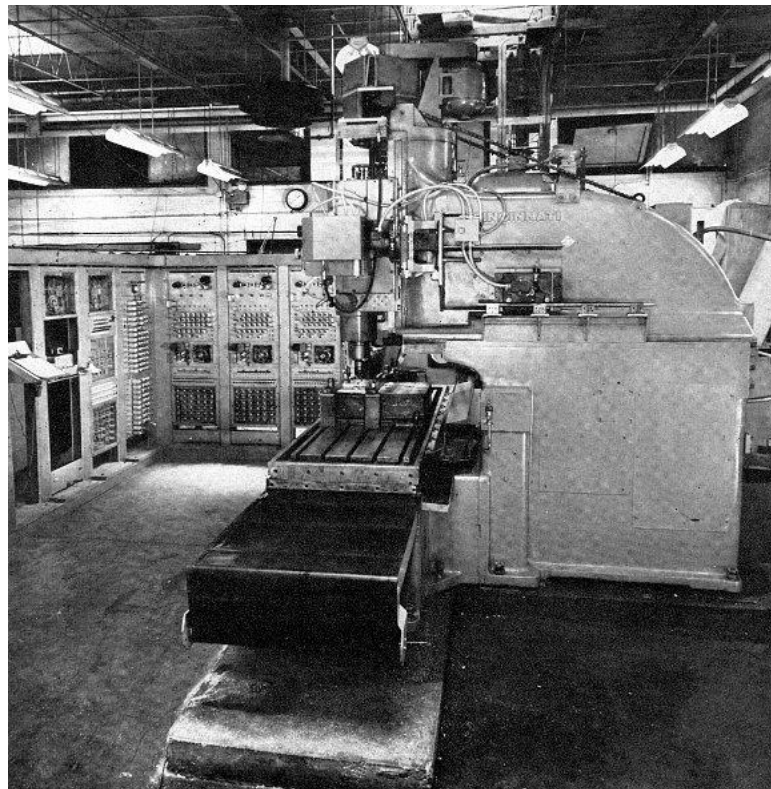
Obr. 3.2 - Soustruh obrábějící klikovou hřídel do motoru letadla (vlevo), hlava soustruhu umožňující v jednu chvíli připojit až 8 pracovních nástrojů (vpravo) [9]

3.2 Vznik (C)NC

Poprvé se myšlenka automatického řízení strojů objevila ve 40. letech 20. století. Zabýval se jí americký strojník John T. Parsons, zaměstnanec rodinné firmy na obráběcí stroje. Tehdy dostal zakázku na výrobu části rotorů do vrtulníků od firmy Sikorsky. Postupem času však došel k závěru, že bez automatizace nelze docílit požadované přesnosti výroby. Spojil se s Frankem Stulenem, vedoucím divize pro výrobu vrtulí. Díky tomu mohl nahlédnout i do pevnostních výpočtů rotorů na tehdejších děrno-štítkových kalkulačkách a začal si pohrávat s myšlenkou použití těchto kalkulaček ke generaci dat pro jeho obráběcí stroje. Stále zde však byl lidský faktor, kdy kalkulačky generovaly velké tabulky čísel, které byly následně předčítány operátorům, kteří podle těchto souřadnic nastavovali stroje.

Parsonovou myšlenkou bylo připojit čtečky děrných pásek užívaných tehdy jako paměťové médium přímo ke strojům a tím docílit plné automatizace, která by tak eliminovala lidský faktor a s ním související nedostatky. K tomu však tehdy neměl finanční prostředky. Ty nakonec získal v roce 1949, kdy ho najalo letectvo kvůli problémům s návrhy nových křídel. Jelikož tehdejší dodavatel nebyl schopen výroby v požadované kvalitě, letectvo USA mu poskytlo finance k dokončení stroje dle jeho představ. Téhož roku se Parsons obrátil na laboratoře MIT, které byly světovou jedničkou v oblasti mechanických výpočtů a zpětnovazebních systému pro detekci polohy.

Ku Parsonsově překvapení si v roce 1952 MIT vyjednalo samostatnou smlouvu s letectvem a Parsonův projekt převzalo a odstříhlo jej od finančních prostředků. Parsons si stihl podat patent na „Motorem kontrolovaný aparát pro pozicování obráběcích a tvářecích strojů“ a MIT následně podalo patent na „Číslicové řízení servo-systémem“. První stroj představili v roce 1952, šlo o veliký technologický úspěch a přesnost řezu dosahovala výborných hodnot. Stroj však byl extrémně složitý – obsahoval mnoho elektronek, relé a pohyblivých částí, které snižovaly jeho spolehlivost. Udal však správný směr a MIT jej pak licencovalo dalším firmám, které se postaraly o další rozvoj této technologie.



Obr. 3.3 - První číslicově řízený obráběcí stroj z roku 1952 i s výpočetním zařízením [10]

V 60. letech klesala cena počítačových komponent i jejich velikost, což přálo rozmachu CNC strojů a jejich zdokonalování. Zároveň firmy začaly spatřovat potenciál v automatizaci, kvůli rostoucím mzdovým nákladům. V 70. letech američtí výrobci nebyli schopni dodávat CNC stroje pro běžné aplikace, jelikož byli většinou zaměřeni na produkci highendových zařízení pro letecký průmysl. Na trh proto vstoupili němečtí a japonští výrobci, kteří v prodeji následně americké firmy zcela sesadily. [8]

3.3 Výroba kopyta

Fréza umístěná na katedře má pracovní prostor o rozměrech 500 x 700 mm. Jelikož je ovšem potřeba zachovat rezervní prostor kolem každého frézovaného dílce, tak bylo rozhodnuto, že se pomocí frézy budou vyrábět jen před'ové a zád'ové profily, u kterých jsou velké křivosti a jejich ruční přesná výroba by i s kvalitním nářadím byla velmi náročná až nereálná. Dalším důvodem je pak časová náročnost, jelikož frézování jednoho dílce zabere 15-20 minut. Příslušný obráběcí nástroj poskytuje při své výšce po namontování na hlavici frézy výškový pracovní prostor přibližně 90 mm. Proto byly zvoleny XPS desky o tloušťce 80 mm. To nám pro danou délku lodi dává celkem 51 průřezů, jejichž frézování by zabralo přibližně 17 hodin, a to bez času stráveného programováním frézy. Přitom není bráno v potaz, že frézování středových průřezů o velké šířce by trvalo ještě déle než zmíněných 15 až 20 minut.

Během frézování došlo ke komplikaci. Fréza postupně odstraňuje materiál směrem odshora dolů, dokud na podložce nezbyde samotný finální průřez. Při prvních pokusech byla fréza naprogramovaná, aby materiál odstranila až do nejspodnější vrstvy po celém obvodu průřezu. To však způsobilo, že v jednu chvíli průřez přišel o spojení s původní deskou a byl zcela navolno, čímž bylo další frézování znemožněno. Při dalších pokusech byl problém vyřešen ponecháním kontaktních míst spojujících průřez se zbytkem desky, ze které byl průřez následně jednoduše vyříznut.



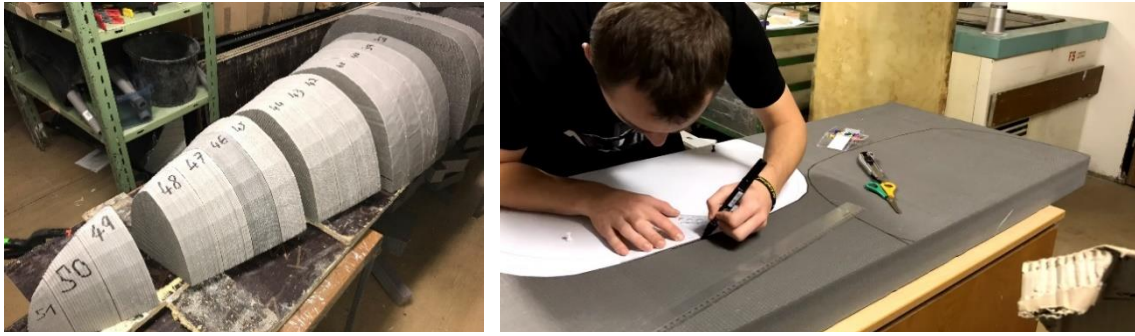
Obr. 3.4 - CNC fréza při obřezávání profilu z XPS (vlevo) a výsledné vyřezané profily dosud spojené s deskou (vpravo)

Tímto způsobem bylo vyrobeno prvních 10 průřezů směrem od přídě a 11 průřezů směrem od zádi, to je o něco více než třetina celkové délky lodi (41%). Zbylé průřezy bylo nutno vyrobit ručně. Protože by byla škoda, aby při použití přesné frézy byla středová část vyrobena nepřesně či s velkými odchylkami, budeme se snažit o co nejpřesnější ruční výrobu i ve středové části.

Pro výrobu byly vytištěny všechny průřezy v měřítku 1:1 a následně překresleny na polystyren, čímž byl definován potřebný řez.

Během výroby bylo vyzkoušeno několik způsobů a nástrojů k opracování jednotlivých průřezů. Jako první univerzální ruční pila pro více typů materiálů. Výsledný povrch a obtížnost řezání nebyly optimální. Jako další pak byla vyzkoušena pila přímo na XPS. Její přesnost byla vyšší, stále však byla spíše pro účely řezání XPS u tepelných obkladů, kde milimetrová přesnost není vyžadována. Jako další byla vyzkoušena tepelná řezačka v modelářské dílně, u které řez probíhal napnutou rozžhavenou strunou. Výsledný povrch byl krásně hladký, nicméně řezačka měla úskalí v podobě průvěsu struny jako následku jejího prodloužení vlivem zahřátí. Proto s ní šlo vždy řezat jen pár vteřin a pak bylo nutné nechat strunu vychladnout. Byla tedy vhodná spíše k řezání menších kusů, nežli 60 cm širokého průřezu lodi, jelikož po vychladnutí se většinou nepodařilo přesně navázat na místo posledního řezu. Dále bylo nutné dodržovat konstantní rychlost řezu, jinak docházelo k nadměrnému zahřátí materiálu, a tedy i jeho většímu vypálení kolem struny, čímž nebyla dodržena přesnost řezu.

Nejvhodnější povrch zanechal klasický kobercový nůž. Ten však pro svou maximální délku čepele nedokázal jedním řezem proniknout celou 80 mm silnou deskou. Jako kompromis bylo zvoleno hrubé řezání pilkou na XPS a následné zahlazení povrchu kobercovým řezákem.

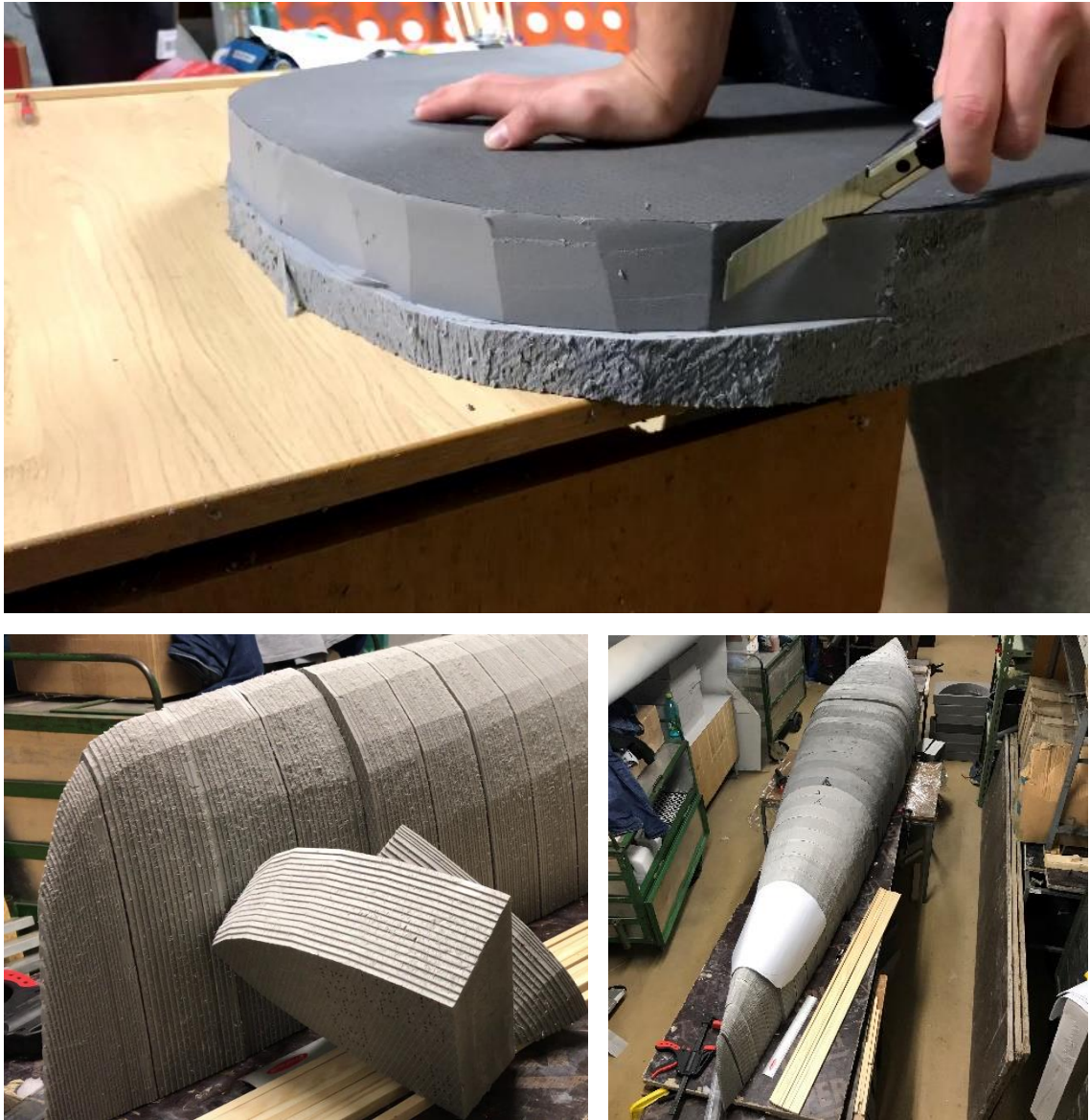


Obr. 3.5 - Splené záďové profily vyřezané na CNC fréze (vlevo), obkreslování profilů pro ruční vyřezávání (vpravo)

Tvar každé vyřezané desky byl definován dvěma průřezy (jeden blíže k přídí, druhý blíže k zádi). Na každou desku byly obkresleny oba, přičemž řez pilou definoval větší z nich. Nožem pak byl vyřezán přechod mezi oběma profily. Zde bylo nutné co nejvíce dodržet rovinný přechod mezi řezy, aby se neobjevovaly k vypuklé části, které by způsobily celkový „vlnkovatý“ povrch lodí, který by pak působil méně esteticky.

