

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

2021

**Ing. Luboš LIMBERG**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: P2031 Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba strojů a zařízení

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

Minerální litiny ve stavbě obráběcích strojů

Student DSP:

**Ing. Luboš LIMBERG**

Školitel:

**prof. Ing. Václava LAŠOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2020/2021

## **PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

### **Minerální litiny ve stavbě obráběcích strojů**

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucí mé práce prof. Lašové za vstřícný a odborný přístup ve vedení práce. Dále děkuji týmu CK z ČVUT v Praze, za ochotu konzultovat odborná témata týkající se mé práce. Děkuji také kolegům z katedry konstruování strojů za udělené rady. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu během celého studia.

## ANOTACE

|                             |  |                  |
|-----------------------------|--|------------------|
| <b>AUTOR</b>                | Příjmení (včetně titulů)<br>Limberg, Ing.              | Jméno<br>Luboš   |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b>        | Stavba strojů a zařízení                               |                  |
| <b>VEDOUcí PRÁCE</b>        | Příjmení (včetně titulů)<br>Lašová, prof., Ing., Ph.D. | Jméno<br>Václava |
| <b>PRACOVÍŠTĚ VEDOUcíHO</b> | KKS  |                  |
| <b>DRUH PRÁCE</b>           | <b>disertační</b>                                      |                  |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>          | Minerální litiny ve stavbě obráběcích strojů           |                  |

Fakulta: Strojní  
Katedra: Stavba strojů a zařízení  
Rok odevzdání: 2021

### Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                      |   |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| <b>Celkem</b> | 88 | <b>Textová část</b> | 88 | <b>Grafická část</b> | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

|  |   |
|--|---|
| <b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY</b> | Tato práce je zaměřena na úvodní souhrn vlastností minerálních litin. Dále potom na zkoumání těchto vlastností polymerbetonu v přímém srovnání s kovovými materiály. Cílem práce je zjistit, zda je minerální litina vhodnou alternativou pro použití v konstrukci obráběcích strojů. |
| <b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>   | minerální litiny, polymerbeton, mkp analýza, kompozity, obráběcí stroje, lože, materiály  |

## SUMMARY

|                          |   |                 |
|--------------------------|---|-----------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname (including of Degrees)<br>Limberg, Ing.                   | Name<br>Luboš   |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | Design of Machines and Equipment                                  |                 |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (including of Degrees)<br>Lašová, prof.,Doc., Ing., Ph.D. | Name<br>Václava |
| <b>INSTITUTION</b>       |   |                 |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>dissertation</b>   |                 |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Polymer concrete in the design of machine tools                   |                 |

Faculty: Mechanical Engineering  
Department: Design of Machines and Equipment  
Submitted in: 2021

### Number of pages (A4 a eq. A4)

|                |    |  |                  |    |  |                       |   |
|----------------|----|--|------------------|----|--|-----------------------|---|
| <b>Totally</b> | 88 |  | <b>Text part</b> | 88 |  | <b>Graphical part</b> | 0 |
|----------------|----|--|------------------|----|--|-----------------------|---|

|   |  |
|---|--|
| <b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b> | This paper focuses on an initial summary of properties of polymer concrete. These properties are investigate in direct comparison with metallic materials. The aim of the thesis is to find out whether polymer concrete is a suitable alternative for use in machine tool construction. |
| <b>KEY WORDS</b>  | Polymer concrete, fem analysis, composites, machine-tool, bed, materials   |

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam obrázků.....   | 7  |
| Seznam tabulek.....   | 9  |
| Seznam zkratk .....   | 10 |
| Glosář.....   | 11 |
| 1 Úvod.....   | 12 |
| 2 Cíle disertační práce.....  | 13 |
| 3 Současný stav poznání zkoumané problematiky.....                              | 14 |
| 3.1 Historický vývoj polymerních betonů.....                                    | 14 |
| 3.2 Možnosti v užití materiálů pro výrobu nosných částí obráběcích strojů ..... | 14 |
| 3.3 Složení a vlastnosti polymer-betonů .....                                   | 17 |
| 3.3.1 Složení polymer-betonu .....  | 17 |
| 3.3.2 Souhrn významných vlastností polymer-betonu .....                         | 18 |
| 3.3.3 Srovnání mechanických a technologických vlastností s litinou a ocelí..... | 19 |
| 3.4 Konstrukční zásady při navrhování z polymerních betonů.....                 | 20 |
| 3.4.1 Geometrické zásady pro konstrukci odlitku.....                            | 21 |
| 3.4.2 Hlavní zásady tvorby forem pro polymer-betonové odlitky .....             | 25 |
| 3.4.3 Dokončovací úpravy odlitků.....   | 28 |
| 3.5 Zkouška tlakem polymer-betonového vzorku .....                              | 30 |
| 3.5.1 Teorie a příprava měření.....   | 30 |
| 3.5.2 Výsledné hodnoty měření.....  | 31 |
| 3.5.3 Posouzení lomových ploch .....  | 32 |
| 4 Předvýzkum.....   | 33 |
| 4.1 Vymezení řešené oblasti.....  | 33 |
| 4.2 MKP analýza napětí na rozhraní materiálů při teplotním zatížení.....        | 34 |
| 4.2.1 Výpočtový model a materiálové vlastnosti.....                             | 34 |
| 4.2.2 Tvorba sítě.....  | 35 |
| 4.2.3 Okrajové podmínky .....   | 35 |
| 4.2.4 Výsledky analýzy.....   | 36 |
| 4.3 Konstrukční PB náhrada konvenčního lože obráběcího stroje.....              | 39 |
| 4.3.1 Požadavky kladené na lože a možnosti jejich zhotovení.....                | 39 |
| 4.3.2 Vyrobitelnost odlitku – konstrukce formy .....                            | 41 |
| 4.3.3 Hybridní odlitek.....   | 43 |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3.4 | Ekonomická studie.....  | 44 |
| 4.3.5 | Souhrn poznatků ze studie náhrady lože.....   | 45 |
| 4.4   | Výpočtová porovnávací studie lože soustruhu.....  | 45 |
| 4.4.1 | Konstrukce litinového lože.....   | 45 |
| 4.4.2 | Konstrukce polymer-betonového lože.....   | 47 |
| 4.4.3 | Podmínky MKP analýzy .....  | 47 |
| 4.4.4 | Výsledky MKP analýzy .....  | 50 |
| 4.4.5 | Souhrn poznatků z výpočtové studie .....  | 52 |
| 5     | Výzkumný záměr .....  | 53 |
| 5.1   | Výpočet stávajícího řešení.....   | 54 |
| 5.1.1 | Referenční Výpočtový model.....   | 54 |
| 5.1.2 | Výsledky analýz referenčního modelu .....   | 57 |
| 5.1.3 | Souhrn výsledků referenčního modelu .....   | 61 |
| 5.2   | Návrh nových variant .....  | 62 |
| 5.2.1 | Konstrukce varianty I.....  | 63 |
| 5.2.2 | Konstrukce varianty II.....   | 64 |
| 5.2.3 | Konstrukce varianty III.....  | 65 |
| 5.2.4 | Výsledky analýz variant I., II. a III. a porovnání s referenčními výsledky .....                                      | 66 |
| 5.2.5 | Vyhodnocení nejlepší varianty dle výsledků analýz.....  | 73 |
| 6     | Možná podoba formy nově navržené varianty III.....  | 75 |
| 6.1   | Díly formy .....  | 76 |
| 6.2   | Postup výroby dílu .....  | 76 |
| 7     | Metodika vyhodnocování vhodnosti využití polymer-betonu jako náhrady konvenčních materiálů.....                       | 77 |
| 7.1   | Souhrn zjištěných pozitivních a negativních vlastností polymerního betonu, hybridního dílu a konvenčního řešení ..... | 78 |
| 8     | Vyhodnocení výsledků DiP .....  | 82 |
| 9     | Směřování dalších kroků zkoumané oblasti.....   | 84 |
| 10    | Citovaná literatura.....  | 85 |
| 11    | Publikační činnost doktoranda .....   | 87 |



## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 Litinové lože [12].....   | 14 |
| Obr. 2 Ocelový svařenec .....  | 15 |
| Obr. 3 Odlitek polymer–betonového lože [13].....                           | 16 |
| Obr. 4 Řešení hybridního odlitku [5] .....                                 | 16 |
| Obr. 5 Teplotní stabilita polymer–betonu [1].....                          | 18 |
| Obr. 6 Srovnání tlumících účinků polymer–betonu a litiny [15].....         | 18 |
| Obr. 7 Schéma víceúrovňového lití.....                                     | 21 |
| Obr. 8 Vyjímání částí formy a znázornění velikosti úkosu.....              | 22 |
| Obr. 9 Úprava ploch pro odvod vzduchu z formy .....                        | 22 |
| Obr. 10 Ukázka špatného a správného umístění nosných prvků v odlitku ..... | 23 |
| Obr. 11 Ukázka zakomponování manipulačních pouzder.....                    | 23 |
| Obr. 12 Ustavovací mechanismus s kapsou [5] .....                          | 24 |
| Obr. 13 Ustavení pomocí nivelačního prvku [5].....                         | 24 |
| Obr. 14 Pružný ustavovací prvek ISOLOC UMS [5].....                        | 25 |
| Obr. 15 Forma pro polymer–beton [14].....                                  | 26 |
| Obr. 16 Závitové vložky [5] .....  | 27 |
| Obr. 17 Ukázka připravené formy pro lití včetně všech prvků [5].....       | 28 |
| Obr. 18 Čelní deska pro polymer–betonový odlitek.....                      | 28 |
| Obr. 19 Rám stroje odlitý společností Schneeberger [5] .....               | 29 |
| Obr. 20 Testované vzorky [2] .....   | 30 |
| Obr. 21 Graf přepočtených hodnot z trhacího stroje [2].....                | 31 |
| Obr. 22 Vzorky po zkouškách [2].....                                       | 32 |
| Obr. 23 základní rozměry modelu .....                                      | 34 |
| Obr. 24 Ukázka sítě CHEXA(8) o velikosti prvku 5mm .....                   | 35 |
| Obr. 25 Výpočetní model s teplotním zatížením.....                         | 35 |
| Obr. 26 Výsledky simulace (Podmínky I.).....                               | 36 |
| Obr. 27 Výsledky simulace (Podmínky II.).....                              | 37 |
| Obr. 28 Výsledky simulace (Podmínky III.).....                             | 38 |
| Obr. 29 Původní lože (etalon).....   | 39 |
| Obr. 30 Rozbor problémových částí odlitku.....                             | 40 |
| Obr. 31 Příklad vhodné a nevhodné úpravy plochy pro odvod vzduchu.....     | 41 |
| Obr. 32 Rozbor částí formy .....   | 42 |
| Obr. 33 Svařenec pro hybridní odlitek .....                                | 43 |
| Obr. 34 Hybridní odlitek .....   | 43 |
| Obr. 35 Litinové lože .....  | 46 |
| Obr. 36 Znázornění otvorů pro fixátory .....                               | 46 |
| Obr. 37 Polymerbetonové lože .....   | 47 |
| Obr. 38 Působící síly .....  | 48 |
| Obr. 39 Znázornění celého výpočtového modelu .....                         | 49 |
| Obr. 40 Znázornění kontaktů ve výpočtovém modelu .....                     | 49 |
| Obr. 41 Maximální napětí v litinovém loži .....                            | 50 |