Pro další práce na výrobě formy je potřeba vyrobené průřezy spojit k sobě. Není požadována nijak zvlášť vysoká pevnost, jde jen o to, aby se při výrobě vůči sobě nemohly posouvat v příčném směru a aby mezi jednotlivými průřezy nebyly mezery.

Průřezy k sobě byly spleny stavebním lepidlem k lepení polystyrénu vždy v sekcích po cca osmi až deseti průřezích a následně vždy přitíženy závažím po dobu několika hodin. Tyto sekce pak byly spolu rovněž propojeny lepidlem, avšak už jen na pracovním stole ve vodorovné poloze bez závaží.



Obr. 3.6 - Ruční vyřezávání profilu z XPS (nahore), detail vyfrézovaných předřových průřezů (vlevo dole) a pohled na výsledné poskládané kopyto (vpravo dole)

4. Výroba sklolaminátové formy

Výroba formy byla rozdělena do dvou částí. Jednak chemické „uzavření“ polystyrénového kopyta a potom výroba samotné formy.

Veškeré chemické prostředky byly nakoupeny u firmy HAVEL Composites a jejich dávkování probíhalo podle instrukcí v technických listech, při nejasnostech ohledně míchání byl kontaktován firemní expert na chemické látky. Jelikož jde o zdraví škodlivé látky, po celou dobu práce a manipulace s těmito látkami byly užívány ochranné pomůcky dle příslušných bezpečnostních listů. Jednalo se o rukavice, ochranné brýle a dýchací respirátor.

Forma bude navržena jako demontovatelná na tři díly z důvodu snazšího uskladnění, manipulace a transportu jednotlivých dílů formy a zejména také kvůli snazšímu odbednění. Tyto díly k sobě budou spojeny čelními deskami, v nichž budou vyvrtány otvory pro šrouby. Jedna z pracovních spár formy je navržena v nejširším místě lodi přibližně jednu třetinu délky lodi od zádí, aby v případě nadměrné tuhosti formy bylo možné po odebrání šroubů loď bezpečně odbednit bez rizika poškození formy. Druhá pracovní spára formy je pak přibližně ve třetině délky lodi od přídě.

Spára bude vyrobena tak, že do příslušného místa bude mezi polystyrénové průřezy vložena další celá deska, která bude tvořit předěl kopyta. Na tuto desku se pak bude aplikovat sklolaminát stejně jako na zbytek kopyta. Tím, že se předěl stane pevnou součástí kopyta bude zajištěno, že nedojde k žádnému posunu, a tudíž budou čelní desky navzájem rovnoběžné a kolmé k vodorovné rovině.

V první fázi výroby je potřeba chemicky „uzavřít“ povrch polystyrénu, neboť je potřeba, aby čerstvý sklolaminát nepřišel s polystyrénem do kontaktu, jelikož hrozí chemická reakce, která by degradovala polystyrén a poškodila tak pracně vyrobené kopyto. Dalším důvodem je potřeba povrch kopyta vyhladit, neboť právě tato povrchová úprava nám definuje povrch výsledné formy a tím i výsledný povrch lodi. Pro tento účel byla použita epoxidová pryskyřice LH160 s tužidlem H505. Dle technického listu byl použit poměr mísení 100:27 hmotnostních dílů.



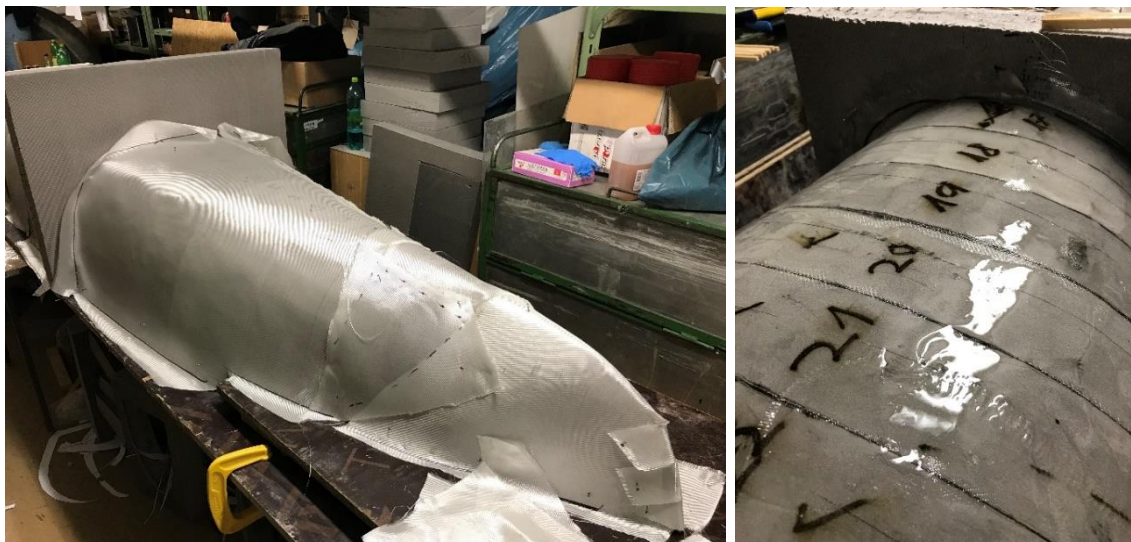
Obr. 4.1 - Veškerá potřebná chemie k výrobě sklolaminátové formy

Aplikace epoxidu probíhala ve třech záběrech. Po aplikaci první vrstvy byla do živého epoxidu umístěna předem nastříhaná skelná keprová tkanina o nízké plošné hmotnosti (163g/m^2), přes kterou pak byla aplikována další vrstva epoxidu. Tato tkanina zasahovala i na předělovou desku, protože i ta přijde do kontaktu se sklolaminátem.

Epoxid se aplikoval v takovém množství, aby bylo co nejúčinnější nanesení a zabránilo se jeho stékání, které by znamenalo nutnost následného broušení. Vždy ho bylo připraveno takové množství, aby se stačilo zpracovat do uplynutí uvedené doby zpracovatelnosti, po které už je natolik tuhý, že jeho rovnoměrné rozetření není možné.

Doba tuhnutí a tvrdnutí epoxidu při použití daného tužidla by měla být 4-5 hodin. Další vrstva však byla nanášena vždy až další den, aby bylo zajištěno dokonalé vytvrnutí. Po aplikaci a vytvrnutí poslední třetí vrstvy byl povrch na některých místech obroušen ve snaze eliminovat projevy stékajícího epoxidu.

Nyní je potřeba zajistit dokonalou separaci, aby nedošlo k poškození finální formy při jejím oddělování od kopyta. K tomu byl použit separační vosk. Bylo objednáno 0,5 litru a ošetřovaný povrch byl odhadnut na $4,5\text{ m}^2$. Doporučený počet nátěrů je cca 10, proto byl v každém nátěru použit vosk o objemu 0,05l. Vosk byl pečlivě čistým hadříkem roztírán po povrchu, dokud nebyl dokonale rozleštěn. Po dokončení každého nátěru bylo už znatelné, že se vosk z povrchu odpařuje a ztrácí svou mocnost, proto bylo aplikováno všech 10 doporučených nátěrů.



Obr. 4.2 - Připravená výztužná keprová tkanina před aplikací epoxidu (vlevo) a vzhled kopyta po nanesení a vytvrnutí první vrstvy epoxidu

Aby byla separace dokonalá, byl použit ještě PVA separátor, a to vždy přímo před aplikací materiálu budoucí formy. Samotné souvrství formy pak je složeno ze tří vrstev – povrchový gelcoat, výztužná tkanina a polyesterová pryskyřice.

Vnitřní vrstva formy, která kopíruje tvar kopyta je tvořena gelcoatem Normopol GM60014, který byl vytvrzen tvrdidlem butanox M50 v objemovém poměru 1:100. Gelcoat je pro potřeby vnitřní kontaktní vrstvy velmi vhodný, neboť při své konzistenci dokonale přilne na povrch kopyta a nestéká. Díky své pružnosti umožňuje opakované odbednění formy a je málo náchylný k trhlinám. Dále svým složením zachová lesklý povrch formy.

Po aplikaci gelcoatu s tvrdidlem byla do živé pryskyřice umístěna výztužná tkanina. Byla použita netkaná rohož ze skelných vláken o plošné hmotnosti 450g/m^2 . Finální vnější vrstvu formy tvoří polyesterová pryskyřice H834-REA30 opět s tvrdidlem butanox M50 o objemovém poměru 1:100. Rohože bylo objednáno 10kg, což vystačí na dvě vrstvy tkaniny po celém povrchu. Doporučený počet vrstev je 2-4, budeme se tedy pohybovat na spodní hranici, nicméně by tkanina měla postačovat. Po aplikaci první vrstvy tkaniny byla přidána další vrstva pryskyřice, do které byla vložena druhá vrstva tkaniny a přes ni finální vrstva pryskyřice. Během tří dnů byla postupně provedena laminace přídě, středu i zádi lodí. Sejmutí formy z kopyta se uskutečnilo den po laminaci třetí části.



Obr. 4.3 - Matný povrch po několikanásobné aplikaci separačního vosku (vlevo nahoře), aplikace gelcoatu (vpravo nahoře), ukládání výztužné skelné rohože do živého gelcoatu (vpravo dole) a detail zatvrdlé struktury výsledného sklolaminátu

Sejmutí z kopyta neprobíhalo moc hladce a byla na něj vynaložena poměrně velká fyzická síla a použito bylo i kladivo a páčidlo, nicméně se nakonec sejmutí úspěšně podařilo. Během snímání bylo odhaleno, že na některých částech předělových desek nebyla ve všech potřebných místech nanesena první vrstva epoxidu, který měl chránit polystyrén před účinky působení gelcoatu. V těchto místech došlo k reakci gelcoatu s polystyrénem a jeho následné chemické degradaci polystyrénu. Tyto vady byly našťastí ve velmi malém měřítku a jen na dvou místech formy.

Jako poslední práce na formě zbývá navrtat do čelních desek díry pro šrouby. V každé desce bude rovnoměrně rozmístěno 13 šroubů M10, které přes velkoplošné podložky budou formu držet pohromadě. Forma se bude kvůli jejímu transportu montovat až na místě betonáže.



Obr. 4.4 - Oddělování hotové formy od kopyta (nahore), detail čelní desky, přes kterou budou spojeny jednotlivé díly formy (vlevo dole), zadní díl formy (uprostřed dole) a všechny tři díly formy (vpravo dole)

4.1 Vycpávky a kapotky

Betonáž byla naplánovaná tak, aby byla celá loď vybetonovaná na jeden záběr. Obecně by bylo snazší loď vybetonovat na dva záběry, aby se mezi jednotlivými záběry stihlo vše připravit přesně podle provedení předchozího záběru, neboť nelze předpokládat, že bude všude dodržena přesná tloušťka skořepiny nebo se někde nebudou vyskytovat všelijaké odchylky od plánu. Nicméně v plánu jsou tři kánoe a do Vánoc musí všechny lodě být hotové, neboť do té doby bychom měli dle domluvy opustit prostory vodohospodářského experimentálního centra, proto je potřeba proces výroby co nejvíce urychlit, a tak bylo rozhodnuto, že každá loď bude vybetonována pouze na jeden záběr. To s sebou nese některá úskalí.

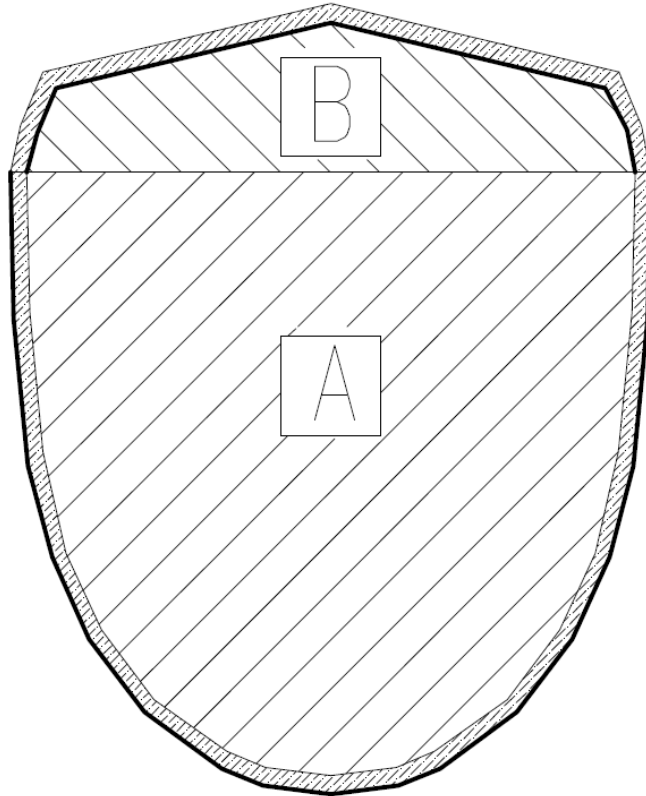
Největším problémem bude provedení předních a zadních kapotek (část lodi, které má uzavřený příčný řez), pod kterými bude prostor, který bude sloužit pro polystyrenové vycpávky. Ty musí být přesně vytvarované, aby se do prostoru vešly. Na vycpávky se pak umístí vyfrézované polystyrenové desky, které budou sloužit jako ztracené bednění pro zmíněné kapotky. Během betonáže očekáváme tři největší problémy:

a) Provázání živého betonu ve formě s betonem ukládaným na ztracené bednění, neboť příprava ztraceného bednění bude doladována až na místě, a přestože vycpávky a ztracené bednění budou vyrobeny předem, tak je potřeba počítat s dalšími úpravami, jelikož výroba předem počítá s dokonalým provedením betonáže dle návrhu, čehož ale nelze v reálných podmínkách docílit. To bude mít za následek, že beton ve formě mezitím už trochu ztuhne a bude se tak hůře propojovat s novým. Horní spára betonu ve formě proto musí být ideálně co nejhrubší.

b) Stékání čerstvého betonu ze stěn formy, jelikož beton bude zatížen ze shora čerstvým betonem. Proto je potřeba, aby vycpávky byly co nejpřesněji vyrobeny a zaplnily co nejdokonaleji celý prostor, aby beton neměl kam stékat. Stékání by znamenalo jednak horší úspěšnost provázání betonu ve formě s čerstvým betonem a dále pak by jej bylo nutné doplnit, což by mělo za následek značné navýšení hmotnosti samotné přídi a zádě, protože by zde stěna kánoe dosahovala lokálně větší tloušťky než bylo v plánu.

c) Samotná výroba kapotek a vycpávek, protože přestože bude probíhat opět strojně, pomocí CNC frézy, tak půjde stále o předem daný tvar z vytvořeného 3D modelu. Realita na místě však může (a s nejvyšší pravděpodobností i bude) být jiná, proto bude potřeba

kapotky a vycpávky dodatečně upravit ještě na místě, aby se do lodi vešly a měly co nejmenší vůli pohybu a zabránilo se tak stékání betonu. Naopak nesmí být až moc natěsno, aby beton nevytlačovaly a nesnižovaly tloušťku stěny lodi.



Obr. 4.5 - Schéma formy, vycpávek a kapotek

Na obr. 4.5 vidíme schematický řez v místě uzavřeného průřezu. Tlustou čarou je vyznačena hrana bednění – ve spodní části vnější sklolaminátová forma, v horní části pak vnitřní ztracené bednění. Nejprve bude uložen beton do formy, poté do něj bude opatrně vložena vycpávka z polystyrénu (A). Na tu pak bude uložena přesně vyřezaná deska (B), která slouží jako ztracené vnitřní bednění pro kapotku. Právě v místě přechodu mezi A a B bude potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby došlo ke správnému provázání staršího a novějšího betonu, aniž by poklesl do případných mezer.



Obr. 4.6 - fréza obrábějící část jedné z kapotek (vlevo nahoře), výsledná dokončená část kapotky (vpravo nahoře), složená kapotka a připravené vycpávky pod kapotky

5. Statická analýza

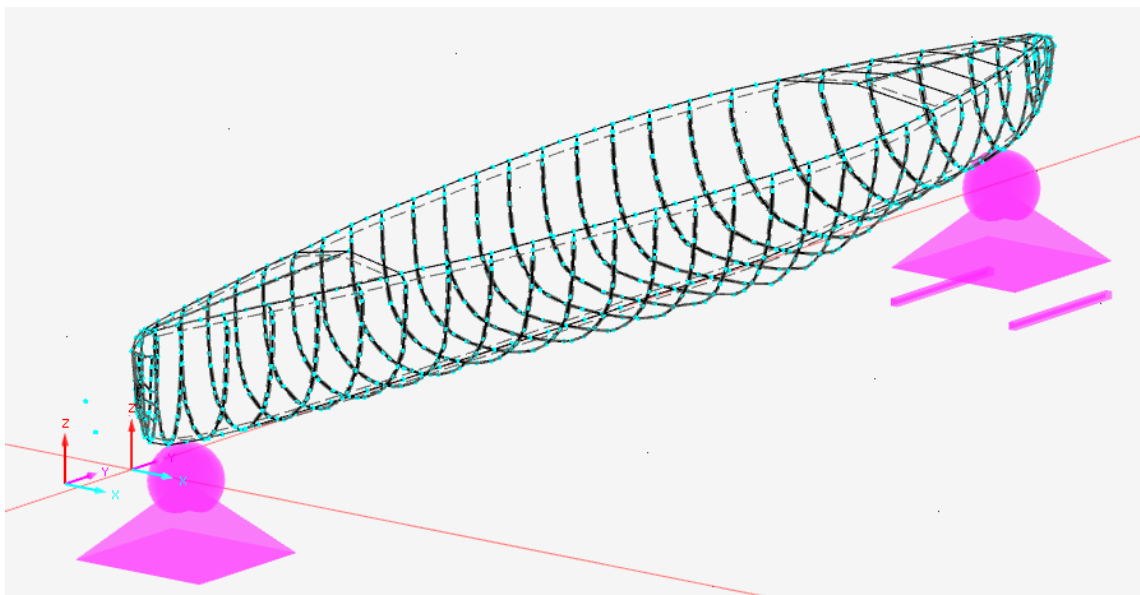
Statická analýza lodi byla provedena v programu Dlubal RFEM. Díky tomu, že model kánoe je již vlastně jednou vyhotoven v programu AutoCAD, tak jej můžeme využít pro import do RFEMu. Loď byla importována po jednotlivých řezech, kterými jsme si tvar definovali. V místě přídě a zádi, kde jsou velké křivosti a změny tvarů mezi průřezy, byly průřezy zhuštěny. Mezi jednotlivými průřezy byla užitá funkce programu, která průřezy proloží plochu, konkrétně zobecněný čtyřúhelník, který se vyznačuje tím, že může být definován body, které neleží v jedné rovině. Takto byla plochami pokryta celá loď.

5.1 Zatěžovací stavy

Pro výpočet byly uvažovány základní zatěžovací stavy, které vyplývají ze základního užívání lodi a manipulace s ní. Celkem byly definovány čtyři tyto stavy:

1. ZS)

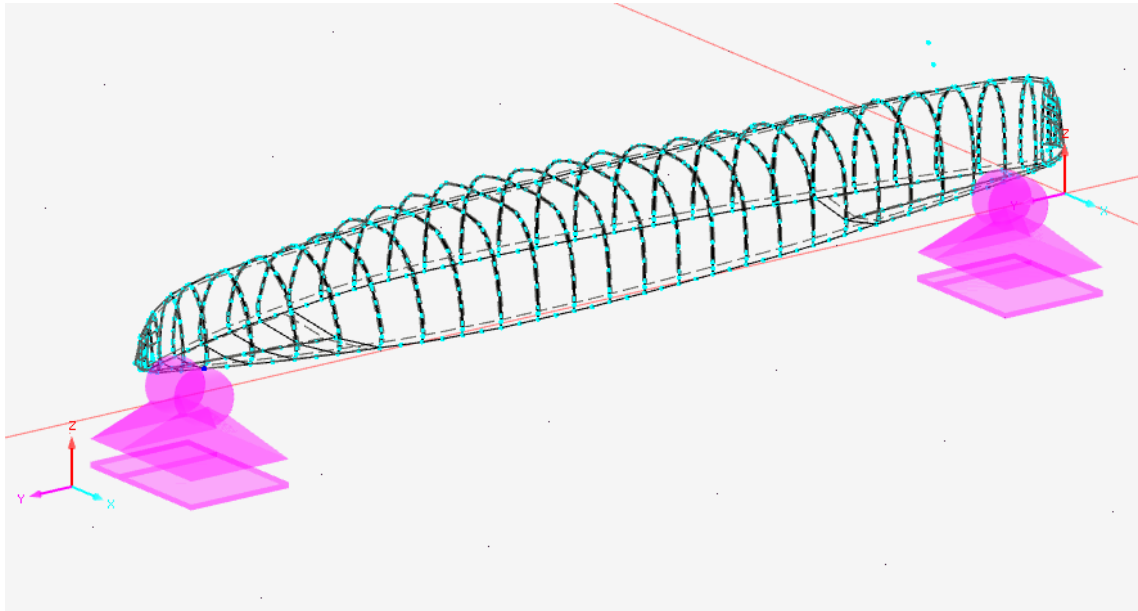
Transport lodi ve dvou lidech, kdy každý drží loď za jeden konec – za přídě a záď přibližně 10-15 centimetrů od kraje.



Obr. 5.1 - podepření prvního zatěžovacího stavu

2. ZS)

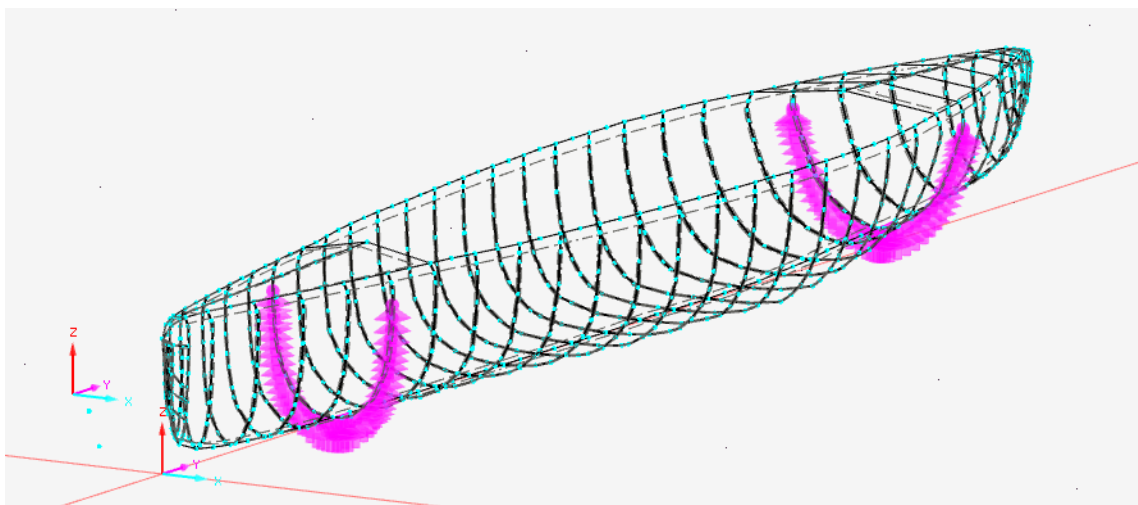
Vylévání vody z lodi, kdy jsou podpory uvažovány stejně jako v předchozím stavu, ale loď je vzhůru nohama.



Obr. 5.2 - Podepření druhého zatěžovacího stavu

3. ZS)

Transport lodi pomocí popruhů, kdy je loď obmotaná jeřábovými popruhy přibližně 80 cm od okrajů. Tento stav bude působit na loď při vážení jeřábem a při transportu za účasti čtyř lidí. Jako podpora je uvažováno svislé podepření celého průřezu.



Obr. 5.3 - Podepření třetího zatěžovacího stavu

4. ZS)

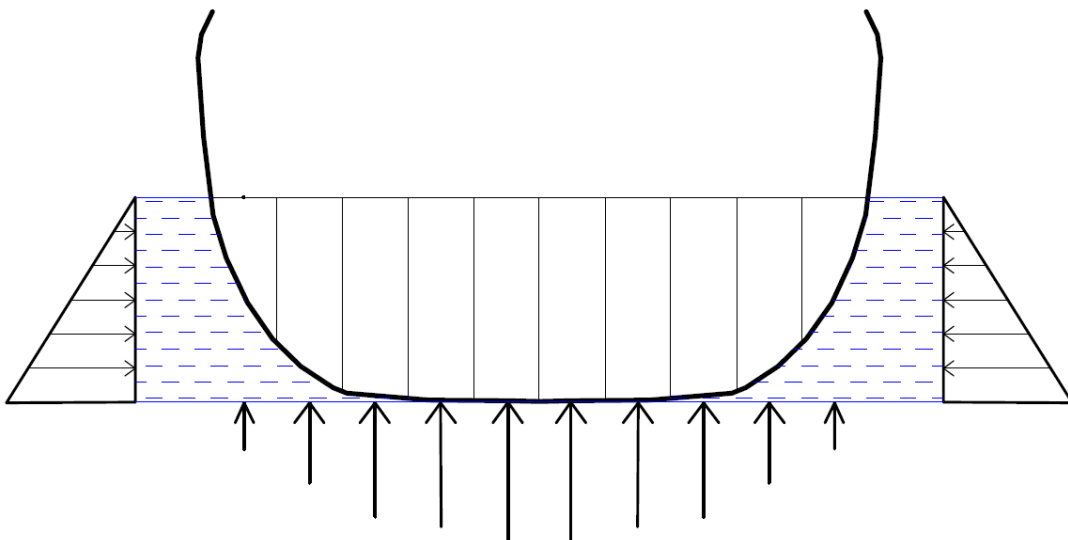
Lod' na vodě a dva závodníci v ní, kdy na loď působí voda, a to bočním tlakem a hydrostatickou vztlakovou silou, proti kterým působí vlastní tíha lodi a tíha dvou závodníků uvnitř lodi. Ti působí jako plošná podpora lodi vůči vodnímu zatížení.

5.2 Silové působení vody

Jak bylo zmíněno, voda vůči loďi působí dvěma hlavními účinky, a to bočním tlakem a hydrostatickou silou. Boční tlak je přímo úměrný hloubce zkoumaného bodu pod hladinou a objemové hmotnosti působící kapaliny. Vypočítá se podle vzorce (5.1). Dále pak na loď působí hydrostatická síla, jejíž velikost je dle Archimédova zákona rovna tíze vody vytlačené ponořenou částí tělesa (5.2). Vykreslení působících sil je na obrázku 5.4

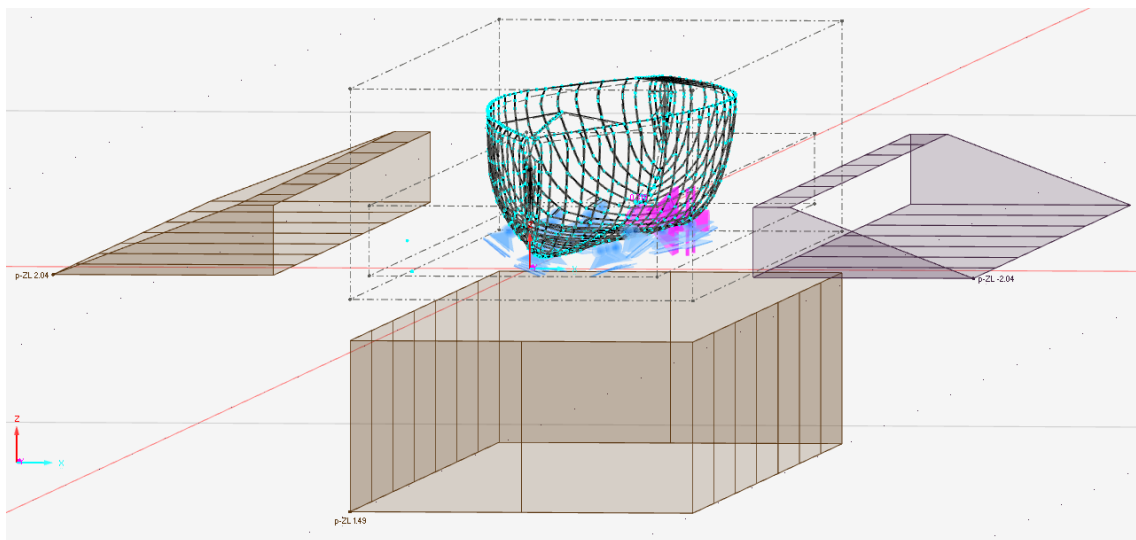
$$p = h \cdot \rho \cdot g \tag{5.1}$$

$$F_{VZ} = V \cdot \rho \cdot g \tag{5.2}$$



Obr. 5.4 - Silové působení vody na průřez – boční tlak vody a vztlaková síla dle Archimédova zákona

Jak je z obrázku vidět, tak hydrostatická síla není po průřezu konstantní, ale je závislá na zkoumané části plochy. Proto přesný popis zatížení není možný. Pro potřeby jednoho průřezu by bylo nejsnazší jej zjednodušit pomocí průměrování, kdy bude působit spojité zatížení (vztlaková síla) po celé šířce průřezu. Obdobně pro potřeby výpočtu rozpočítáme celkovou působící vztlakovou sílu na konstantní plošné zatížení po celém půdorysném průmětu lodi. Z obrázku je také vidět, že vztlaková síla nepůsobí po celé šířce lodi, nýbrž jen v ponořené části. Neponořená část je však už téměř svislá, takže rozdíl nebude velký, a proto jej pro potřeby usnadnění výpočtu zanedbáme. Pro výpočet vztlakové síly bude uvažována vlastní tíha lodi dle 3D modelu odhadovaná na 88 kg a budou uvažováni dva závodníci o hmotnosti 80 kg každý.