---

|   |    |
|---|----|
| Obr. 42 Maximální napětí v polymer–betonovém loži .....   | 50 |
| Obr. 43 Maximální deformace v litinovém loži.....   | 51 |
| Obr. 44 Maximální deformace v polymer–betonovém loži .....                                      | 51 |
| Obr. 45 Stroj a vyznačená stojna (zeleně).....  | 53 |
| Obr. 46 Referenční model (dílec) .....  | 54 |
| Obr. 47 Zatížení modelu a jeho ukotvení.....  | 55 |
| Obr. 48 Tvary vlastních frekvencí referenčního modelu.....                                      | 58 |
| Obr. 49 Deformace referenčního modelu.....  | 59 |
| Obr. 50 Napětí v referenčním modelu .....   | 60 |
| Obr. 51 Vzor hybridního konceptu.....   | 62 |
| Obr. 52 Ukázka svařenců využitých v hybridním dílci .....                                       | 63 |
| Obr. 53 Model varianty I.....   | 63 |
| Obr. 54 Hrubá ukázka formy pro variantu I. ....   | 64 |
| Obr. 55 Hrubá ukázka formy pro variantu II.....   | 64 |
| Obr. 56 Model varianty III. ....  | 65 |
| Obr. 57 Hrubá ukázka formy pro variantu III.....  | 65 |
| Obr. 58 Tvary vlastních frekvencí varianty I. ....  | 67 |
| Obr. 59 Tvary vlastních frekvencí varianty II.....  | 67 |
| Obr. 60 Tvary vlastních frekvencí varianty III. ....  | 67 |
| Obr. 61 Deformace dílců – zleva: referenční model, varianta I., varianta II., varianta III....  | 68 |
| Obr. 62 Napětí v dílcích – zleva: referenční model, varianta I., varianta II., varianta III.... | 69 |
| Obr. 63 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty II. ....                                  | 72 |
| Obr. 64 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty I. ....                                   | 72 |
| Obr. 65 Srovnání útlumu mezi variantami.....  | 72 |
| Obr. 66 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty III.....                                  | 72 |
| Obr. 67 Možná verze formy pro odlití varianty III. ....   | 75 |
| Obr. 68 Rozhodovací algoritmus.....   | 80 |
| Obr. 69 Logický postup při návrhu polymer–betonového dílce .....                                | 81 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálů [1] .....   | 20 |
| Tab. 2 Rozměry zkušebních vzorků [2].....  | 31 |
| Tab. 3 Hodnoty $R_{mt}$ [2].....   | 31 |
| Tab. 4 Souhrnné zprůměrované výsledné hodnoty zjištěné zkouškou [2] .....                  | 32 |
| Tab. 5 Vlastnosti materiálů [1].....   | 34 |
| Tab. 6 Výsledné hodnoty (Podmínky I.).....   | 36 |
| Tab. 7 Výsledné hodnoty (Podmínky II.).....  | 37 |
| Tab. 8 Výsledné hodnoty (Podmínky III.) .....  | 38 |
| Tab. 9 Srovnání cen celkové výroby lože .....  | 44 |
| Tab. 10 Časový harmonogram výroby polymer-betonového lože .....                            | 44 |
| Tab. 11 Velikosti sil .....  | 48 |
| Tab. 12 Souhrn výsledků z MKP studie .....   | 52 |
| Tab. 13 Vlastnosti oceli využitě pro referenční model.....                                 | 54 |
| Tab. 14 Vlastní frekvence referenčního modelu .....  | 57 |
| Tab. 15 Maximální deformace v jednotlivých směrech .....                                   | 59 |
| Tab. 16 Maximální napětí referenčního modelu .....   | 60 |
| Tab. 17 Tuhost referenčního modelu v jednotlivých směrech.....                             | 60 |
| Tab. 18 Hmotnost referenčního modelu .....   | 61 |
| Tab. 19 Hodnota koeficientu ztráty stability.....  | 61 |
| Tab. 20 Hodnoty poměrného útlumu a logaritmického dekrementu .....                         | 61 |
| Tab. 21 Vlastní frekvence variant I, II. a III. a jejich porovnání s referenčním modelem.. | 66 |
| Tab. 22 Výsledky maximální deformace v jednotlivých směrech pro variantu I, II. a III.     | 68 |
| Tab. 23 Výsledky maximálního napětí pro variantu I, II. a III. ....                        | 69 |
| Tab. 24 Výsledky tuhostí pro variantu I, II. a III.....                                    | 70 |
| Tab. 25 Výsledné hodnoty ztráty stability pro variantu I, II. a III. ....                  | 70 |
| Tab. 26 Hmotnosti variant I, II. a III. ....   | 71 |
| Tab. 27 Poměrný útlum a logaritmický dekrement pro variantu I, II. a III.....              | 71 |
| Tab. 28 Vyhodnocení nejlepší varianty.....   | 73 |
| Tab. 29 Výhody/nevýhody - polymer-betonový odlitek.....                                    | 78 |
| Tab. 30 Výhody/nevýhody - hybridní odlitek.....  | 79 |
| Tab. 31 Výhody/nevýhody - konvenční řešení.....  | 79 |

## Seznam zkratk

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\rho$               | Měrná hmotnost  |
| E                    | Modul pružnosti   |
| $R_m$                | Mez pevnosti v tahu                                     |
| $R_{mt}$             | Mez pevnosti v tlaku                                    |
| $R_{mo}$             | Mez pevnosti v tahu při ohybu                           |
| $\delta$             | Logaritmický dekrement tlumení                          |
| $\lambda$            | Součinitel tepelné vodivosti                            |
| c                    | Měrná tepelná kapacita                                  |
| $\beta$              | Teplotní součinitel roztažnosti                         |
| k                    | Tuhost  |
| F                    | Zatěžující síla   |
| $\Delta l$           | Rozdíl délek (deformace)                                |
| D                    | Poměrný útlum   |
| w(t)                 | Výchylka v čase t                                       |
| w(t+T <sub>D</sub> ) | Výchylka v čase t + T <sub>D</sub>                      |
| T <sub>D</sub>       | Doba periody  |
| n                    | Počet kmitů v časovém úseku                             |
| CK-SVT               | Centrum kompetence – strojírenská a výrobní technologie |
| PB                   | Polymerbeton  |
| PC                   | Polymer-concrete  |
| MKP                  | Metoda konečných prvků                                  |
| DiP                  | Disertační práce  |

## Glosář

### **Kompozit**

Jedná se o materiál ze dvou, nebo více substancí s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí.

### **Hydratace**

Reakce, při které se daná látka nasycuje vodou

### **Polymerace**

Chemická reakce, při které z malých molekul (monomerů) vznikají vysokomolekulární látky (polymery)

### **Polykondenzace**

Společně s polyadicí jeden z typů stupňovité polymerace – reakce syntetických makromolekulárních látek. Jde o postupnou kondenzaci monomerů a oligomerů. Vznikají při ní polykondenzáty.

### **Constrains**

Okrajové podmínky v úlohách MKP

### **Fixátor**

Kotvicí prvek obráběcích strojů

# 1 Úvod

Kompozitní materiály lze označit jako jedny z nejpokročilejších materiálů poslední doby. Jejich pevnost a tuhost v kombinaci s nízkou hmotností přináší zajímavé možnosti v konstrukci a vývoji nejen moderních obráběcích strojů. V dnešní době jsou již běžně nahrazovány menší a méně zatěžované díly, které byly původně vyrobeny z kovu, plasty a kompozitními materiály.

Polymerní betony mají velký potenciál pro hojně využití u obráběcích strojů. Dokáží zefektivnit a zkvalitnit samotnou výrobu díky svým vlastnostem, a to za cenu srovnatelnou s cenou litinových odlitků. Například schopnost pohlcení vibrací polymerních betonů je až desetkrát vyšší než u oceli nebo litiny. Tato schopnost dokáže umožnit rychlejší obrábění při zachování požadovaných přesností. Díky nízké viskozitě materiálu dokáže být stejně velký odlitek polymer-betonu až třikrát lehčí než ocelový nebo litinový. Tato výhoda umožní získat ekonomické úspory při výrobě základů stroje.

Při konstrukci z těchto materiálů je však nutné počítat i s některými nepříliš vhodnými vlastnostmi. Polymerní betony navzdory svým četným výhodám mají velice nízkou pevnost v tahu, která je až padesátinásobně nižší než u běžných konstrukčních ocelí. Mez pevnosti v tlaku je také zhruba třikrát nižší než u běžných ocelí využívaných v konstrukci obráběcích strojů. Ze zmíněných vlastností je vidět, že je nutné stanovit určitý směr, kterým se bude muset konstrukce polymer-betonových dílců při návrhu ubírat.

Všechny výše uvedené pozitivní vlastnosti mohou být eliminovány, pokud se nepřistoupí ke konstrukci celkového konceptu stroje správně. Pokud bude například využit polymerní materiál jako podloží a části ocelového vedení stroje budou řešeny konvenčně, potom může být například schopnost pohlcení vibrací několikanásobně snížena. Na druhou stranu, bude-li použito vedení ocelové, eliminuje se hrozba trvalého poškození polymerního betonu zapříčiněné vysokými silami ve vedení. Dochází-li ke kombinaci kovu s polymerním betonem, můžeme mluvit o hybridní struktuře, která přináší další možnosti zkoumání v rámci využitelnosti a správného návrhu dílců obráběcích strojů.

Cílem disertační práce by mělo být rozšíření využitelnosti kompozitních materiálů, konkrétně polymerních betonů, do velkých dílců obráběcích strojů.