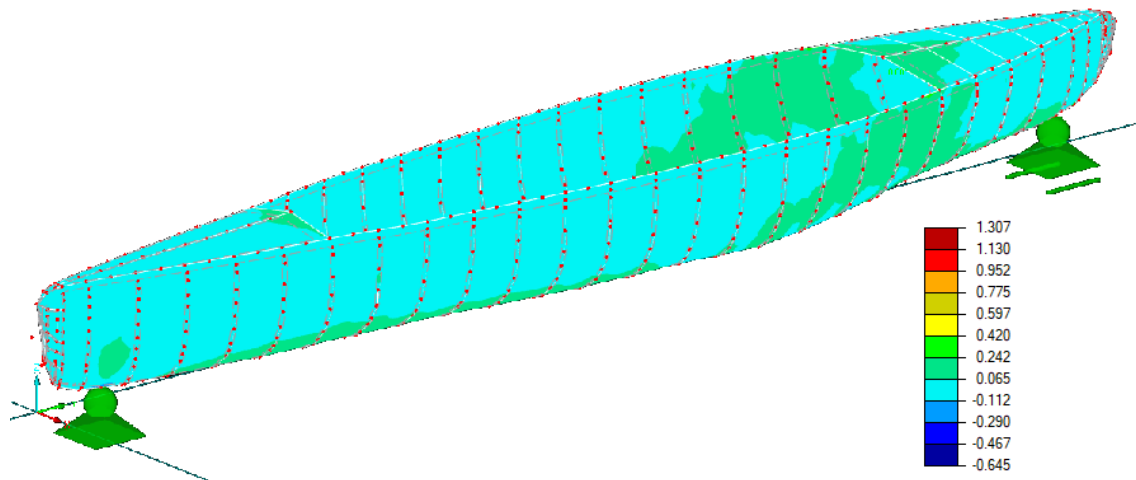
Obr. 5.5 - Podepření a zatížení pro čtvrtý zatěžovací stav

5.3 Závěry analýzy

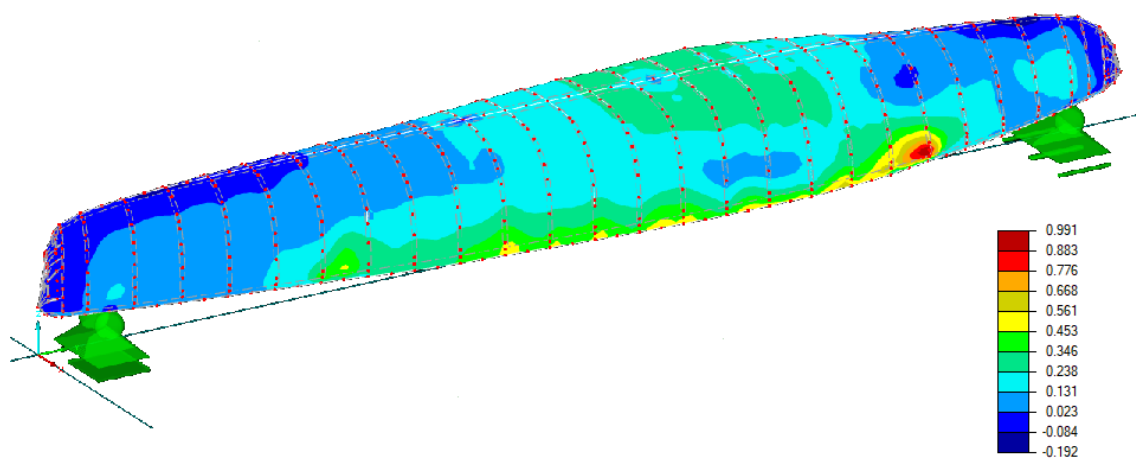
Ze statické analýzy vyplývá, že neoptimálnějším zatěžovacím stavem je podepření jeřábovými popruhy a nejhorším stavem pak kánoe na vodě se dvěma závodníky. Extrémní hodnoty napětí vyšly 1,7 MPa v tahu a -1,77 MPa v tlaku. Hodnoty pro jednotlivé zatěžovací stavy jsou rozepsány v tabulce 5.1. Pro návrh směsi je klíčová hodnota napětí v tahu. Tlakové napětí v betonu není pro návrh dominantní, a proto bude směs ověřována pouze na pevnost v tahu.

Tab. 5.1 - values of extreme principal stresses

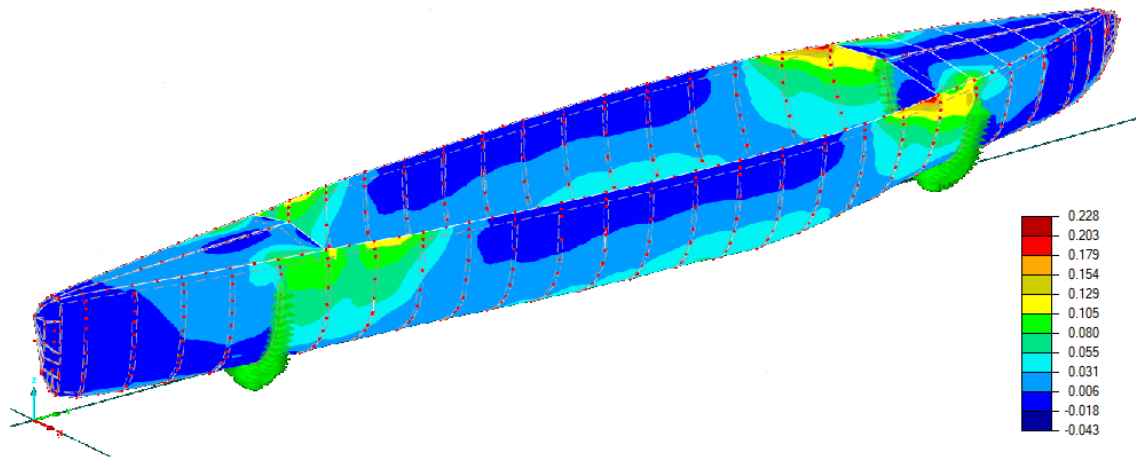
ZS	$\sigma_{1,max}$ [MPa]	$\sigma_{2,min}$ [MPa]
1	1,31	-1,77
2	0,99	-1,38
3	0,23	-0,55
4	1,71	-1,35



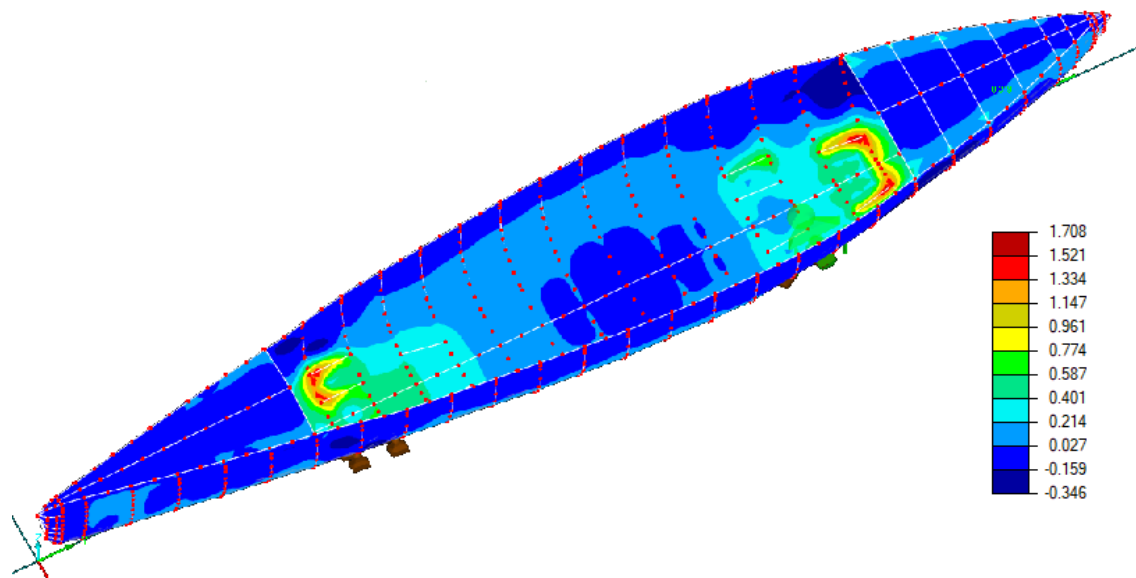
Obr. 5.6 - Values and curves of σ_1 on the dominant surface for 1. ZS



Obr. 5.7 - Values and curves of σ_1 on the dominant surface for 2. ZS



Obr. 5.8 - Hodnoty a průběhy σ_1 na dominantním povrchu pro 3. ZS



Obr. 5.9 - Hodnoty a průběhy σ_1 na dominantním povrchu pro 4. ZS

6. Betonová směs

Cílem návrhu je dosáhnout směsi, která bude schopna přenést tahová napětí vznikající při všech zatěžovacích stavech. Dále je nutné zachovat co nejnižší objemovou hmotnost směsi z několika důvodů. Zaprvé kvůli snadné manipulaci ideálně ve dvou lidech. Dále kvůli menšímu ponoru, aby byla jednak zajištěna stabilita a rovněž aby docházelo ke tření lodí s vodou na co nejmenší ploše. Posledním hlavním důvodem je možnost, že nastane nejhorší možný případ a dojde k převrácení kánoe na vodě a jejímu naplnění vodou. Tvar kánoe je navržený, aby umožňoval uložení polystyrenových vycpávek, nicméně hmotnost se budeme snažit i tak co nejvíce snížit.

Dalším požadavkem na směs je její konzistence a zpracovatelnost. Vzhledem k návrhu technologie výroby bude nutné směs umisťovat na téměř svislé části formy a bude tak potřeba zaručit, že na nich směs ulpí.

Poslední hlavní požadavek je rychlý nárůst pevnosti. Vzhledem k sériové výrobě a časové tísní je potřeba každý týden vyrobit jednu loď, což znamená, že se bude muset odbedňovat po šesti až sedmi dnech. Musí tedy být zaručena dostatečná pevnost betonu v době odbednění.

6.1 Složky směsi

Pro návrh směsi byly použity základní složky pro výrobu betonu – cement, voda, kamenivo a vybrané přísady a příměsi.

Cement:

Pro návrh byl zvolen CEM I 42,5R, díky svému rychlému nárůstu pevnosti, což je jeden z požadavků na směs. Průměrné pevnosti cementu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Dále u cementu probíhá vyšší vývin hydratačního tepla.

Tab. 6.1 – Průměrné pevnosti pro cement CEM I 42,5R [11]

Stáří [den]	1	2	7	28	56	90
Tlak [MPa]	14	30	53	51	66	67
Tah [MPa]	4	6	8	9	9	9

Kamenivo

Výběr kameniva je pro zachování požadovaných hmotnostních vlastností klíčový. Proto by mělo mít sníženou objemovou hmotnost při zachování tlakové pevnosti. Zároveň protože jde o tenkostěnnou konstrukci, je nutno ohlídat maximální velikost zrn kameniva. Pro dobré zkušenosti z minulých let bylo k tomuto účelu vybráno expandované sklo Poraver. To je vyráběno za vysokých teplot a dodává se ve formě bílých kuliček. Je možno jej zakoupit přímo v požadovaných frakcích, což ušetří mnoho času při návrhu směsi i při samotné finální výrobě. Snížené objemové hmotnosti bylo docíleno velkým množstvím malých uzavřených pórů, které kamenivu rovněž dodaly dobré tepelněizolační vlastnosti. Sypné a objemové hmotnosti kameniva jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 – Objemové a sypné hmotnosti frakcí kameniva Poraver [12]

Frakce [mm]	0,1-0,3	0,25-0,5	0,5-1	1-2
Sypná hmotnost [kg/m ³]	400 ± 60	340 ± 30	270 ± 30	230 ± 30
Objemová hmotnost [kg/m ³]	950 ± 150	700 ± 80	500 ± 80	400 ± 60



Obr. 6.1 – Použité frakce lehčeného kameniva Poraver, zleva frakce 0,5-1 mm, 0,25-0,5 mm a 0,1-0,3 mm

Mikrosilika

Mikrosilika, neboli křemičitý úlet, je látka, která vzniká jako odpadní produkt v hutních provozech. Skládá se z více než 80% z amorfního a pucolánově aktivního SiO_2 . Jde o velmi malé částice, které musí být zachytávány filtry, aby se nedostaly do ovzduší a neškodily životnímu prostředí. Částice jsou až 100x menší než částice cementu a dosahují velikosti řádově kolem 0,001 milimetru. To zajišťuje velmi velký měrný povrch látky kolem až 20 000 m^2/kg . Díky takto velkému měrnému povrchu je potřeba užití většího množství záměsové vody a nebo superplastifikátoru, zároveň díky malým rozměrům částic velmi dobře vyplňuje prostor mezi částicemi cementu a snižuje tak pórovitost výsledného betonu. Jde o nezbytnou součást vysokohodnotných betonu a výslednému betonu dodávají tmavě šedé zbarvení. [1]

Superplastifikátor

V dnešní době se jedná o velmi rozšířenou přísadu, jejíž použití je jednou z podmínek pro dosažení vysokohodnotných a betonů. Jeho užitím se snižuje potřebné množství záměsové vody při zachování nebo i zvýšení zpracovatelnosti směsi. Výsledný beton pak obsahuje méně vody a pojivo díky tomu pak i méně pórů. Dle použitého typu plastifikátoru dochází k zabránění hydratace buďto elektrostatickým působením a nebo prostorovou blokadou.

Při elektrostatickém působení se na povrchu cementových zrn vytvoří negativní elektrický náboj, díky čemuž se všechna zrna začnou navzájem odpuzovat, čímž je uvolněna vázaná voda mezi zrny a dojde ke zvýšení tekutosti směsi. Při užití superplastifikátoru na principu prostorové blokace se na povrchů zrn zformují molekuly, které fyzicky zabrání hydrataci. Působení superplastifikátoru je časově omezené, což může způsobovat problémy např. při dopravě betonu na větší vzdálenost. Pro návrh bude použito superplastifikátoru od výrobce Stachema, konkrétně pak Stachement 2000 na bázi polykarboxylátu s doporučeným dávkováním 0,4 – 1,4 % hmotnosti cementu. [2]

Povolená výztuž

Pro přenesení takových napětí bude nutné užití výztuže. Pravidla soutěže povolují užití rozptýlené výztuže v betonu, nikoliv však ohybově tuhé. Bylo zvažováno několik možností. V potaz byly brány vlastnosti vláken, zejména jejich složení, dostupnost a délka a průměr. Zvažováno bylo několik možností. [6]

- Polypropylenová mikrovlákná SikaMicro Fibre délek 6, 12 nebo 19 mm, průměr vláken je 0,031 mm [18]
- Skelná mikrovlákná Anti-Crack HD o délce 12 mm, průměr vláken 0,014 mm [19]
- Čedičová mikrovlákná GALEN BF30 o délkách 6, 12, 18, 24 a 30 mm a průměrech 0,009, 0,013 a 0,017 mm [20]
- Polypropylenová a polyethylenová makrovlákná Benesteel 55 o délce 55 mm a průměru 0,48 mm [21]
- Polyvinylalkoholová vlákna BASF MasterFibre 401 délky 12 mm a průměru 0,2 mm [22]

Po zvážení všech zmíněných kritérií byla zvolena vlákna MasterFibre od firmy BASF. Na obr. 6.2 jsou přehledně vyobrazeny všechny použité složky pro návrh směsi – cement CEM I 42,5R, mikrosilika, vlákna BAST MasterFibre 401, superplastifikátor Stachement 2000 a frakce vylehčeného kameniva Poraver 0,1-0,3 mm, 0,25-0,5 mm a 0,5-1 mm.