## 2 Cíle disertační práce

1. Rešerše technologie minerálních litin (polymer–betonů)
2. Srovnání základních vlastností s konvenčními materiály ve stavbě obráběcích strojů
3. Souhrn problematiky výroby konstrukčních dílů polymer–betonů, jako přímé náhrady za díly vyrobené z konvenčních materiálů
4. Porovnání polymer–betonových odlitků s konvenčním řešením pomocí výpočtových simulací, porovnání v dalších oblastech a nalezení případných problémů v konstrukci polymer–betonových dílců
5. Definování výzkumného záměru na základě zjištěných údajů a informací
6. Testování polymer–betonového dílce pro zjištění vhodnosti využití materiálu k výrobě vhodného polymer–betonového dílce na velkém obráběcím stroji
7. Vytvoření obecných doporučení a kroků pro konstrukci v případě polymer–betonových struktur

### 3 Současný stav poznání zkoumané problematiky

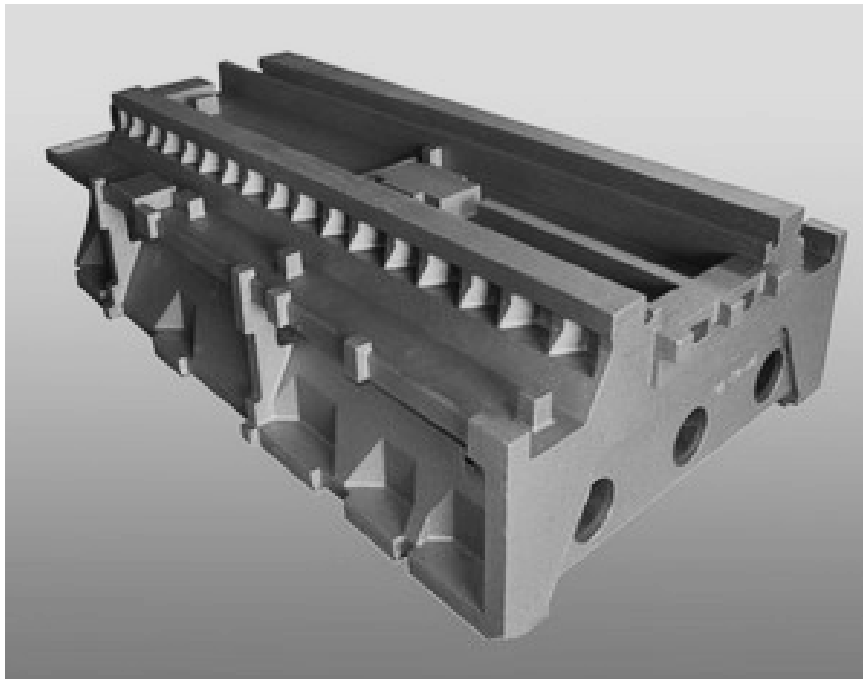
#### 3.1 Historický vývoj polymerních betonů

První pokusy o tvorbu nového syntetického betonu, které směřovaly až k dnešní podobě polymerního betonu, začaly vznikat kolem roku 1950, kdy se objevují první patenty. Jednalo se o materiál, který byl svou strukturou podobný již dlouho známému cementovému betonu, ale jako pojivo využíval syntetickou pryskyřici. Kromě pojiva se od klasického betonu lišil také procesem tuhnutí. Klasický beton využívá hydrataci pro zvýšení tvrdosti a pevnosti. Zde dochází k polyreakci (polymeraci, polyadici, polykondenzaci) syntetické pryskyřice, která je původně dodávána v monomerním stavu. Od roku 1984 se na základě mezinárodní konvence tento druh materiálů nazývá polymer-beton a je značen zkratkou PC z anglického „Polymer concrete“.

#### 3.2 Možnosti v užití materiálů pro výrobu nosných částí obráběcích strojů

##### Odlitky z litiny

Jeden z nejvyužívanějších způsobů výroby částí strojů jsou odlitky z litiny. Tyto odlitky jsou nejčastěji využívány u konvenčních strojů, jelikož se jedná o rozšířenou a prověřenou technologii, která je zároveň cenově dostupná (Obr. 1).



Obr. 1 Litinové lože [12]



### Ocelové svařence a odlitky

Jednou z výhod svařenců (Obr. 2) je absence potřeby výroby formy, která bývá u odlitků často nejdražší položkou při jejich výrobě. Zároveň má ocel oproti litině vyšší modul pružnosti. Nevýhodou jsou horší tlumící schopnosti oproti litině i nekonvenčním materiálům.



Obr. 2 Ocelový svařenec

### Odlitek z minerální litiny

Odlitky z minerální litiny (Obr. 3) jsou již celkem často využívány u přesných obráběcích strojů malé a střední velikosti. Jejich výhodou je vysoká teplotní stabilita a velmi dobré tlumící vlastnosti. Forma zpravidla nebývá tak složitá, jako je tomu u forem pro litinové odlitky, jelikož není definována maximální možná tloušťka stěny odlitku. Výsledný odlitek je tedy plné těleso, které je možné odlehčit jádry. Díky 3x nižší viskozitě minerální litiny oproti viskozitě litiny a vloženým jádrům, může být výsledný odlitek i přes větší objem materiálu lehčí, než litinový odlitek.



Obr. 3 Odlitek polymer-betonového lože [13]

### Hybridní odlitek

Tento způsob spojuje všechny předchozí varianty, kdy jsou ocelové nebo litinové prvky zalaty do minerální litiny (Obr. 4). Nahrazením prvků minerální litiny za prvky z oceli lze docílit dobrých pevnostních vlastností v místech, kde by minerální litině hrozila deformace v podobě prasklin. Při vyváženém spojení obou materiálů lze také docílit velmi dobrých tlumících vlastností. Nevýhodou této varianty je vyšší cena, která může být zapříčiněna přípravou dvou forem (pro litinové prvky a pro polymer-betonové prvky) a také vyšší hmotnost v porovnání s odlitkem z minerální litiny.



Obr. 4 Řešení hybridního odlitku [5]

### 3.3 Složení a vlastnosti polymer-betonů

Polymer–beton je čím dál více využíván jako alternativní materiál k litině a oceli při konstrukci loží menších obráběcích strojů. Jedná se o částicový kompozit, který je složen z minerálů, které slouží jako plnivo. Matrice je potom složena z pryskyřice a tvrdidla. Tento materiál přináší zajímavé a pro konstrukci velmi užitečné vlastnosti např. tlumení, rozměrovou stálost, teplotní stabilitu, vysokou tuhost, odolnost proti korozi a další.

#### 3.3.1 Složení polymer-betonu

Směs pro odlití polymer–betonových odlitků se skládá ze dvou základních složek – plniva a matrice. Tyto složky se během technologického procesu postupně upravují a v konečné fázi se smíchají, čímž vytvoří finální směs určenou pro odlévání.

##### Plniva

Jako příklad minerálů, které slouží jako plnivo, lze uvést žulu, křemen, čedič a další minerály. Zvolené plnivo a jeho struktura má zásadní vliv na vlastnosti odlitku. Plniva mohou být prášková (křemen, živec, vápenec...), vláknitá (skelná, uhlíková...), destičková (mastek, slída...). Pro kvalitu směsi je určujícím faktorem především tvar, velikost, rozložení a podíl plniva ve směsi.

##### Matrice

Matrice se skládá z tvrdidla a pryskyřice. Existují různé typy pryskyřic např. polyesterová pryskyřice, polyuretanová pryskyřice, ale nejrozšířenější pryskyřicí používanou v matrici je epoxidová pryskyřice, která se vyznačuje menším objemovým smrštěním než jiné typy. Epoxidová pryskyřice se také vyznačuje přílnavostí ke zvolenému typu pojiva a rozměrovou stálostí což je z hlediska konstrukce přesně pracujících strojů zásadním parametrem.

##### Aditiva

Do polymer–betonů se přidávají různá aditiva, která mají za úkol zvýšit kvalitu hotového odlitku odvodušněním, zlepšeným zatékáním do formy, snížením viskozity a zvýšením přílnavosti ve směsi. Patří sem také separační činidla, která usnadňují vyjímání hotového výrobku z formy.

##### Příprava směsi

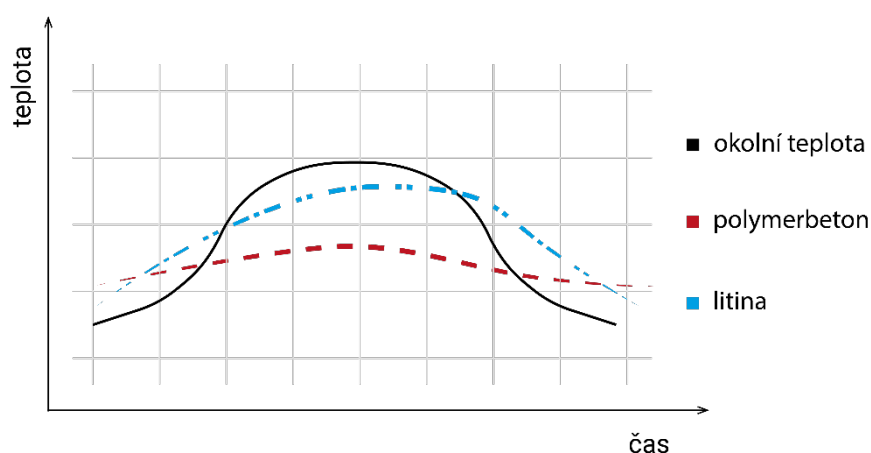
Příprava směsi je rozdělena do dvou hlavních fází. V první fázi se promíchají plniva různých zrnitostí a zvláště se promíchá pryskyřice s tvrdidlem. V druhé fázi dochází ke smíchání obou směrů pomocí šneků. Díky smíchání těchto složek vznikne finální směs s vyšší viskozitou, která umožní snadnější odlévání. Poměr matrice a plniva a jejich přesné složení je různé, dle požadovaných vlastností výsledného produktu a samozřejmě dle výrobce, který si své know-how před konkurencí chrání. Obecně však lze říci, že poměr

mezi plnivem a matricí se pohybuje zhruba v poměru okolo 80:20. Výsledná směs se může z míchacího zařízení rovnou odlévat do forem nebo do licích pánví.

### 3.3.2 Souhrn významných vlastností polymer-betonu

#### Teplotní stabilita

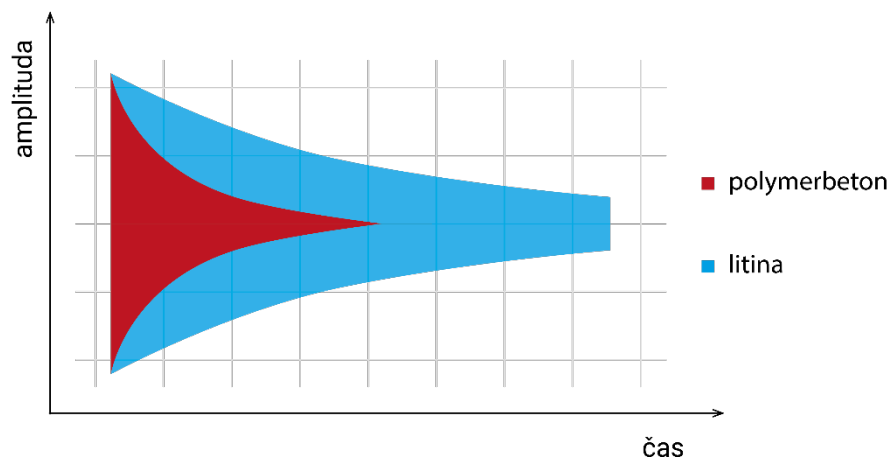
Díky vysoké měrné tepelné kapacitě v kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí reaguje polymer-beton na změny teplot v okolí ve srovnání s litinou pomaleji (Obr. 5).



Obr. 5 Teplotní stabilita polymer-betonu [1]

#### Tlumící schopnosti

Jak již bylo zmíněno, polymer-beton dosahuje až desetkrát lepších tlumících vlastností než je tomu u litiny (Obr. 6), díky tomu se z něj stal žádaný materiál pro konstrukci obráběcích strojů, jelikož zvyšuje přesnost obráběcího stroje. Díky vlastnostem, které má, dochází oproti litině ke snížení počtu vlastních kmitů a k posunutí vlastních frekvencí mimo kritickou oblast. Tyto vlastnosti umožňují dosáhnout obráběcímu stroji vyšší jakosti obroběných ploch a prodloužit životnost obráběcích nástrojů.



Obr. 6 Srovnání tlumících účinků polymer-betonu a litiny [15]

### Vnitřní pnutí odlitku

Po odlití a následném ochlazení dochází k vnitřnímu pnutí, které je vyvoláno smrštěním odlitku. Tato pnutí jsou díky složení polymer-betonu minimální, což nám zaručuje epoxidová pryskyřice, která má nízkou smrštivost. Kvalitní polymer-betony dosahují smrštivosti v rozmezí 0,02 – 0,03%. Jak uvádějí výrobci – rozměry se tolerují (v rámci smrštění) 0,3 mm na 1 metr.