Dalším námětem ke zvážení bylo užití výztužné tkaniny. V minulých letech byly na betonových kánoích vždy použity, konkrétně populární perlinka Vertex G120, která se vyskytla na obou předchozích vyráběných kánoích. Dle provedených testů použití tkaniny násobně zvyšuje pevnost v tahu za ohybu. [4] [5] Tkanina je ovšem poměrně nepoddajná a její přesné vytvarování do tvaru kánoe se jeví jako celkem problematické. Dalším problémem pak je přesnost provádění. Tkanina by ve stěně lodi musela mít přesně definované umístění (tzn. vzdálenost od některého z povrchů), aby se aktivovala a měla statický význam. Toho je možné docílit při výrobě vzorku v laboratoři, nicméně se domnívám, že při betonáži skutečné kánoe nebude možné toto umístění zajistit. Nedalo by se pak na příspěvek tkaniny spoléhat a tkanina by měla praktický význam pouze v případě destrukce lodi, kdy by zabránila, aby se loď zcela rozpadla a místo toho by popraskané kusy betonu držely pohromadě díky jejich propojení s tkaninou. Dalším důvodem pro nepoužití pak byla časová tíseň. Loď musela být vyhotovena v poměrně krátkém čase a testování dalších sad vzorků s různými tkaninami by zabralo přinejmenším další týdny, což je při výrobě tří lodí nezanedbatelné zpoždění.



Obr. 6.2 - Všechny složky, které budou obsaženy v betonové směsi

6.2 Návrh směsi

Složení směsí první generace vycházelo z návrhu podle odhadu přebytku cementového tmele. V prvním kroku se buď výpočtem či odhadem určí vodní součinitel. Vzhledem ke snaze množství záměsové vody co nejvíce snížit a vzhledem k užití superplastifikátoru se při návrhu pracovalo s hodnotami vodního součinitele kolem 0,3. V případě výpočtu by se mohl užít postup stanovení vodního součinitele podle Bolomeye dle rovnice 6.1.

$$X = a_K \cdot R_C \cdot \left(\frac{1}{w} - 0,5 \right)$$

(6.1)

Kde: X ... Průměrná pevnost výsledného betonu

R_C ... Pevnostní třída cementu

a_K ... Součinitel kvality kameniva

w ...Vodní součinitel

Z předpokládané mezerovitosti kameniva pak bylo pomocí rovnice absolutních objemů (6.2) určeno potřebné množství cementu a mikrosiliky a nakonec množství

jednotlivých frakcí kameniva. Nutno podotknout, že v hmotnosti cementu je zde zahrnuta i hmotnost mikrosiliky, která se v tomto případě podílí i na definici vodního součinitele.

$$V_C = v \cdot M = v \cdot \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_K}\right) = \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{w \cdot m_C}{\rho_V}$$

(6.2)

Kde: V_C ... Odhad objemu cementového tmele [m^3/m^3]

v ... Součinitel přebytku cementového tmele [-]

M ... Mezerovitost kameniva [-]

ρ_S ... Sypná hmotnost kameniva [kg/m^3]

ρ_K ... Objemová hmotnost kameniva [kg/m^3]

ρ_C ... Objemová hmotnost cementu [kg/m^3]

ρ_V ... Objemová hmotnost vody [kg/m^3]

m_C ... Hmotnost cementu [kg]

Jako poslední byla z rovnice absolutních objemů spočítána celková hmotnost kameniva, která byla rozpočítána mezi jednotlivé frakce tak, aby rovnice zůstala platná. Rozpočítání hmotnosti kameniva bylo provedeno vícekrát a poté byly porovnány vlastnosti namíchaných směsí. Totéž pak bylo provedeno při pozměněném vodním součiniteli. [3]

Takto byla definována první generace směsí. Ty pak byly následně různě upravovány na základě vlastností čerstvého betonu. Byly zkoumány zejména čtyři hlavní vlastnosti čerstvé směsi:

Konzistence – je nutné, aby čerstvá betonová směs byla dobře zpracovatelná a tvarovatelná, zároveň však nesmí „stékat“ ze svislých částí formy.

Mezerovitost – je nutné optimalizovat frakce kameniva, aby nedocházelo k mezerovitosti směsi, kdy se zrna obalí cementovým tmelem, avšak mezi zrny zůstanou póry, čímž by se razantně zhoršily průsakové vlastnosti finálního ztvrdlého betonu.

Adheze – je nutno zajistit, aby beton ulpíval na svislých nebo téměř svislých částech bednění a nedocházelo k plošnému odpadání již naneseného betonu.

Zpracovatelnost – vzhledem k užití výztužných PVA vláken je nutné zajistit dostatečnou zpracovatelnost, protože užití vláken ji jako takovou velice snižuje bez ohledu na zvolený vodní součinitel.



Obr. 6.3 - Ukázky směsí, které reprezentují některé z klíčových vlastností – konzistentní směs (vlevo), ulpívající směs (uprostřed) a mezerovitá směs (vpravo)

Všechny verze směsí byly použity k výrobě zkušebních vzorků, které byly následně testovány v laboratoři.

Během navrhování směsí se uvažovalo nad užitím polystyrenových kuliček za účelem vylehčení směsi, nicméně od jejich užití bylo nakonec upuštěno zejména z důvodu, že není možné zaručit rovnoměrné rozmísení kuliček, a tak by se mohlo stát, že ve stěně lodi budou například tři takové kuličky hned vedle sebe. Beton by pak v téměř celé tloušťce byl oslaben a došlo by k lokálnímu oslabení skořepiny a také pravděpodobně ke zvýšenému průsaku, což je velmi nežádoucí. Složení jednotlivých směsí je uvedeno v tabulce 6.3.

Tab. 6.3 – Složení všech testovaných směsí, hmotnosti přepočteny na Kg/m³

Označení směsi	1. generace					2. generace					3. generace	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
Cement	496	501	509	465	466	528	478	464	504	480	547	464
Voda	225	231	235	215	205	199	210	186	201	189	230	167
w/c	0,37	0,33	0,33	0,33	0,31	0,31	0,31	0,29	0,29	0,29	0,30	0,26
Kamenivo												
Celkem	357	360	367	242	243	170	249	241	238	139	285	197
0,1 - 0,3 mm	71	72	73	36	36	25	37	56	55	32	43	46
0,25 - 0,5 mm	71	72	73	61	61	23	62	93	92	53	71	76
0,5 - 1 mm	107	108	110	61	61	50	62	93	92	53	71	76
1 - 2 mm	107	108	110	85	85	72	87	0	0	0	99	0
Příspěvy												
Stachement 2000	5,0	5,0	5,1	4,7	4,7	4,0	4,8	4,6	5,0	4,1	5,5	4,6
Příměsi												
Mikrosilika	55	100	102	93	93	53	96	93	101	85	109	93
Výztuž												
PVA vlákna	10	10	20	19	19	15	19	19	20	16	22	19

6.2 Testování zkušebních vzorků

Po přípravě každé ze zkoumaných směsí a přezkoumání jejich vlastností byly z každé směsi vyrobeny normované zkušební vzorky. Jednalo se o trámečky o rozměrech 160x40x40 mm. Od každé z prvních deseti směsí byly vyrobeny tři trámečky. Byla zkoumána pevnost v tahu za ohybu. Pro lámání trámečků byl použit třibodový ohyb. Po odformování vzorků byly všechny zváženy a v každém směru třikrát přeměřeny elektronickou šuplerou pro přesný výpočet průměrných rozměrů a objemové hmotnosti.

Přestože zkoušení ukázalo správný směr, kam se při návrhu směsi ubírat a pevnosti dosahovaly různorodých hodnot, takže mohly být méně pevné směsi vyloučeny, rámečky svým tvarem nevystihovaly tvar a chování skořepiny, ani její části. Proto pro zkoušení závěrečných směsí byla vyrobena forma pro výrobu plochých vzorků o

rozměrech 400x140x15 mm, které chování konstrukce vystihovaly přesněji. Z dosažených hodnot pevností byly uvažovány hodnoty při vzniku první trhliny a ne maximální dosažené, neboť je loď vystavena průsaku vody. V tabulce 6.4 jsou uvedeny objemové hmotnosti a průměrné získané pevnosti v tahu za ohybu. Na základě posouzení nejen pevností, ale i dříve zmíněných vlastností pak byla jako nejvhodnější vybrána směs č. 12.



Obr. 6.4 – Testování trámečků (vlevo) a zlomený trámeček (vpravo)

Tab. 6.4 – Naměřené objemové hmotnosti a pevnosti v tahu za ohybu všech směsí

Směs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1,84	2,52	2,37	2,66	3,5	3,14	4	3,4	3,13	5,23	4,56	5,43
Objemová hmotnost [Kg/m ³]	1008	999	982	1074	1072	1189	1046	1184	1092	1405	1096	1294



Obr. 6.5 – Testování destiček (vlevo) a rovnoměrně popraskaná destička přesně v předpokládaném místě konstantního maximálního momentu

7. Výroba

7.1 Rozdělení rolí při betonáži

Pro plynulý chod betonáže bylo učeno, že bude potřeba minimálně osm lidí. Dva budou v laboratoři pracovat na přípravě směsi dle zadaného složení. Jeden bude vážit a druhý pak obsluhovat míchačku a doplňovat do ní materiál. Další dva budou fungovat jako komunikační spojka mezi místem betonáže a laboratoří, kde se připravuje směs. Budou nosit kbelíky s čerstvým betonem a při potřebě předávat zprávy, zda daná směs vyhovuje či zda je potřeba něco poupravit. Dalších čtyři až šest osob pak ukládá čerstvou směs do formy. Ideální rozložení jsou dva až tři lidi u přídě a další dva až tři lidi u zádi, kteří se minimálně každý z jedné strany přibližují k sobě navzájem, až se potkají. Celkem je tedy potřeba minimálně osm lidí pro každý záběr betonáže.

7.2 Betonáž

Před začátkem betonáže byla nejprve smontována forma a důsledně podepřena překližkovými průřezy a betonovými kostkami a deskami tak, aby se v žádných místech nedotýkala země. Podepřením se snažíme zabránit jednak jejímu překlopení a jednak aby hnětáním betonové směsi nedošlo k jejímu rozvibrování v důsledku případné nedostatečné tuhosti.

Dále byla forma v celé své ploše natřena odbedňovacím olejem. Bylo zkontrolováno, že je olej v celé ploše formy, protože kdyby došlo při odbedňování k potížím a forma by byla poškozena, nastal by veliký problém. Forma musí vydržet minimálně tři cykly, protože jsou potřeba tři lodě a výroba nové formy by trvala několik týdnů. Nesmíme však oleje nanést zbytečně moc, abychom zachovali adhezi betonu k formě v jejích svislých částech.

Pro míchání betonové směsi máme k dispozici laboratoř s míchačkou o objemu 7 litrů. Předpokládaná potřeba betonu napočítaná podle plochy 3D modelu je 68 litrů, předpokládáme tedy 10 záměsí.

Jednu sedmilitrovou záměs trvá připravit přibližně kolem patnácti minut. Při šesti betonářích u prvního záběru to bylo poměrně dlouho, protože šest lidí spotřebuje sedm litrů poměrně rychle, a tak nastávaly čekací prodlevy. Celkem tak první betonáž zabrala téměř tři hodiny. Po betonáži stále zbývaly asi 4 litry nepoužitého betonu, celková reálná spotřeba tak byla přibližně 62 litrů betonu. Očekávaná hmotnost kánoe je tak něco přes 80 kilogramů.



Obr. 7.1 - Detail šroubového spojení dílů bednění (vlevo), finální složená a podepřená forma (vpravo)



Obr. 7.2 - Detail betonové směsi ve formě při betonáži (vlevo), detail vybetonované přídě (vpravo)

Před úplným ztuhnutím betonu byl viditelný povrch lodi co nejlépe uhlazen gumovou stěrkou, pomocí čehož bylo dosaženo poměrně hladkého povrchu. Poté byla loď ošetřena vodou. Po několika hodinách, kdy byl již beton dostatečně ztuhlý, byl opět ošetřen vodou a celá loď pak zabalena do difuzně nepropustné folie. Ošetřování vodou probíhalo po dobu tří dnů.



Obr. 7.3 - Hotová kánoe před obalením folií proti odpařování vody (vlevo), detail čerstvě vybetonované přední kapotky (vpravo)

7.3 Odbednění

Odbednění lodi pak bylo naplánováno na šestý den. Byly demontovány šrouby držící formu pohromadě a loď následně podepřena před koncem druhého dílu a na zádi, čímž přídě zůstala viset jako konzola. Přesto nešlo příslušný díl bednění lehce sundat a muselo být použito špachtle a šroubováku. Zádě potom byla odbedněna obdobně a prostřední díl pak šel sejmout bez problémů.

Po detailním zkoumání formy bylo patrné, že v některých místech došlo k přilnutí její povrchové vrstvy k betonu a odloupení z formy. Někde zase naopak zůstaly drobné kousky betonu na formě. Proto před další betonáží musela být zbavena všeho nadbytečného a zároveň byly přelepeny lepicí páskou i drobné dutinky po odtržení

gelcoatu. Lepicí páska byla nalepena i kolem spáry u čelních desek, neboť do ní zatékal beton a v příslušném místě po obvodu lodi vytvořil malý prstenec.

Na povrchu lodi jsou zřejmé pracovní spáry, kdy při čekání na nový beton původní beton lehce zatuhl a už se ho nepodařilo dokonale provázat s novým, nicméně je rovněž zřejmé, že se jedná spíše o povrchový problém.

V místě horní hrany bednění je pak betonový záhyb a jistá linie je i v místě napojení kapotek. Tento přebytek se ovšem dá později obrousit a předpokládalo se, že k němu dojde. Raději však ať je někde betonu více a je pak obroušen, nežli ať někde chybí, což už by se opravovalo hůře.



Obr. 7.4 - Detail prstence v montážní spáře formy a odtrženého gelcoatu (vlevo) a detail pracovní spáry na povrchu odbedněné lodi (vpravo)

7.4 Druhá betonáž

Pro potřeby druhé betonáže bylo v experimentálním betonářském centru domluveno zapůjčení míchačky o trojnásobném objemu. Místo deseti záměsí tak byly potřeba pouze tři, což značně urychlilo celý proces betonáže. Paradoxem bylo, že na druhou betonáž byli ze začátku přítomni pouze čtyři betonáři, kteří nestíhali takto rychle vyráběnou směs ukládat do formy. Směs v kbelíku proto musela být občas promíchána a pokropena vodou kvůli lepší zpracovatelnosti. Při třetí betonáži pak byl dostatečný počet lidí a betonáž probíhala zcela hladce. Druhá i třetí betonáž proběhly díky větší míchačce přibližně o hodinu rychleji než první.

Původní plán bylo vyrobit tři kánoe – jednu pro Fakultu stavební a další dvě pak pro zahraniční univerzity v rámci zahraniční meziuniverzitní spolupráce. Nakonec shodou náhod dostali svou šanci i studenti Střední průmyslové školy stavební v Dušní ulici. K dispozici byl dostatek materiálu a forma svým stavem umožňovala další betonáž s přehledem. Jediný následek tohoto nahodilého plánu bylo to, že se třetí loď musela odbednit už po třech dnech, namísto obvyklých šesti, protože se během jednoho týdne musely stihnout dvě celé betonáže. Nezdá se však, že by to na lodi zanechalo jakékoliv následky. Průběh této nečekané betonáže byl obzvláště rychlý, neboť studentů přišel dostatečný počet, a také proto, že předchozí den byly navázeny všechny složky směsi.



Obr. 7.5 - Průběh čtvrté betonáže, na fotografii studenti SPŠ Dušní, obdobně však vypadala betonáž i v případě prvních tří lodí v pozadí

7.5 Zkoušení na vodě

Po dokončení všech čtyř kánoí byla provedena zkouška jejich na vodě. Cílem bylo ověřit ponor, průsak a stabilitu všech lodí. Pro tyto účely byl ve vodohospodářské hale napuštěn vodou jeden ze zkušebních kanálů. Hala disponuje jeřábovou dráhou, k umístění lodi do kanálu byl tak použit jeřáb. Tím byla částečně ověřena i pevnost kánoe, protože byla vystavena dynamickým účinkům od zrychlení jeřábové kočky a zejména pak při navíjení lana ve svislém směru.



Obr. 7.6 - Vážení kánoe pomocí jeřábové váhy a vahadla (vlevo), testování první kánoe ve vodním kanále ve školní laboratoři (vpravo)

Po usazení lodi do vody trvalo několik desítek vteřin, než se na vnitřním povrchu začaly projevovat mapy od průsaku vody povrchem. Po delší době byly mapy poměrně patrné, ale ani poté se v lodi nenacházelo nějak významné množství vody, která by bránila použití lodi při závodě či by nějak omezovala závodníky.

Byla vyzkoušena i stabilita. V rámci testu jsem si do kánoe sám vlezl a zkusil se v ní usadit do pozice závodníka. Kánoe nejevila žádné tendence náklonu a ani při záměrném rozhoupání se nejevily žádné problémy s její stabilitou a kánoe měla tendenci se sama vrátit do výchozí polohy. Nutno poznamenat, že jsem v kánoi byl sám, těžiště proto bylo výše, než bude při závodě, což by stabilitu kánoe mělo ještě umocnit.

Během zkoušení lodi na vodě jsme využili i jeřábové váhy, a tak byly všechny lodě přesně zváženy. Nejlehčí z lodí váží 80,9 kg a nejtěžší pak 87 kg. Průměrná hmotnost

činí 84,13 kg. Na rozdílech hmotnosti je patrný lidský faktor a to, že každá betonáž probíhala jinak a za jiných podmínek s jinými lidmi. Například nejtěžší kánoe byla betonována studenty SPŠ Dušní, kteří s předchozími betonážemi neměli ještě zkušenosti a jejich spotřeba betonu tak byla o něco vyšší než u studentů ČVUT.

7.6 Povrchové úpravy

Jako další práce následovaly povrchové úpravy, protože na všech kánoích bylo potřeba provést řezání přebytečného materiálu a úpravy vnitřního i vnějšího hrubého povrchu.

Vzhledem k velké prašnosti při řezání betonu byly všechny kánoe jedna po druhé vyneseny ven na školní dvůr a užitím úhlové brusky s řezným kotoučem byly zarovnány oba bonrdy. Dále byly zabroušeny vnější prstence, které vznikly v místě montážních spár formy a přebytečný beton v místě navázání betonu na přídi a zádi, kdy bylo užito ztraceného bednění. Tyto práce probíhaly nahrubo a jejich účelem bylo ryze odstranění přebytečného materiálu, nikoliv úprava povrchu.



Obr. 7.7 - Venkovní zarovnávání bordu pomocí úhlové brusky a ukázka vysoké prašnosti při řezání (vlevo), broušení prstence v místě spáry bednění (vpravo)

Další úpravou byla aplikace cementové stěrky. Přestože nanesený beton ve formě byl co nejvíce uhlazován, nezabránilo to, aby z něj vyčnívala vlákna použitá ve směsi. Pro závodníka by bylo velmi nepohodlné, aby finální povrch lodi vypadal takto. Dále pak navzdory co největší snaze byly po odbednění patrné otevřené póry na povrchu, který přiléhá k formě, a navíc byly viditelné pracovní spáry.

Povrch lodi byl nejdříve ošetřen penetračním nátěrem pro lepší přilnutí stěrky k povrchu. Stěrka se nanášela ve vrstvě ne větší než 1 mm. Bylo zajištěno aby vyplnila dutiny v místech pracovních spár, aby v těchto oslabených místech nedocházelo ke zvýšeným průsakům vody. Pomocí gumových stěrek použitých i k zahlazování betonu bylo zajištěno rovnoměrné nanesení a co nejdokonalejší uhlazení obou povrchů. Po dokončení prací byly povrchy ošetřeny vodou a celé loď pak vždy obaleny malířskou igelitovou folií, aby nedocházelo k odparu vody.

Složení stěrky bylo téměř totožné se složením betonové směsi, byla však použita jen nejmenší frakce kameniva 0,1-0,3 mm a nebyla použita PVA vlákna. Spotřeba stěrky byla přibližně tři čtvrtě litru na jeden povrch, celkem tedy asi 1,5l na jednu loď.



Obr. 7.8 - Nanášení cementové stěrky (vlevo) a loď se stěrkou nanesenou po celém vnějším povrchu (vpravo)

Jako poslední úprava proběhlo broušení povrchu. To probíhalo celé ručně pomocí smirkového papíru. Byla použita zrnitost papíru P320. Nejdříve se brousil vnitřní povrch, aby se po vypláchnutí mohla loď obrátit a nechala se odkapat a mohlo se rovnou brousit zvenčí. Broušený úsek povrchu byl vždy předem namokřen a průběžně podle potřeby dovlhčován. Brousilo se krouživými pohyby, dokud nebylo cítit, že povrch už je dostatečně hladký a proti pohybu papíru již neklade odpor. Broušení obou povrchů všech lodí zabralo přibližně 12 pracovních hodin.

Jako poslední krok zbývalo všechny lodě přestěhovat z vodohospodářské haly do provizorního skladiště. To bylo zřízeno v technickém suterénu hlavní budovy školy. K transportu lodí byly použity jeřábové popruhy, které na přídí a na zádi vždy nesli dva lidé. Popruhy velmi usnadnily transport, jelikož představovaly pohodlný způsob transportu lodí ve čtyřech lidech. Několik týdnů po uskladnění byla jedna z lodí převezena do loděnice ČVUT, kde byla uskladněna. K transportu byl použit zmiňovaný VW Crafter. Při nakládce bylo ověřeno, že nákladový prostor je dostatečně velký a že do něj lze loď bezpečně umístit.



Obr. 7.9 - Fotografie z transportu hotové lodi do suterénní technické místnosti, která posloužila jako lodní sklad



Obr. 7.10 - Fotografie z transportu hotové lodi do suterénního technické místnosti, která posloužila jako sklad (nahore), jedna z lodí umístěna v dodávce (vlevo dole) a ukázka, kolik místa v dodávce po naložení lodi zbývalo (vpravo dole)

8. Časová náročnost výroby

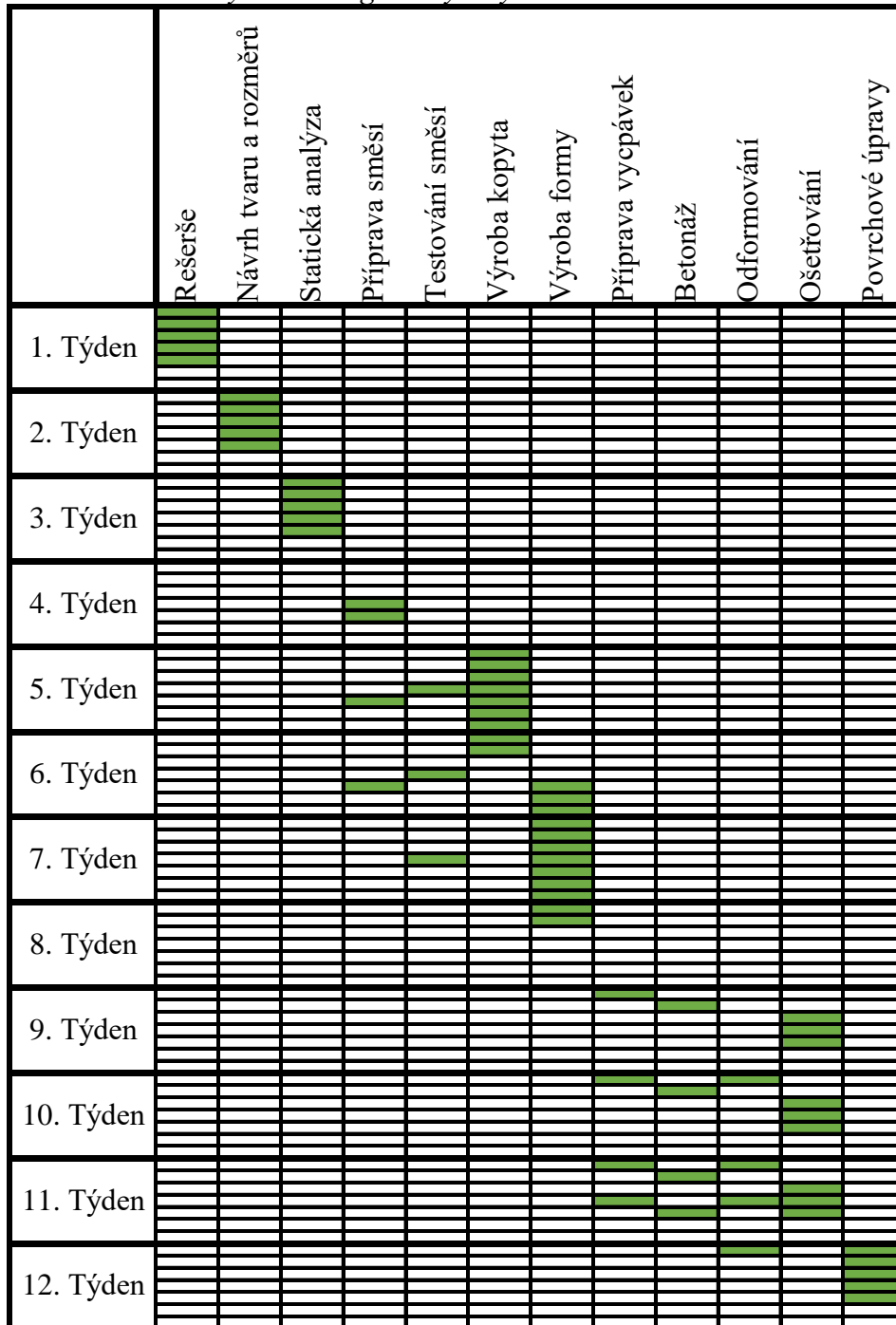
Jako nejnáročnější část se ukázala výroba bednění, při které bylo stráveno hodně času výrobou kopyta, tzn. opracování polystyrenových desek. Aplikace sklolaminátu rovněž zabrala hodně času. Celkem výroba formy trvala 21 dnů. Návrh, výroba a zkoušení směsí v součtu zabraly 7 pracovních dnů. Návrh tvaru a výroba 3D modelu s výkresy zabraly 7 dní. Betonáže s odformováním a následnou přípravou formy vyšly přibližně na 6 dnů, dalších 6 dnů zabraly povrchové úpravy a stěhování lodí do technického suterénu.

Toto byly nejvýraznější z činností, potom je tu ovšem řada spjatých činností, které se nezdají být časově významné, nicméně byly též nezbytné a vyžádaly si nemalý díl času. Šlo zejména o různé úklidy v dílně či hale, nákupy a stěhování materiálů, výroba zkušebních forem, příprava pracovního prostoru v dílně, kterou bylo potřeba přestěhovat a připravit v ní 4,5 metrů dlouhý pracovní stůl. Dále třeba lepení polystyrenových desek či ošetřování a vážení lodí. Celkem práce zabraly tři měsíce.

Tab. 8.1 – Časová náročnost dílčích částí výroby

Úkon	Doba trvání [den]
Rešerše	5
Návrh tvaru a rozměrů	5
Statická analýza	5
Příprava směsí	4
Testování směsí	3
Výroba kopyta	9
Výroba formy	12
Příprava vycpávek	4
Betonáž	4
Odformování	4
Ošetřování	9
Povrchové úpravy	5
Celkem	69

Tab. 8.2 – Celkový harmonogram výroby



9. Závěr

Ve značně limitovaném časovém úseku bylo potřeba navrhnout a vyrobit tři betonové kánoe. Přestože se oproti plánovanému harmonogramu některé činnosti opozdily, tak se do Vánoc podařilo vyrobit dokonce o jednu loď navíc, než bylo původně v plánu.

Za použití 3D skenu závodní kánoe byl vymodelován požadovaný tvar naší kánoe, a to s ohledem na stanovená soutěžní pravidla i zkušenosti z minulých let. Model byl podroben statické analýze v programu Dlubal RFEM a byly určeny maximální hodnoty namáhání, na základě kterých byla navržena vhodná betonová směs. Ta byla vybrána jako jedna z dvanácti různých, jež byly všechny podrobeny laboratorním zkouškám. Díky návrhu směsi nemusela být v lodi použita výztužná tkanina.

Pro potřebu betonáže byla vyrobena demontovatelná sklolaminátová forma, jejíž výroba zabrala největší množství času. Při její výrobě byla použita CNC frézka umístěná v dílně katedry, což zajistilo vysokou přesnost provedení podle připraveného 3D modelu. Forma byla úspěšně čtyřikrát použita a i v současnosti umožňuje další použití.

Tři lodě byly vybetonovány studenty ČVUT, jedna pak studenty Střední průmyslové školy Dušní a v červnu se všechny zúčastní závodů betonových kánoí v maďarském Györu.

Všechny lodě byly po odbednění obroušeny úhlovou bruskou a jejich vnější i vnitřní povrchy byly upraveny tak, aby byly na dotek hladké a aby se v nich dalo pohodlně sedět. Průměrná hmotnost lodí je přibližně 85 kg.