### Degradace polymer-betonových výrobků

Polymer-beton je sám o sobě velice odolným materiálem, avšak existují vlivy, které dokáží znehodnotit výsledný výrobek. Mezi tyto vlivy patří – degradace korozní výztuže, napadení solemi, napadení sulfáty, působení kyselin, mechanický obrus a další.

### 3.3.3 Srovnání mechanických a technologických vlastností s litinou a ocelí

Při srovnání mechanických vlastností polymer-betonu s kovovými materiály má polymer-beton výhody i nevýhody. Jednou z hlavních výhod polymer-betonu jsou jeho tlumící schopnosti, které mohou být až desetkrát lepší než u oceli či litiny. Právě to je důvodem, proč se začal polymer-beton využívat v konstrukci přesných obráběcích strojů. Další výhodou je jeho hustota, která je třikrát nižší, což znamená, že výsledné produkty jsou lehčí. Výhoda u kovových materiálů spočívá zejména v pevnosti v tahu, tlaku a ohybu, kde kovové materiály dosahují až několikanásobně vyšších hodnot, než které je schopen poskytnout polymer-beton.

Ve srovnání pracnosti finálních úprav na surových odlitcích z kovu a polymer-betonu nalezneme další výhody polymer-betonu. Při dokončujících operacích u kovových odlitků je nezbytnou součástí obrábění funkčních ploch, žhánání na odstranění pnutí v případě předchozího svařování či vrtání a závitování. Ve srovnání s tím, surový polymer-betonový odlitek již může poskytnout dostatečně kvalitní vlastnosti, aby dokončující úpravy byly minimální, a to především díky tomu, že forma již obsahuje veškeré díly tvořící otvory, závitové díry, rozvod chlazení a veškeré požadované příslušenství. Pokud funkční plochy budou tvořit kovové prvky, které budou již zalaty do polymer-betonového odlitku, lze říci, že finální úpravy celého odlitku budou minimální a převážně kosmetické. Mezi nejčastější kosmetické úpravy patří odstraňování drobných výmolů na bočních plochách formy, které jsou pozůstatky po vzduchových kapsách. Tyto výmoly se odstraňují zakytováním a následným vybroušením. Další finální operací je lakování, při kterém výrobek dostane konečný vzhled, který je požadován zákazníkem.

Výhodou z hlediska spojování jednotlivých dílů je u polymer-betonu absence svařování, či spojování mechanickými díly (ač spojování mechanickými díly je možné). Doménou při spojování větších odlitků je technologie lepení. Pro menší změny při úpravách odlitků, kdy je třeba například změnit funkční plochy, které nejsou zhotoveny z kovu, lze použít technologii, při níž se přilévá jemnější směs polymer-betonu na již zhotovený odlitek. Ke spojení dochází díky vlastnostem pryskyřice obsažené ve směsi polymer-betonu, která chemicky reaguje a přilne k již odlitému a vytvrzenému odlitku. Toto spojení je trvalé

a nerozebíratelné i přes absenci různých spojovacích prvků, které je nutné využít u kovových konstrukcí.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálů [1]

| ZNAČENÍ   | JEDNOTKY     | POLYMERBETON | BETON       | ŠEDÁ LITINA | OCEL       |
|-----------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| $\rho$    | $[kg/m^3]$   | 2 300        | 2 500       | 7 150       | 7 850      |
| E         | $[GPa]$      | 30 - 45      | 35 - 45     | 80 - 140    | 210        |
| $R_m$     | $[MPa]$      | 10 - 15      | 0,8 - 5     | 150 - 400   | 400 - 1600 |
| $R_{mt}$  | $[MPa]$      | 110 - 125    | 10 - 35     | 600 - 1000  | 250 - 1200 |
| $R_{mo}$  | $[MPa]$      | 25 - 35      | 0,8 - 5     | 250 - 490   | -          |
| $\delta$  | -            | 0,02 - 0,03  | -           | 0,003       | 0,002      |
| $\lambda$ | $[W/mK]$     | 1,3 - 2      | 1,28 - 1,54 | 50          | 50         |
| c         | $[kJ/kgK]$   | 1            | -           | 0,5         | 0,5        |
| $\beta$   | $[10^{-6}K]$ | 14 - 16      | -           | 11          | 12         |

### 3.4 Konstrukční zásady při navrhování z polymerních betonů

Jak již bylo uvedeno, dílce vyrobené z polymerních betonů není možné navrhovat stejným způsobem, jako dílce z litiny nebo oceli. Přestože metoda výroby polymerbetonových dílců je stejná jako litinových dílců (odlívání do forem), jsou zde zásadní rozdíly.

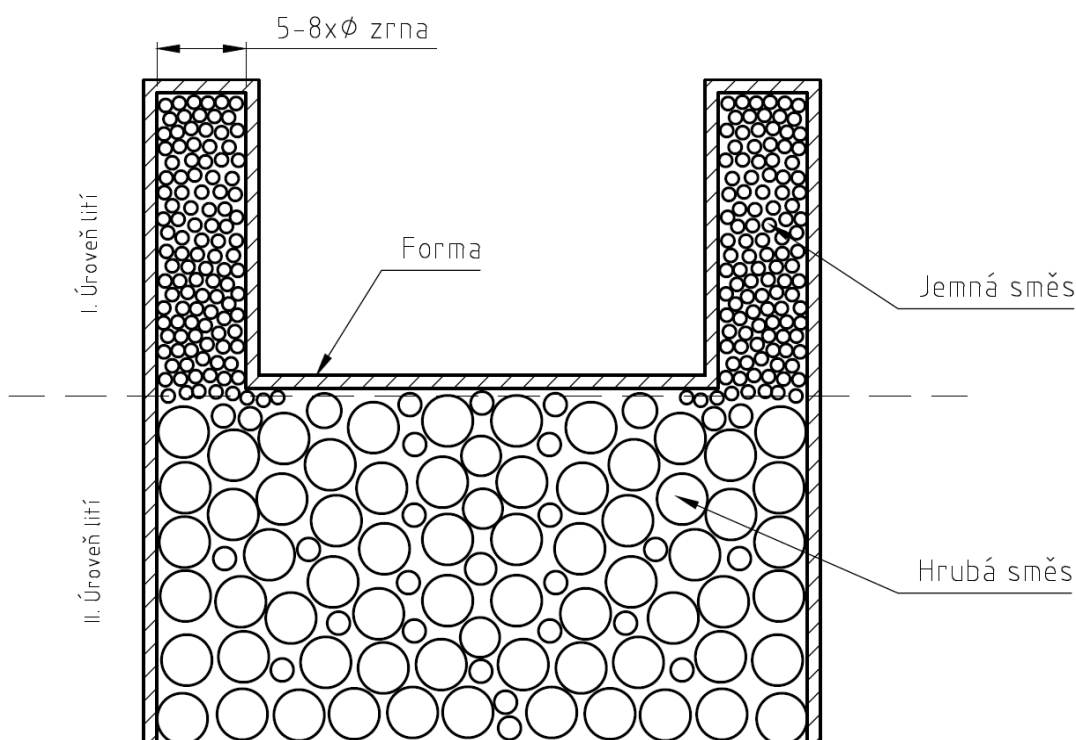
Odlitky z litiny jsou limitovány maximální tloušťkou stěny. Z toho důvodu jsou litinová lože většinou žebrovaná a různě tvarovaná. Tento fakt přispívá ke složitosti formy, což se odráží na celkové ceně odlitku. Dalším důvodem proč jsou litinová lože složitě tvarovaná, je redukce hmotnosti a zvýšení tuhosti. Litina je díky vyšší hustotě až třikrát těžší než stejně objemný odlitek polymerbetonu. To samozřejmě ovlivňuje konstrukci samotného podloží stroje, kdy při srovnání těchto dvou materiálů musí být podloží pro litinové lože značně robustnější, což opět znamená dražší.

V případě návrhu polymerbetonového odlitku se naprosto vylučuje výskyt žebrování, jelikož je tu naopak nutno dodržet minimální tloušťku stěny, čímž je forma značně jednodušší, což ušetří jak její výrobní čas, tak náklady. Samotné lože je následně o něco objemnější, ale přesto je ve výsledku lehčí. V případě opravdu velkých dílců je možné používat odlehčovací jádra, která zůstávají trvale umístěna v odlitku.

### 3.4.1 Geometrické zásady pro konstrukci odlitku

#### Tloušťka stěny

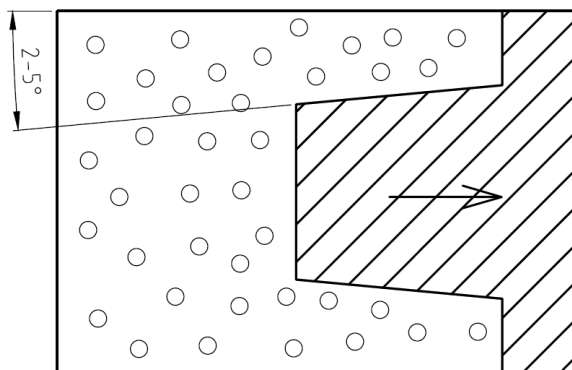
Tloušťka stěny odlitků polymer-betonu je obecně závislá na průměru použitého plniva. Pravidlem je, že tloušťka stěny by měla být minimálně pětkrát až osmkrát tloušťka maximálního zrna. To znamená, že pro směs plniva s maximálním průměrem 16 mm by tloušťka stěny neměla být menší než 80 mm. Jsou tu samozřejmě další ovlivňující faktory, jako zohlednění sbíhavosti formy (průtokové cesty) a výška odlitku. Změna tloušťky v rámci jednoho odlitku není velký problém, zejména díky minimálnímu zbytkovému napětí po odlití. V případě, že je dílec správně navržen a je zjištěno, že na určitých místech nedochází prakticky k žádnému zatížení, je možné tato místa navrhnout i s menší tloušťkou. V takovém případě se totiž může využít jiný rozměr plniva, které bude obsahovat elementy o menším maximálním průměru. Takovému postupu se říká víceúrovňové odlévání (Obr. 7). Postupuje se tak, že se nejprve lije jemnější směs (forma je postavena jako by byl dílec obráceně, oproti pracovní poloze) a po částečném zatuhnutí se do tvarově méně náročného zbytku formy vyleje hrubší směs. Vlastnosti pojiva zcela spolehlivě spojí více úrovní lití v jeden celek.