Pro mě osobně bylo velmi zajímavé mít možnost si takový návrh od samotného začátku po úplný konec vyzkoušet, zrealizovat a zkoordinovat se všemi, kteří při práci nějakým způsobem pomáhali, a to i přesto, že celé tři měsíce byly časově velmi náročné. Největší pozitivum a osobní přínos na této závěrečné práci shledávám v tom, že nešlo jen o projekt na papíře, jako tomu mnohdy u podobných prací bývá, nýbrž o skutečný výrobní proces, ze kterého vzešel hmotný výsledek.

10. Seznam zdrojů

- [1] SVOBODA, L. *Stavební hmoty*. 3. Praha: Jaga group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [2] PAVLÍKOVÁ, Milena, Zbyšek PAVLÍK a Jiří HOŠEK. *Materiálové inženýrství I*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001042632.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vydání. Brno, 2000. ISBN 9788021416475, 8021416475.
- [4] ŠONKA, Štěpán. *Návrh technologie výroby pro betonové kánoe*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce. Ing. Michaela Frantová, Ph.D.
- [5] KRATOCHVÍL, Jan. *Návrh a realizace betonové kánoe Blue Lion*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.
- [6] betonkenu.hu – Versenykiírás. *betonkenu.hu* [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.betonkenu.hu/versenykiirasrules/>
- [7] What is CNC Machining and How Does it Work? - YouTube. *YouTube* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=FNYEXjRmDtI>
- [8] The CNC Story - CNC Manufacturing. *CNC Manufacturing Pty Ltd | CNC Mill & Lathe Machining* [online]. Copyright © Copyright 2018 [cit. 17.05.2019]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <http://www.cncmanufacturing.com.au/the-cnc-story/>
- [9] Amazing CNC Machine Lathe Working Complete Crankshaft And Technology Making An Aerospace Component - YouTube. *YouTube* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=TRjm3FsApOg&>
- [10] Punch Tape Programmable Metal Mill from 1952 | Make:. *Make: DIY Projects and Ideas for Makers* / [online]. Copyright ©2004 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://makezine.com/2012/04/02/punch-tape-programmable-metal-mill-from-1952/>
- [11] Balený portlandský cement CEM I 42,5 R | HeidelbergCement Česká republika. [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>
- [12] Technical data - PORAVER® expanded glass. *Home - PORAVER® Blähglas* [online]. Copyright © Dennert Poraver GmbH. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.poraver.com/en/technical-data-poraver/>
- [13] SS Palo Alto – Wikipedia [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/SS_Palo_Alto
- [14] Vintage Barcelona – in pictures [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.tripulous.com/2011/06/vintage-barcelona-in-pictures/>
- [15] *War History Online - Military History* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.warhistoryonline.com/military-vehicle-news/did-you-know-concrete-ships-were-built-during-wwi-wwii-only-a-handful-survive.html>
- [16] The complete fleet of WWII [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://warfarehistorynetwork.com/daily/wwii/the-concrete-fleet-of-wwii/>
- [17] Ships made of concrete [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.amusingplanet.com/2015/11/ships-made-of-concrete.html>

[18] Sika CZ, s.r.o. | Výsledky vyhledávání | Sika CZ, s.r.o.. *Sika CZ, s.r.o. | Česká republika | Stavební chemie, průmyslové tmely a lepidla* | Sika CZ, s.r.o. [online]. [cit. 2019-0-23]. Dostupné z: https://cze.sika.com/cs/system/search.html?_charset_=UTF-8&searchtype=&searchText=sikamicrofibr

[19] Anti-Crak® HD - Sklocement Beneš, s.r.o.. *Sklocement Beneš, s.r.o. - Skleněná a polymerová vlákna do betonu* [online]. [cit. 2019-0-23]. Dostupné z: <http://www.sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/anti-crak-hd/>

[20] *Stavební firma JE-Art s. r. o.* [online]. [cit. 2019-0-23]. Dostupné z: <https://www.je-art.cz/dodavky-kompozitniho-materialu/#cedicova-vlakna>

[21] Vlákna do betonu BeneSteel 55 600 g | Stavebniny Janík. *Stavebniny Janík* [online]. Copyright © 2019 STAVEBNINY JANÍK. [cit. 2019-0-23]. Dostupné z: <https://www.stavebniny-janik.cz/vlakna-do-betonu-benesteel-55-600-g>

[22] MasterFiber 401 Konstrukční syntetické vlákno. [online]. [cit. 2019-0-23]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.basf.cz/cs-cz/products/masterfiber/masterfiber-401-konstruk%C4%8Dn%C3%AD-syntetick%C3%A9-vl%C3%A1kno>

11. Přílohy

A) Pravidla soutěže 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.

Scheduled program:

Thursday, 20 June 2019

18:00 – 20:00 Short films/presentations, team introductions

Friday, 21 June 2019

8:00-19:00 Concrete Canoe Cup, Dragon Boat Regatta and Concrete Bridge

Competitions

1. Concrete canoe competition

IV. Size of the concrete canoe:

Minimum length: 400 cm,

Maximum length: 600 cm,

Minimum width: 60 cm

Maximum width: 100 cm.

V. Additives that can be used

In the making of the canoe, any sort of additives can be utilized.

VI. Binders that can be used

Only those cement types can be used that comply with the

EN 197-1:2000 European regulation for the concrete of the canoe. The minimum requirement for cement content of the canoe is 250 kg/m³.

VII. Additive substances that can be used

Any concrete additive substance can be used for the concrete of the canoe.

VIII. Cement supplementary materials

Cement supplementary materials may be used for building the concrete canoe, for example, granulated dross, ash, pozzolana (trass), ground limestone, microsilica, metakaolin.

IX. Steel linings and other insertions

1. You may use mesh, textures, linings of any material but it is forbidden to use a stiff truss/framework for the canoe to be built on.
2. Cohesive watertight materials/plates/layers cannot be used.
3. The canoe needs to be covered with concrete both on the inside and outside. Consequently, all insertions/linings need to be covered with concrete too.
4. All materials that are not part of the concrete mixture are considered a lining/insertion. Exceptions are the seats for sitting and kneeling and the “protector/abrader” material on the side.

X. Polymers that can be used

For the concrete of the concrete canoe maximum, 2 kg polymers can be used.

Adhesives that can be used

1. The concrete canoe can be assembled from parts. The parts can be joined together with both adhesives and screws.
2. To repair cracks and damage that are noticed prior to racing adhesive or injectable materials can be used.

XI. Painting and coating the concrete canoe

1. Above the waterline the canoe’s outer surface can be decorated up to 70%, below the waterline the permitted limit is 25%. Individual designs or motifs can be used as decorations, but an advertisement/the team name can also be painted here.
2. Only silicate-based paints can be used.
3. Apart from this, the surface of the concrete canoe should be fair-faced concrete.
4. Besides the outer surface that shows the advertisement or team name, the canoe cannot have any painting, coating or insulation.

XII. Assisting tools/aids

1. The participants can use a seat the size of which is maximum 30 cm x 30 cm x 30 cm, made of any material. One seat can be used per person.
2. Any type of single-bladed paddle can be used for rowing.
3. For safety reasons a maximum 3m long (per side) and 10 cm wide “protector/abrader” material can be attached on both sides of the canoe in order to prevent any injuries or damage to the paddler’s hands or the paddle while rowing. However, the “protector/abrader” strip cannot be used to brace or reinforce the canoe.

XIII. Safety regulations

1. Only good swimmers can compete in the concrete canoe race.
2. Everyone participates in the race at their own risk.

3. The wearing of a lifejacket is highly recommended by the event organizers to ensure the safety of the participants. If required, the organizers can provide these.
4. Every canoe that enters the water must be equipped with a signalling buoy, which needs to be attached to the vessel with a 6m long rope. In case one of the canoes should sink, this buoy would signal its location.
5. Useful tip: the concrete canoes should be designed so in the event of a capsize, the boat should float instead of sinking to the bottom. For this it is advisable to use closed-cell foams.

XIV. Dress code

1. The people in the canoe need to wear safe clothes that do not hinder them while paddling.
2. In a canoe, the two team members need to wear identical t-shirts.

THE COMPETITION

XV. Presentation – a short film about the project

1. The teams have to sum up the design and creation process, introduce the team, the materials used and the methodology of the building of the canoe, touching upon the individual progress stages in a 6-minute video. The film can be presentation based, so an animated power point in Hungarian with English subtitles or in English with Hungarian subtitles.
2. The presentation video needs to be shown to the judges and fellow competitors on Thursday, 20 June 2019, at 6pm. It should be at least 5-minute long. The finalised short films need to be sent to the organizers by 19 June 2019 to the following email address:

david.julia@sailforyou.hu With respect to the size of the file, please send the videos via a file sending application.

On the occasion, the teams get an additional 2 minutes to hold a brief speech during which they can introduce the individual team members, present the name of the team and the team philosophy.

3. For the introduction, the organizers will provide a projector and a screen.
4. One digital format copy of the presentation (on a flash drive/memory stick) will need to be given to the jury after the presentation.
5. The points awarded for the presentation will count towards the final evaluation.
6. The introduction of the teams, as well as the canoes, will take place on the waterfront in 2 minutes in a rather spectacular way. Every team needs to choose marching music, which should be attention-seeking, creative, funny, but at the same time professional! This will also count towards the final evaluation.
7. In the course of the presentation, the team will need to show, and present the jury with 2 pieces of slab used for a regular mortar examination, made of the concrete they used for the making of their canoe. Size should be 4 cm x4 cm x16 cm.

XVI. EVENTS/RACES

The teams have to complete 4 races with the concrete canoe. In two of these 2 men compete, out of which one is a “return” race, about this the course description will give more detailed information. One race will see 2 women compete in the canoe and the fourth is a mixed gender race with one boy and one girl compete.

All 4 races will take place on an approximately 200-meter course. The teams will get points based on the results. The winning team will get the most points, while the last team will get the fewest. The points from the four races will be added up and this will determine the final result.

In case of equal points, the team with the better results will win. If the teams have the same results, then the result in the last race will count and decide the competition. Any of the men can row from the registered competitors in the two men races (it is possible to swap). Bearing in mind that two people need to paddle the canoe, both of them need to be in the boat when crossing the finish line.

XVII. Evaluation, prizes

The registered concrete canoes, participants and their performance and compliance with the competition regulations will be judged by an independent jury, called on by the organizers.

During the evaluation process, 4 criteria will be examined by the jury, the completion of which they will reward with points.

I. Design of the concrete canoe, imaginativeness and production.

II. Presentation, the video that introduces the team, the project and the making of the canoe.

III. The spectacular 2-minute procession and display of canoes on the waterfront

IV. The results achieved by the teams during races (2 men, 1 mixed gender and 1 female race)

The team with the most points will win the competition.

The first 3 teams respectively will get medals and a cup.

But additional prizes will also be handed out.

Each competitor will receive a participation card.

The winning team will get the VIII. Hungarian Concrete Canoe Cup, in addition, they will get to host the travelling cup for a year, on which there will appear the team's name.

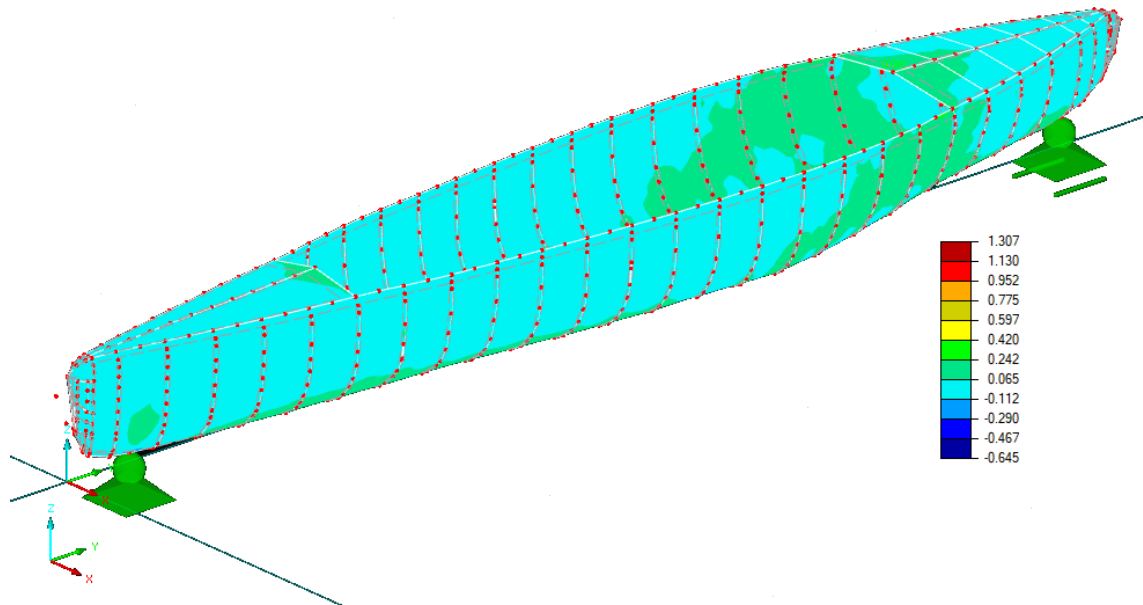
Application

1. Registering for the competition is by filling in the application form, which may be downloaded from the following link: Registration form
2. Deadline for pre-registration: 12th April 2019
3. Deadline for entry: 15th May 2019. We ask the teams to kindly send back the filled in application forms and give the exact number of competitors by this date. The registration will only become valid after paying the registration fee.
4. The organizer of the event, the Sailforyou Ltd. will make out an invoice of the registration fee and will send it via post and email to the registered team's billing address.

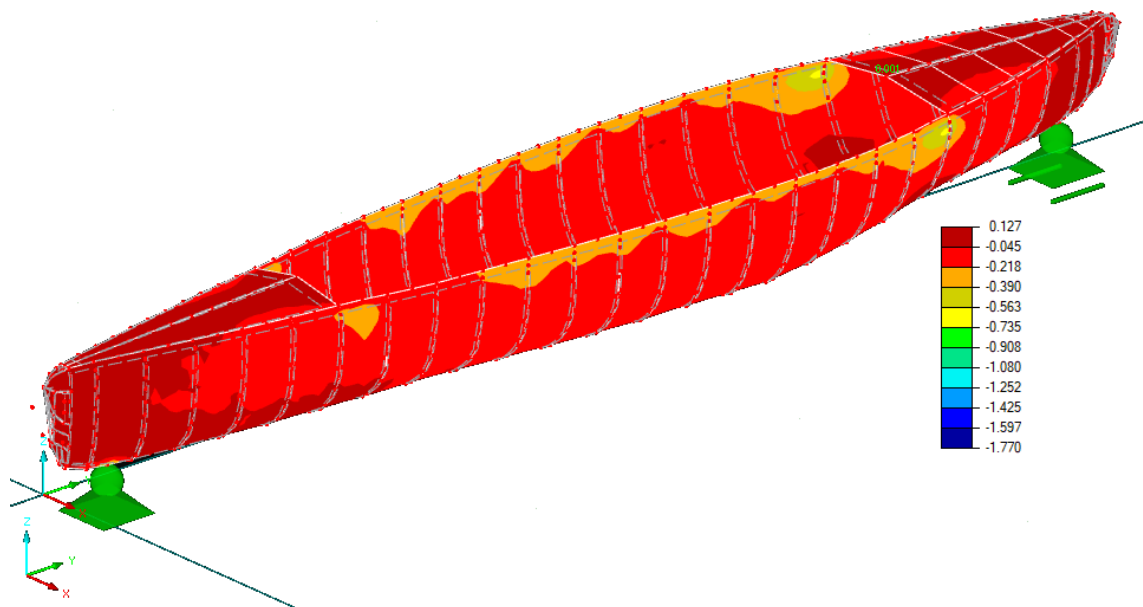
Further information is available on www.betonkenu.hu, the official website of the race. According to traditions, the participating teams will have the chance to take part in the dragon boat regatta. The organizers reserve the right to change this rule book, but the points above should fundamentally be considered as guidelines, with special considerations regarding the building parameters.