Obr. 7 Schéma víceúrovňového lití

## Úkosy

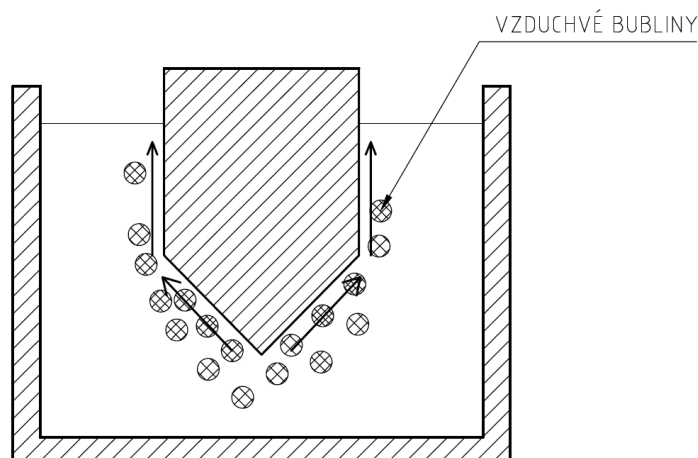
Části formy, které tvoří v odlitku kapsy, se po vytvrzení odlitku vytloukají. Aby bylo možné vytlout tyto části a zároveň nepoškodit odlitek, musí části formy obsahovat úkosy (Obr. 8), které zjednoduší vyjmutí odlitku. Obvykle se velikost úkosů pohybuje mezi 2 – 5 stupni.



Obr. 8 Vyjímání částí formy a znázornění velikosti úkosu

## Odvzdušnění

Při výrobě forem pro minerální litiny je nutné zohlednit možnost odvodu vzduchu. Vzduch se do směsi dostává během míchacího procesu. Vzduch obsažený v odlitcích je nežádoucí. Vytváří vzduchové bubliny a snižuje pevnost odlitku. Pro odstranění vzduchových bublin se využívá vibrační proces, během něhož stoupají vzduchové bubliny vzhůru. Pro proces odstranění vzduchu je důležité, aby byla také správně navržena geometrie formy tak, aby mohla směs dobře zatékat a zároveň, aby nedocházelo k usazení vzduchových bublin pod vodorovnými plochami formy. Tyto plochy je třeba zkosit, pokud je to možné (Obr. 9).



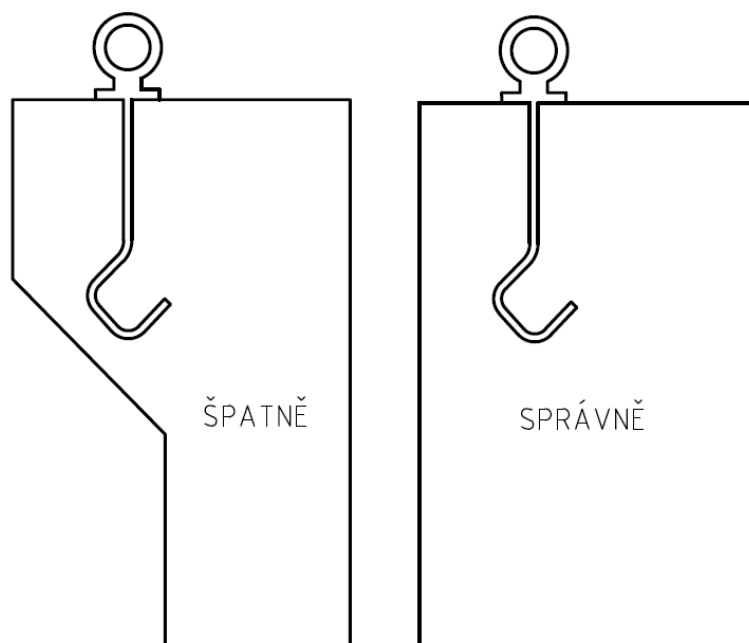
Obr. 9 Úprava ploch pro odvod vzduchu z formy



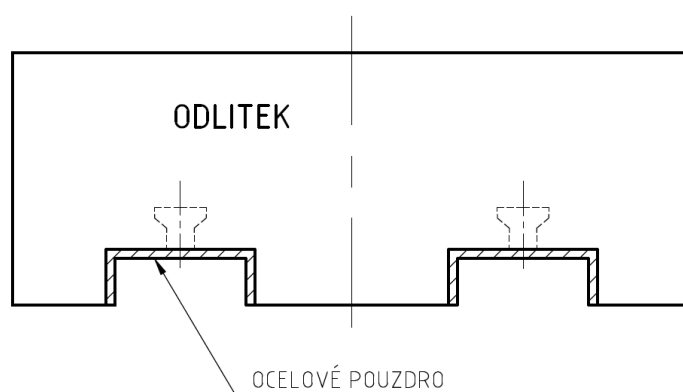
### Umístění manipulačních prvků

Při umísťování manipulačních prvků je třeba dbát na dostatečnou vzdálenost prvku od okraje odlitku. Správným umístěním se předchází odštěpování odlitku, vytržení kotvy, nebo případně jeho úplnému zničení. Důležité také je nosné prvky umísťovat tak, aby se napětí při manipulaci s odlitkem rozneslo co nejlépe a eliminoval se tak vliv lokálních napětí, která mohou vést k porušení odlitku (Obr. 10).

Další možností manipulace (mimo kotev) je využití vysokozdvíhových vozíků. V takovém případě je do odlitku umístěno pouzdro, které chrání povrch polymer-betonu proti poškození při manipulaci (Obr. 11). Tato pouzdra jsou většinou vyrobena z oceli.



Obr. 10 Ukázka špatného a správného umístění nosných prvků v odlitku



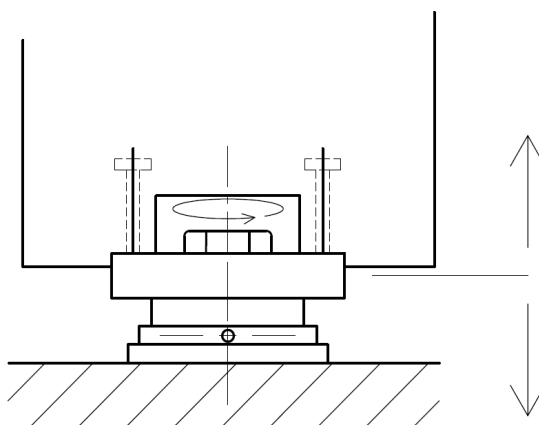
Obr. 11 Ukázka zakomponování manipulačních pouzder

### Vyrovnávací a ustavující prvky odlitků

Pro ustavení lože do vodorovné polohy lze využít několik různých mechanismů. Každý vyžaduje jinou úpravu formy a odlitku.

#### Ustavovací mechanismus s kapsou

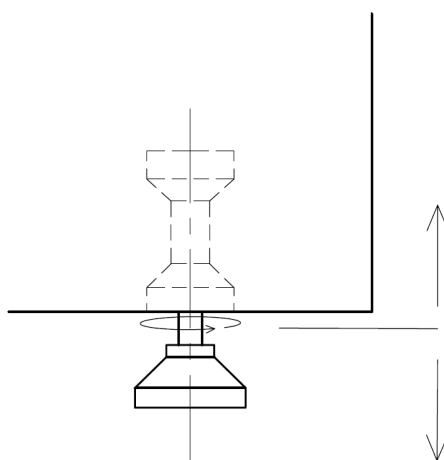
Tento mechanismus vyžaduje vytvoření kapsy, aby bylo možné jej polohovat. Je částečně zalitý do samotného odlitku, přičemž zalité šrouby působí jako kotevní prvky mechanismu (Obr. 12).



Obr. 12 Ustavovací mechanismus s kapsou [5]

#### Ustavení pomocí nivelačního prvku

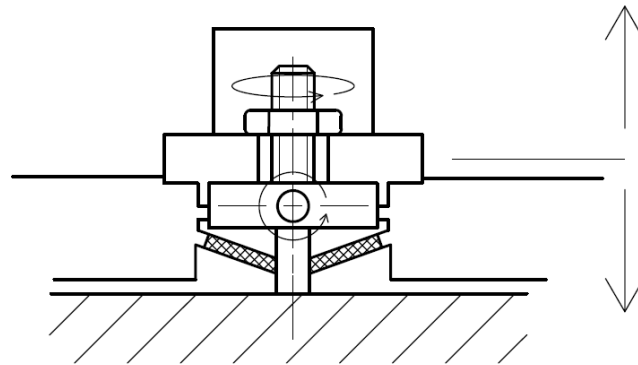
Ustavení pomocí nivelačního prvku se využívá zejména u menších strojů. Tento princip má výhodu v jednoduchosti řešení. Závitové pouzdro je kompletně zalito do odlitku a do něj se následně zašroubuje „noha“. Postupně se ustaví prvky odlitku tak, aby byl odlitek v rovině (Obr. 13).



Obr. 13 Ustavení pomocí nivelačního prvku [5]

### ISOLOC UMS prvky

Tento ustavovací prvek byl vyvinut pro lepší schopnost tlumení. Ustavení polohy probíhá pomocí zasouvání a vysouvání klínu. Vrchní část je zalita v betonu a zbytek mechanismu se k zalité části dotáhne šroubem skrze kapsu v odlitku. Spodní část obsahuje pružné elementy, které mohou být nastaveny v různých úhlech (Obr. 14).



Obr. 14 Pružný ustavovací prvek ISOLOC UMS [5]

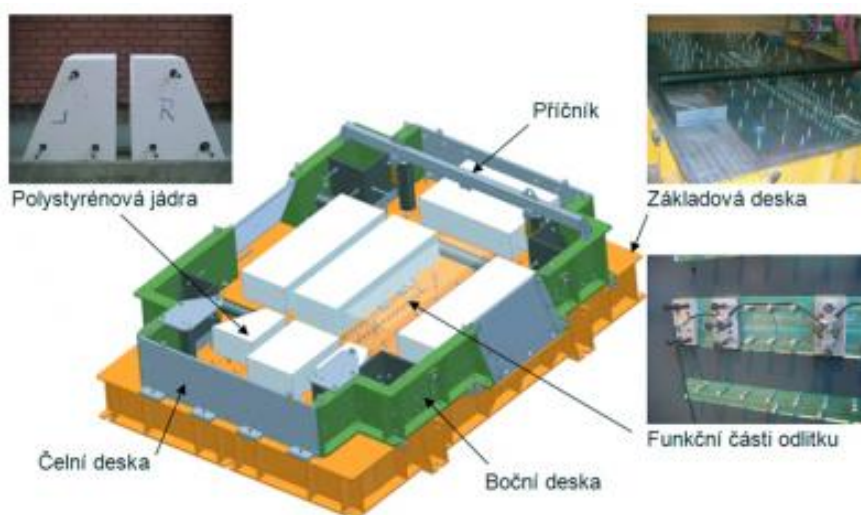
#### 3.4.2 Hlavní zásady tvorby forem pro polymer-betonové odlitky

Materiál formy je přímo závislý na požadovaném počtu kusů odlitků, stejně jako u klasické litiny. Formy lze zhotovit ze dřeva, oceli, hliníku, PVC, silikonu, polyamidu nebo z kombinace zmíněných materiálů. Hlavní kritéria pro určení materiálu jsou:

- 1, Požadovaný počet odlitků
- 2, Přesnost a jakost povrchu odlitku
- 3, Velikost a hmotnost výsledného odlitku
- 4, Plánované varianty odlitku
- 5, Náklady a čas

Samotná konstrukce formy je důležitá pro povrchovou jakost výsledného odlitku. V případě, že je forma kvalitní, potom již není potřeba plochy finálně upravovat. Obrábění ploch polymer-betonu je možné pouze metodou broušení. Nebo speciálními nástroji. Tyto varianty jsou velmi drahé, proto je potřeba dbát na použití dostatečně kvalitní formy, což může v celkovém výsledku snížit náklady na zhotovení finálního odlitku.

Dalším důležitým požadavkem na konstrukci formy je přesnost. Polymer–betonové odlitky se často odlévají do finální podoby, proto je nutné dodržet při výrobě formy požadované přesnosti odlitku. Formy se většinou vyrábí z jednoduchých prvků (nejčastěji desek), které se postupně skládají dohromady (Obr. 15).



Obr. 15 Forma pro polymer–beton [14]

### Závitové vložky

Polymer–beton neumožňuje zhotovovat závitové otvory pro připojení jiných částí stroje přímo do odlitku. V případě nutnosti je tedy třeba použít takzvané závitové vložky (inserty). Jedná se o ocelové vložky, které jsou tvarově přizpůsobeny tak, aby dobře přenášely případné napětí do betonové složky a zároveň aby obsahovaly požadovaný rozměr závitové díry (průměr a hloubku) (Obr. 16). Tyto vložky jsou většinou již součástí formy, tudíž mají přesně určenou polohu na odlitku před samotným odlitím. Je možné využít také dodatečného umístění do odlitku. Postup je následující. Do odlitku se vyvrtá díra, o něco větší než je velikost vložky. Vložka se následně zalije do odlitku. Díky vlastnostem použité pryskyřice vznikne spoj, který nemá horší pevnostní vlastnosti oproti zbytku odlitku.

### Integrace kabelového vedení a různých rozvodů

V případě, že polymer–betonový dílec bude obsahovat rozvody kabelových svazků, integrují se rozvody do formy již před samotným odlitím. Tímto vedením následně povedou kabelové svazky, které se protáhnou po ustavení stroje. Toto vedení je většinou zhotoveno z plastových trubek, které jsou ve formě uloženy do požadované pozice. Není pravidlem, že rozvod musí být zhotoven z plastu. Tento materiál je ale výrazně levnější a lehčí než kovové prvky.

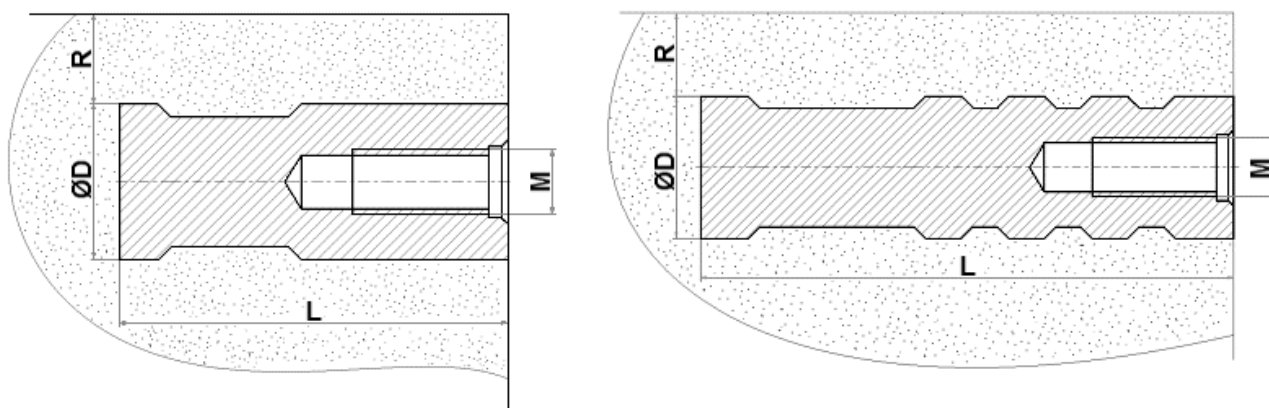
Do formy se před samotným odlitím ukládají také různé další rozvody, například rozvod mazání, hydrauliky, chlazení... Je nutné předem myslet na to, že po odlití je již jakákoli úprava nemožná bez porušení odlitku.

Aby veškeré prvky držely svou polohu, jsou pevně připevněny na svých pozicích, aby se vlivem odlévání a strásání neposouvaly, nebo nerozpojovaly jejich části (Obr. 17).

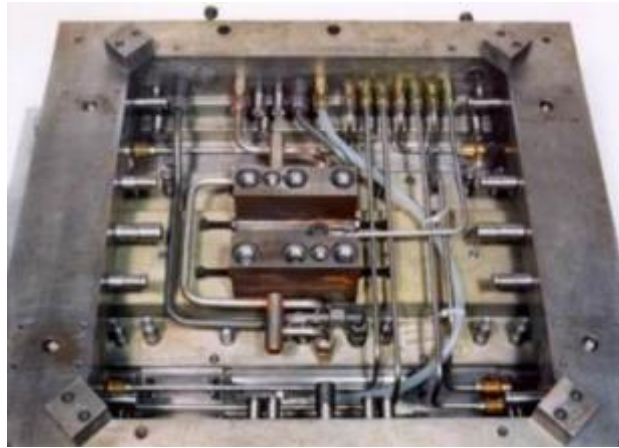
### Integrace obložek a jiných větších kovových dílů

Pokud je výsledný odlitek součástí stroje, který je vystaven vyšším teplotám při provozu, používají se tzv. kovové obložky v místě pracovního prostoru. Jako příklad lze uvést obráběcí centra, kde dochází vlivem obrábění k uvolňování špon, které mohou odlitek, díky vysoké teplotě a dopadání na části odlitku, degradovat. Je to způsobeno zejména nízkou tepelnou vodivostí polymer-betonu, kdy teplota se drží lokálně v jednom místě a narušuje poté povrch, který je také náchylný na vysoké teploty.

Pokud je větší lože odléváno například po kusech, je možné je spojit pomocí integrace větších kovových desek do čela odlitku a následným sešroubováním. Spojením odlitků s integrovanými deskami lze vytvořit lože velmi dlouhé bez nutnosti vytvoření velké a drahé formy. Usnadní se také doprava a samotná manipulace s odlitky. Deska je opět součástí formy a jsou k ní ukotveny šestihřanné šrouby, které jsou zapuštěny do odlitku a zajišťují přenos sil z desky do celého odlitku. Tyto desky se užívají zejména, je-li je nutné na čele, nebo i jiné ploše, vytvořit větší množství přípojovacích prvků (Obr. 18). Jedná se o jednodušší alternativu pro závitová pouzdra, která se musí polohovat každé zvlášť.



Obr. 16 Závitové vložky [5]



Obr. 17 Ukázka připravené formy pro lití včetně všech prvků [5]



Obr. 18 Čelní deska pro polymer-betonový odlitek

### 3.4.3 Dokončovací úpravy odlitků

Minerální litiny lze odlévat s přesností  $\pm 0,1$  mm/m při použití kvalitní formy. Je ale spousta součástí, které vyžadují vyšší přesnost například pro připevnění dalších dílů, jako jsou lineární vodící systémy a podobně. Existuje několik různých postupů jak dosáhnout požadovaných tolerancí.

#### Obrábění odlitku

K rozměrům surového odlitku jsou přidány na požadované plochy přídavky, které jsou po odlití obrobena nebo zbrušena na požadovaný rozměr s požadovanou přesností.

### **Obrábění zalitých součástí**

Jelikož na obrobení polymer-betonu je třeba velmi nákladných operací (drahé nástroje, nebo broušení), lze tento problém vyřešit tak, že se plochy, u nichž je požadována vyšší přesnost, vytvoří pomocí výše uvedených kovových prvků zalitých do minerálního odlitku. Tyto prvky jsou dále obrobena na požadovaný rozměr.

### **Nálitky**

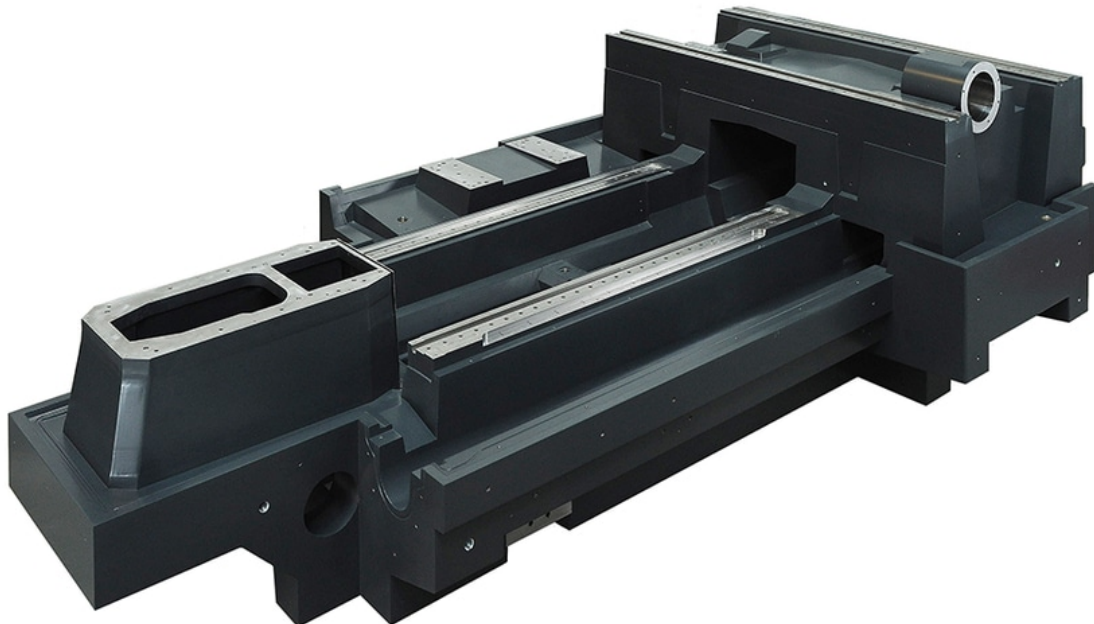
Tato technologie spočívá v odlití surového odlitku, na který jsou následně dále odlévány přesné plochy. Výhodou polymer-betonu je, že na již zhotovený odlitek lze „přilít“ další vrstvu, která se téměř dokonale spojí s již existujícím odlitkem. V případě tvorby přesných nálitků, je využíván nejkvalitnější materiál s velmi přesnými formami pro odlití, které zajistí, že odlitek bude již zaručovat požadované tolerance.

### **Nálitky na kovových rámech**

Tato technologie využívá odlévání, na již existující kovové kostře, na kterou se následně odlévá minerální litina. Přesné plochy se poté odlévají pomocí polohovacích měřidel.

### **Pohledové úpravy**

Po odlití lze odlitek upravit pro lepší vizuální dojem. Na odlitku mohou vzniknout nedokonalosti, jako jsou pórovité stěny (po odlití hrubší směsi). Takovéto nedokonalosti lze upravit pomocí zakytování dané plochy a následným ručním vybroušením. Dále je možné odlitky lakovat různými typy laků. Je třeba říci, že tyto operace prodražují cenu výsledného odlitku.



*Obr. 19 Rám stroje odlitý společností Schneeberger [5]*

## 3.5 Zkouška tlakem polymer-betonového vzorku

### 3.5.1 Teorie a příprava měření

Zkouška tlakem má uplatnění zejména pro hodnocení křehkých materiálů, u kterých je předpoklad, že v pracovním provozu budou vystaveny zejména tlakovému namáhání. Jelikož je předpokládána mez pevnosti v tlaku u polymer-betonu několikanásobně vyšší než pevnost v tahu, upřednostňuje se při konstrukčním užití tohoto materiálu tlakové namáhání.