B) Výsledky analýzy v Dlubal RFEM:

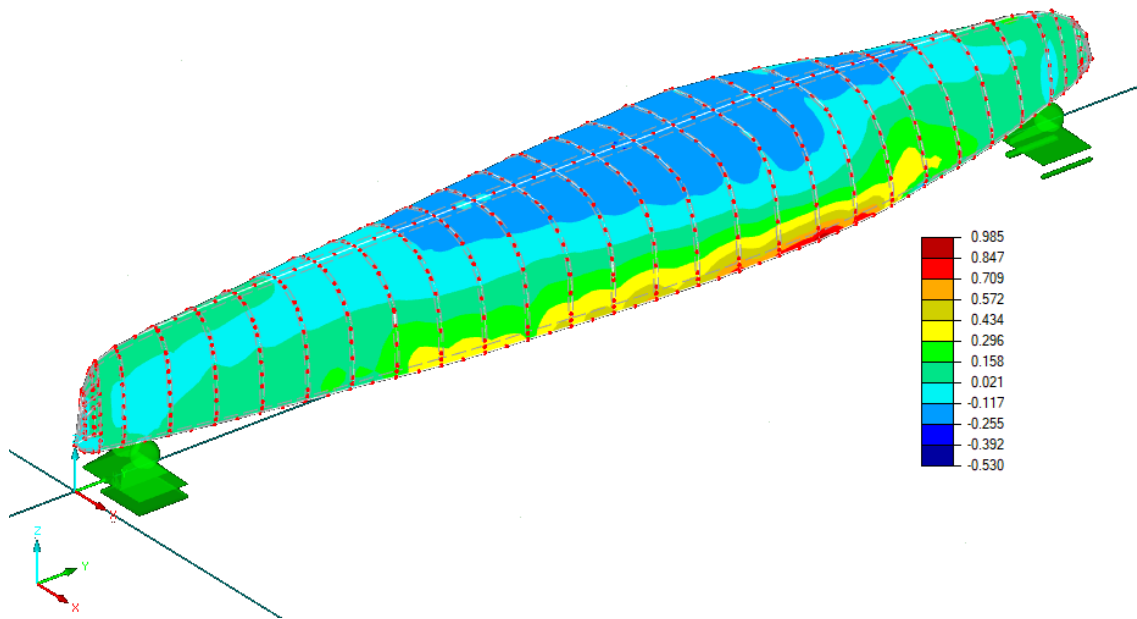
Jsou znázorněny hodnoty σ_1 a σ_2 vždy pro dominantní povrch



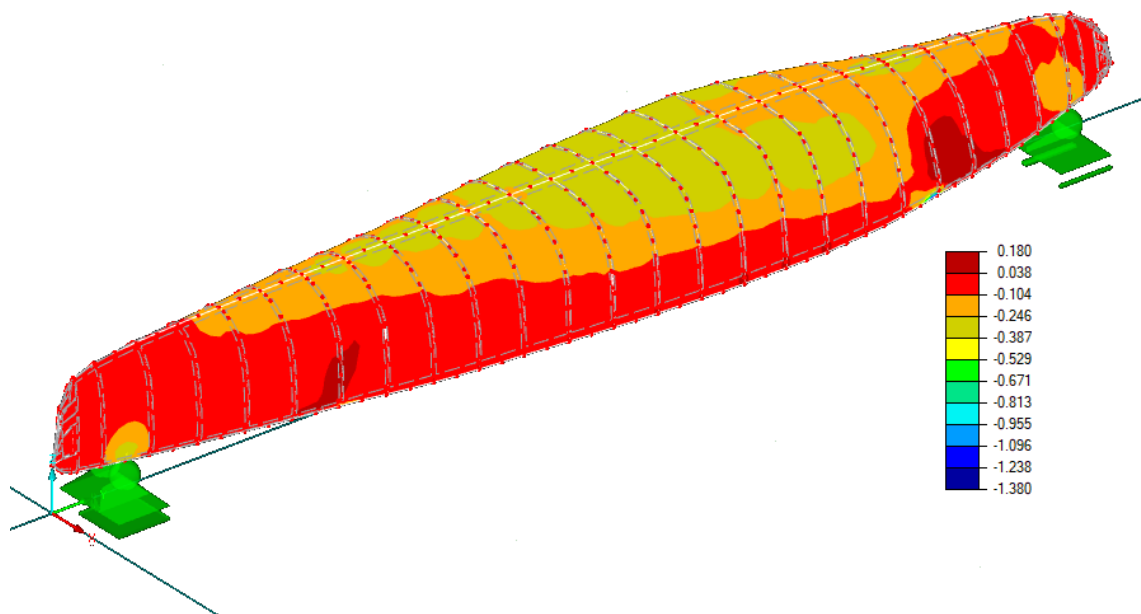
1. zatěžovací stav - největší tahové napětí na vnějším povrchu



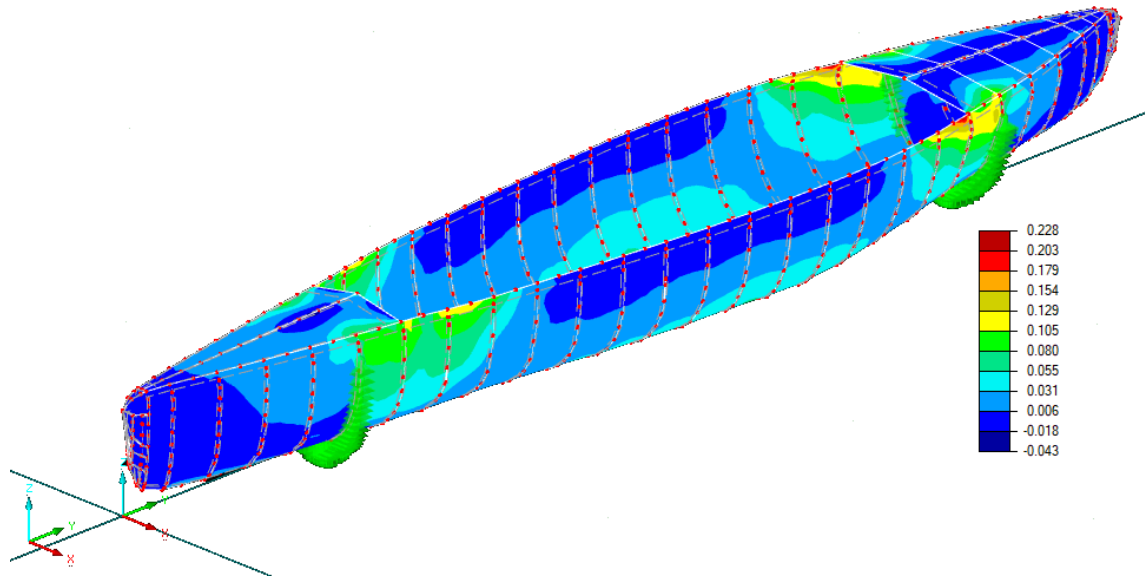
1. zatěžovací stav - největší tlakové napětí na vnějším povrchu



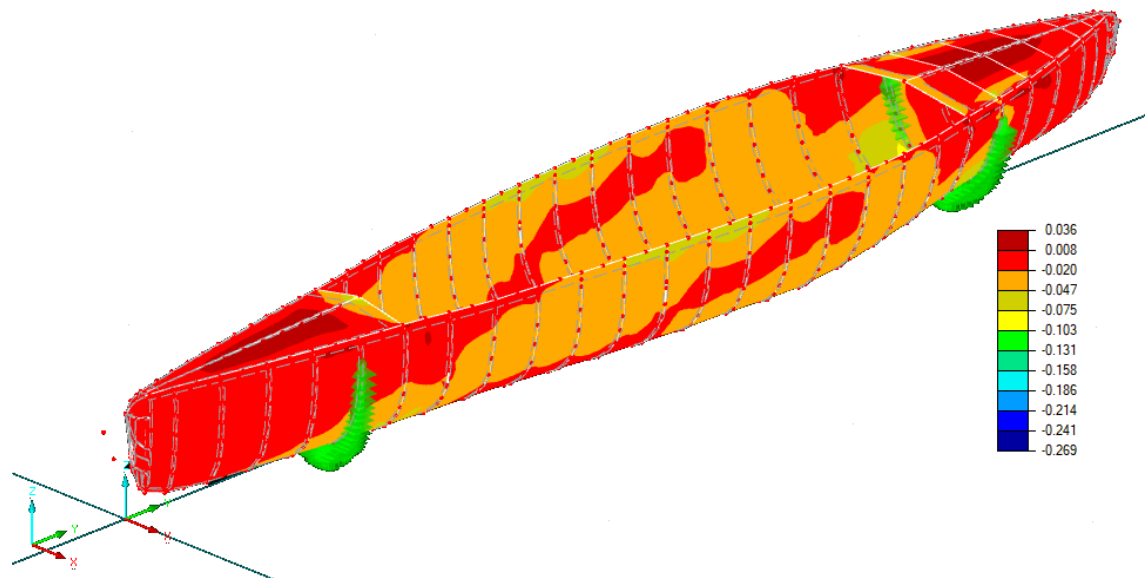
2. zatěžovací stav - největší tahové napětí na vnitřním povrchu



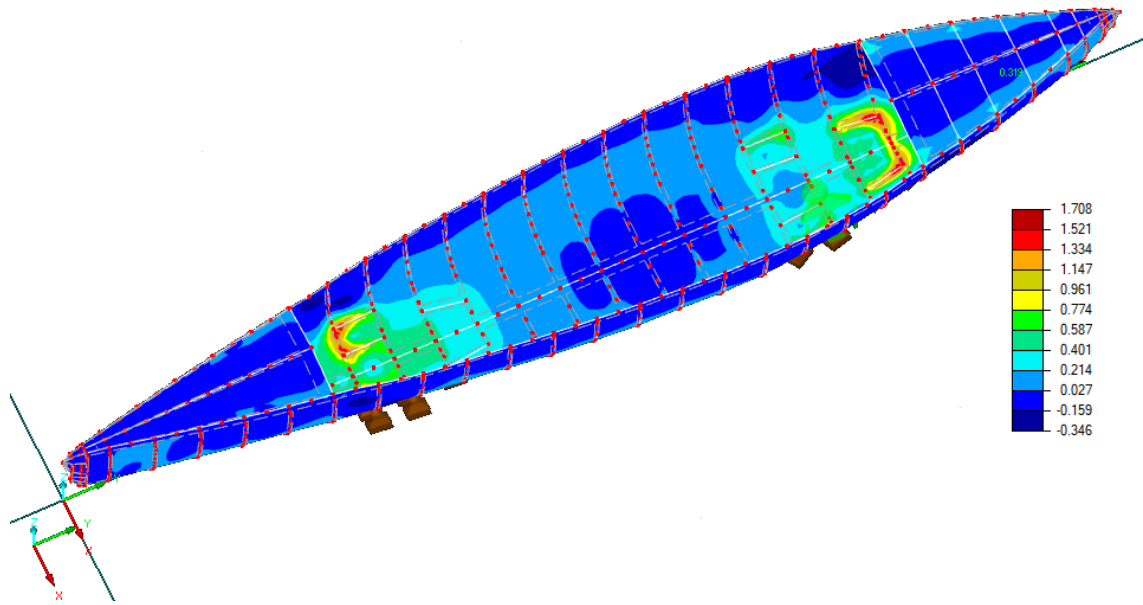
2. zatěžovací stav - největší tlakové napětí na vnitřním povrchu



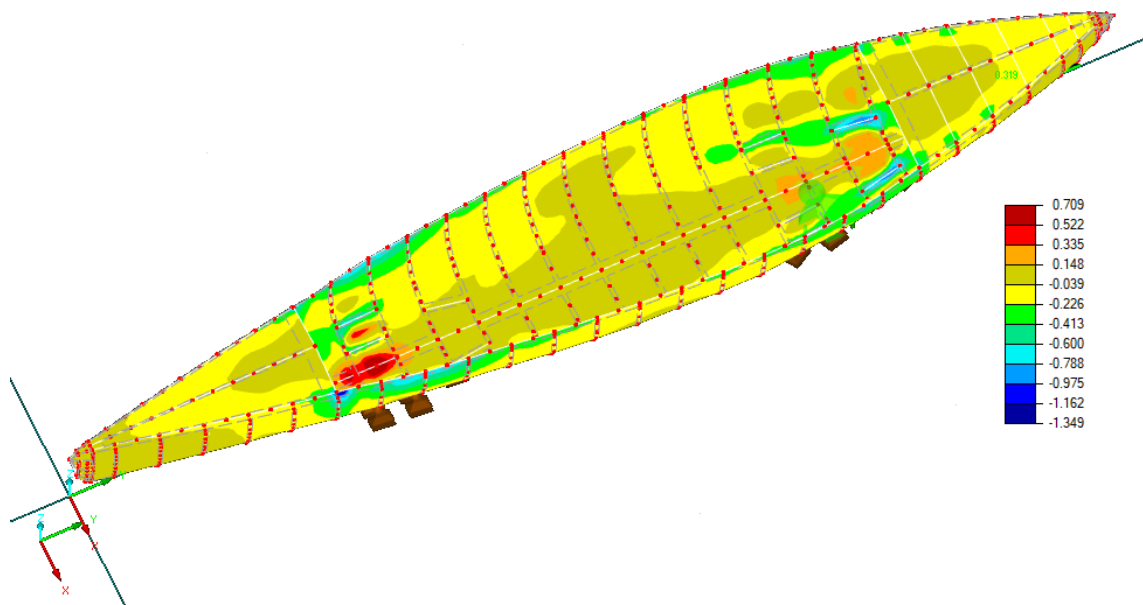
3. zatěžovací stav - největší tahové napětí na vnějším povrchu



3. zatěžovací stav - největší tlakové napětí na vnitřním povrchu



4. zatěžovací stav - největší tahové napětí na vnitřním povrchu



4. zatěžovací stav - největší tlakové napětí na vnějším povrchu