Při zkoušce tlakem jsou vzorky podrobeny tlakovému namáhání tvořeným dvěma rovnoběžnými deskami, dokud nedojde k určité deformaci, nebo rozdrčení vzorku. Výsledná velikost deformace (či destrukce) je dána vlastnostmi materiálu.

Ze statické zkoušky tlakem lze získat mez pevnosti v tlaku, statický modul pružnosti a poissonovo číslo. Následně je z diagramu možno určit mez kluzu v tlaku  $R_{px}$  ( $x=0,2\% h_0$ ). V případě určité deformace, za předpokladu neporušení vzorku, lze také stanovit poměrné zkrácení  $\epsilon_t$  a příčné rozšíření  $\psi_t$ .

Vzorky pro zkoušku tlakem byly nařezány a následně byla zarovnána jejich čela na soustruhu. Na tělo vzorků byly nalepeny tenzometry v podélném i příčném směru (Obr. 20). Tenzometry jsou umístěny vždy v páru (podélný i příčný směr). Výsledná deformace tedy bude uvažována jako průměrná hodnota obou tenzometrů. Tenzometry jsou umístěny v polovině vzorku, čímž je zaručeno, že měření probíhá vždy v druhé třetině délky. Tenzometry jsou přilepeny speciálním lepidlem doporučeným výrobcem tenzometrů pro daný materiál. Tenzometry jsou chráněny proti poškození během manipulace folií. Vodiče jsou barevně odlišeny dle směru umístění tenzometrů (podélné, příčné). Vzorky jsou očíslovány pro lepší orientaci při vyhodnocení výsledků.



Obr. 20 Testované vzorky [2]



Tab. 2 Rozměry zkušebních vzorků [2]

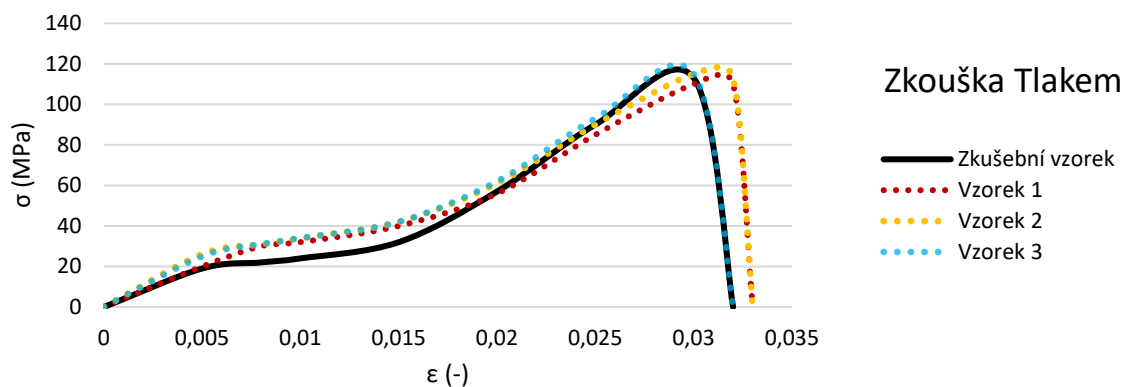
| ČÍSLO VZORKU | PRŮMĚR $d_0$ (mm) | VÝŠKA $h_0$ (mm) |
|--------------|-------------------|------------------|
| 1            | 56,65             | 120              |
| 2            | 56,80             | 120              |
| 3            | 56,65             | 120              |

### 3.5.2 Výsledné hodnoty měření

Do tabulky (Tab. 2) jsou umístěny přepočtené hodnoty  $R_{mt}$  z měření zkoušky tlakem. Dále je uveden přepočtený graf (Obr. 21) z trhacího stroje, kde je patrný průběh zkoušky ze závislosti napětí na prodloužení. Tabulka souhrnných hodnot (Tab. 3) znázorňuje průměrné naměřené a vypočtené hodnoty.

Tab. 3 Hodnoty  $R_{mt}$  [2]

| ČÍSLO VZORKU    | MEZ PEVNOSTI V TLAKU $R_{mt}$ (MPa) |
|-----------------|-------------------------------------|
| 1               | 117,55                              |
| 2               | 112,61                              |
| 3               | 117,83                              |
| zkušební vzorek | 116,72                              |



Obr. 21 Graf přepočtených hodnot z trhacího stroje [2]

Tab. 4 Souhrnné zprůměrované výsledné hodnoty zjištěné zkouškou [2]

|  |        |
|--|--------|
| <b>Mez pevnosti v tlaku (MPa)</b>            | 116,17 |
| <b>Poissonovo číslo <math>\nu</math> (-)</b> | 0,2489 |
| <b>Modul pružnosti E (GPa)</b>               | 44,7   |

### 3.5.3 Posouzení lomových ploch

Tvar porušení všech zkoušených vzorků je kombinovaný. V horní části dochází u válečků k lomu v rovině, kde maximální smyková napětí dosahuje nejvyšších hodnot. Dále se trhlinka šíří v rovině přibližně rovnoběžné s podélnou osou válečku. Zde je porušení materiálu způsobeno zejména normálovým napětím, kolmém k podélné ose válečku.

Díky absenci plastické deformace v okolí lomu lze usuzovat, že se bude jednat o křehký lom. Na lomové ploše lze pozorovat také přítomnost pórů okrouhlého tvaru.



Obr. 22 Vzorky po zkouškách [2]

## 4 Předvýzkum

### 4.1 Vymezení řešené oblasti

Předchozí kapitola představuje poznatky nabyté během studia polymerních betonů. Tyto poznatky jsou dále přeneseny a využity ve výzkumné části této práce. Pro výzkumnou část je zřejmě nejdůležitějším poznatkem z předchozí kapitoly, že se materiálové vlastnosti udávané výrobcí (Tab. 1) a testy vykonané na Západočeské univerzitě výsledkově shodují. Díky tomu lze při řešení úloh MKP považovat udávaná data výrobců za relevantní pro posouzení výpočtových modelů.

První část předvýzkumu se věnuje termální analýze hybridního vzorku polymer–betonu v kombinaci s ocelí a litinou. Polymerní beton se od oceli a litiny výrazně liší také teplotními vlastnostmi. Pro hybridní odlitky může být rizikové vystavování se určitým teplotním podmínkám. Díky MKP analýze můžeme prověřit nakolik je toto riziko velké a získat tak další informace pro obecný postup návrhu těchto hybridních struktur.

Druhou částí předvýzkumu je ověření možnosti náhrady existujícího lože vyrobeného z konvenčních materiálů (v tomto případě z litiny). Materiál náhrady je polymer–beton, případně jeho kombinace s kovem, čímž vznikne tzv. hybrid. Tento příklad má za cíl stanovit, zda je možné nahradit lože tak, aby základními rozměry odpovídaly původním rozměrům, a to navzdory zcela jiným postupům při konstrukci odlitku, které konstrukce polymer–betonových odlitků vyžaduje. Tento úkol je řešen na základě nabytých poznatků z předchozí části práce.

V další části předvýzkumu je řešeno srovnání statické únosnosti konvenčního a polymer–betonového lože soustruhu. Obě lože jsou v základních rozměrech shodná a geometricky podobná. Detaily konstrukce jsou opět přizpůsobeny požadavkům na konstrukci polymer–betonových dílců. Funkční plochy lože jsou zachovány shodně s etalonem. Tento výzkum má za úkol ověřit, zda i přes znatelně nižší pevnost v tahu a tlaku je polymer–beton jako materiál schopný nahradit konvenční materiály bez nutnosti rapidní změny geometrie a případného nárůstu objemu.

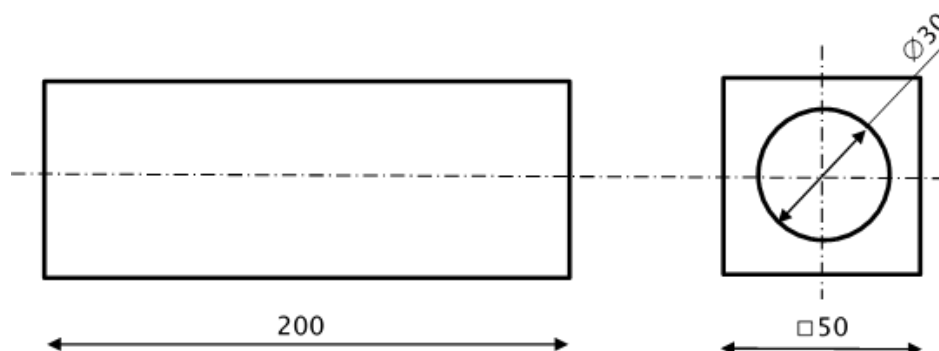
Výše uvedené předvýzkumné části mají za cíl poskytnout základní poznatky, které jsou nutné pro další směřování disertační práce. Oblast zkoumání je tedy zaměřena na chování hybridních struktur při teplotním namáhání, koncepci návrhu polymer–betonového odlitku při využití základních pravidel popsanych v předchozích kapitolách a dále potom posouzení polymer–betonového dílce při statickém zatížení v přímém srovnání s konvenčními materiály.

## 4.2 MKP analýza napětí na rozhraní materiálů při teplotním zatížení

Díky rozdílným fyzikálním vlastnostem mohou být ocel v kombinaci s polymerním betonem neúměrně namáhány v přechodové vrstvě při prudkých a výrazných změnách teplot.

### 4.2.1 Výpočtový model a materiálové vlastnosti

Následující MKP analýza má za cíl zkoumat přechodová napětí na rozhraní kovových materiálů, běžně používaných v konstrukci strojů, zalitých do polymer-betonových dílců. Napětí bude vyvoláno změnou teplotních podmínek. Výpočtový model sestává z kovové kulatiny zalité do polymer-betonového kvádru. Rozměry jsou zobrazeny níže (Obr. 23).



Obr. 23 základní rozměry modelu

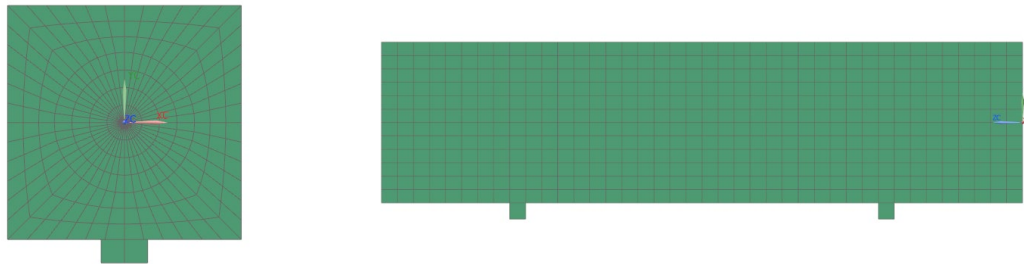
Teplotnímu namáhání v polymerním betonu budou podrobeny dva materiály. Prvním je běžná ocel, druhým potom Litina G25. Potřebné materiálové vlastnosti nutné pro samotný výpočet jsou uvedeny níže (Tab. 5)

Tab. 5 Vlastnosti materiálů [1]

|   | POLYMER-BETON        | OCEL                  | LITINA G25            |
|---|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Hustota (kg/mm <sup>3</sup> )                       | 2,3*10 <sup>-6</sup> | 7,85*10 <sup>-6</sup> | 7,15*10 <sup>-6</sup> |
| Youngův modul E (N/mm <sup>2</sup> )                | 35 000               | 210 000               | 90 000                |
| Koeficient teplotní roztažnosti<br>$\alpha$ (1 / K) | 16*10 <sup>-6</sup>  | 12*10 <sup>-6</sup>   | 10,5*10 <sup>-6</sup> |
| Tepelná vodivost (W/mK)                             | 2                    | 50                    | 58                    |
| Specifické teplo (μJ/kgK)                           | 943000000            | 500000000             | 434000000             |

## 4.2.2 Tvorba sítě

Pro model byla použita 3D tažená síť CHEXA(8) o velikosti prvku 5 mm, která vychází z předdefinované 2D mapované sítě CQUAD4 (Obr. 24). Vzhledem k symetrii by bylo možné celý model zjednodušit na  $\frac{1}{4}$  původního modelu, ale protože se celková výpočetní doba pohybuje v rámci několika vteřin, nebylo zapotřebí učinit takový krok.



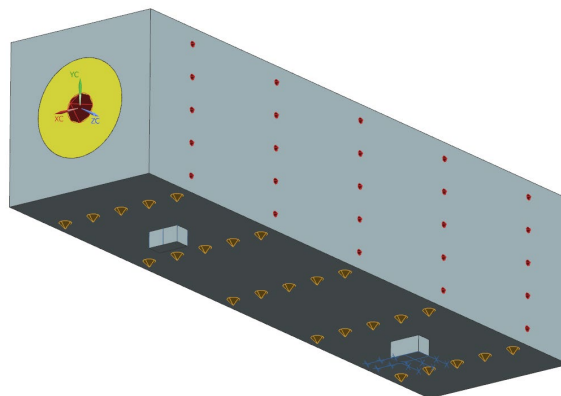
Obr. 24 Ukázka sítě CHEXA(8) o velikosti prvku 5mm

## 4.2.3 Okrajové podmínky

Spojení mezi oběma tělesy (kov + polymer-beton) je vytvořeno funkcí Gluing. Tato funkce funguje jako dokonale tuhé slepení ploch. Tato funkce byla využita po zhlédnutí prezentace firmy Schneeberger. V prezentaci bylo ocelové těleso zalito do polymer-betonu a následně byl vzorek podroben tahové zkoušce. K prvotnímu porušení nedošlo ve spoji obou materiálů, nýbrž došlo k přetržení šroubu. Ač díky funkci Gluing může dojít ke zkreslení výsledků, nebyly dostupné tuhostní vlastnosti spoje pro využití v tomto výpočtu.

Model je ukotven na dvou pomocných podpěrách. Jedna podpěra má odebrány všechny stupně volnosti. Druhá má odebrán jen posuv ve směru osy Y.

V MKP analýze dochází ke způsobu ohřevu tak, že kovový materiál je zahřátý na danou teplotu a vnější plochy polymer-betonu jsou stále chlazeny na teplotu 20 stupňů. Díky tomu můžeme simulovat teplotu šířící se vnitřkem ocelové konstrukce v běžném prostředí o průměrné pokojové teplotě.

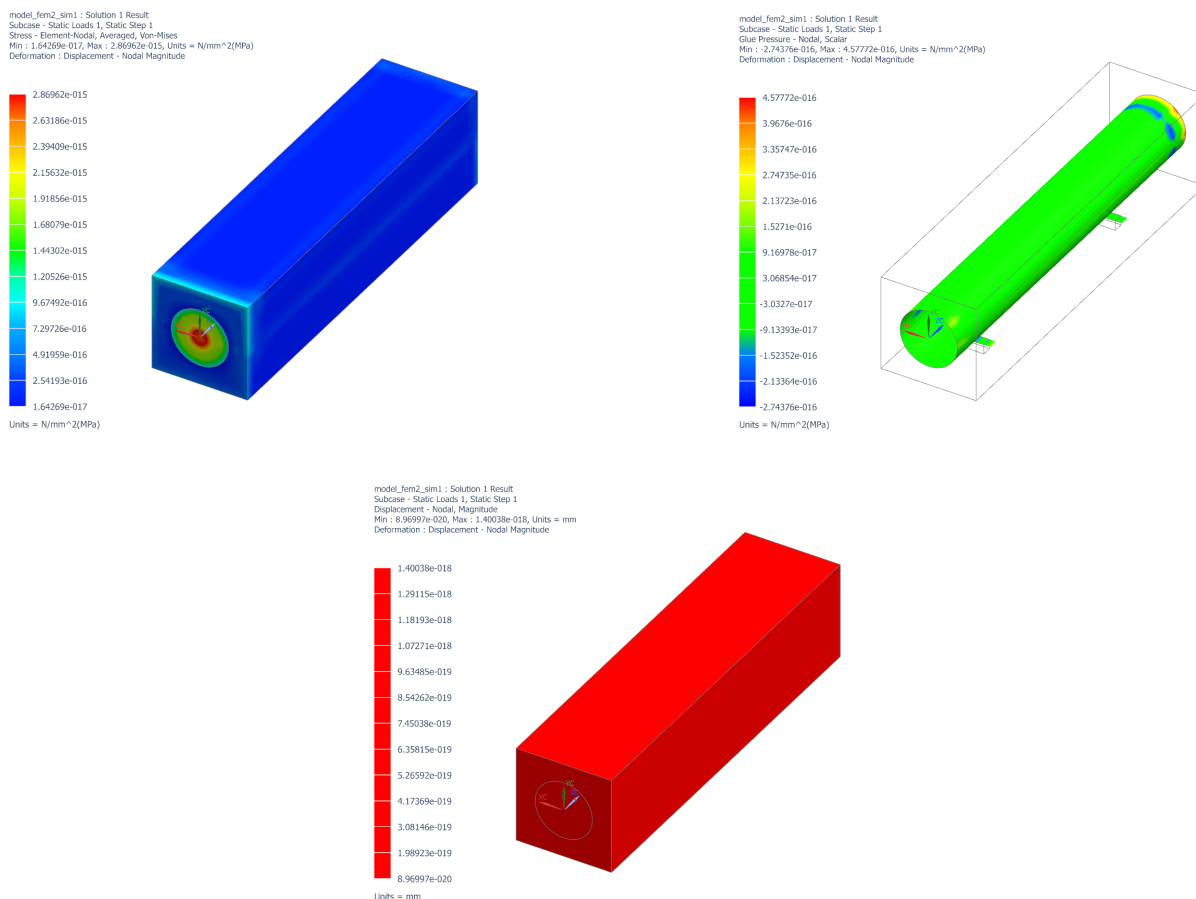


Obr. 25 Výpočetní model s teplotním zatížením

## 4.2.4 Výsledky analýzy

### Podmínky I. – Celkové napětí, napětí v přechodové vrstvě, deformace

Laboratorní podmínky: Ocel + Litina 20°C, Polymer-beton 20°C



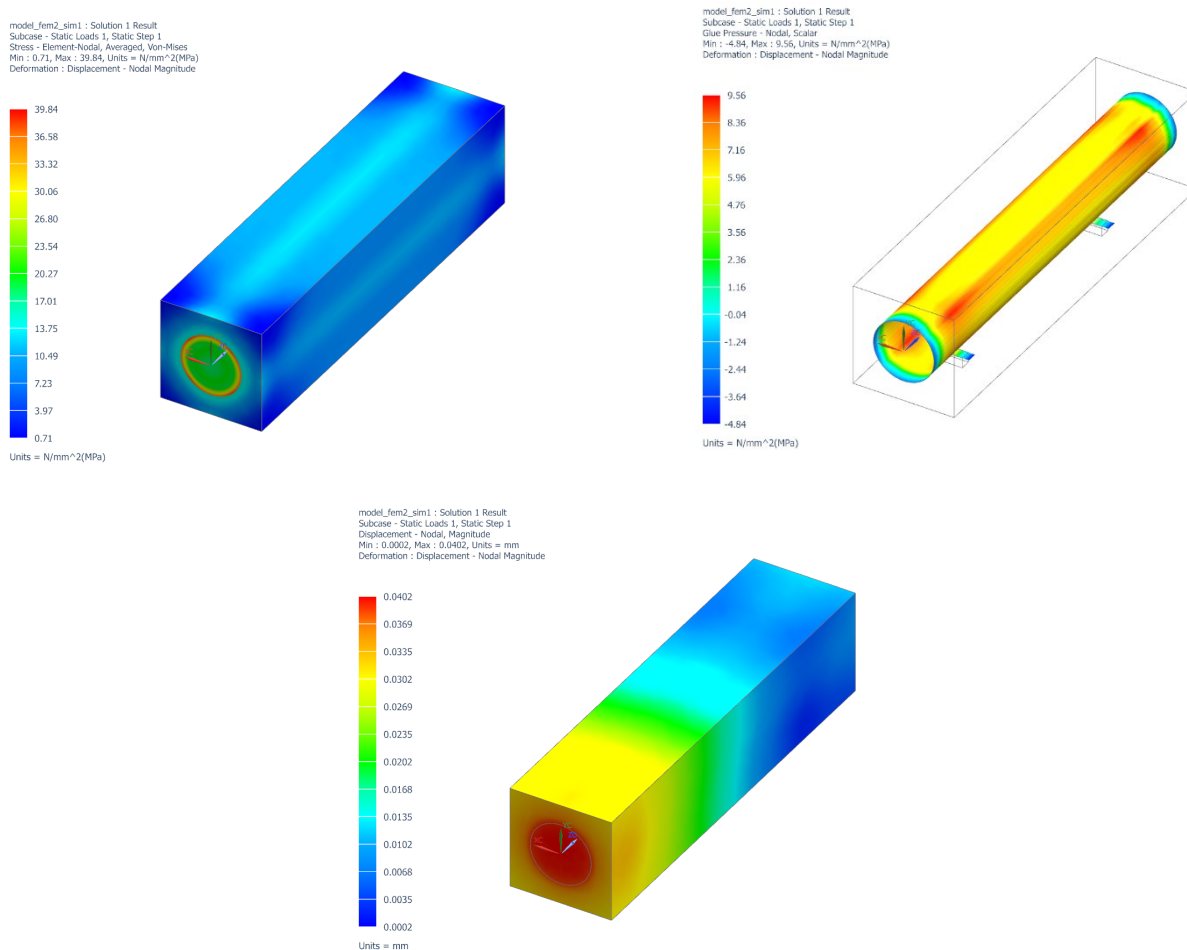
Obr. 26 Výsledky simulace (Podmínky I.)

Tab. 6 Výsledné hodnoty (Podmínky I.)

| OCEL+LITINA 20°C<br>Polymer-beton 20°C | OCEL                   | LITINA G25             |
|--|------------------------|------------------------|
| Celkové napětí (MPa)                   | 2,869e-15              | 2,297e-15              |
| Přechodové napětí (MPa)                | 4,677e-15 / -2,743e-15 | 3,402e-16 / -2,080e-16 |
| Celková deformace (mm)                 | 1,400e-18              | 1,189e-18              |

## Podmínky II. – Celkové napětí, napětí v přechodové vrstvě, deformace

Podmínky: Ocel + Litina 50°C, Vnější stěny Polymer–betonu udržovány na 20°C



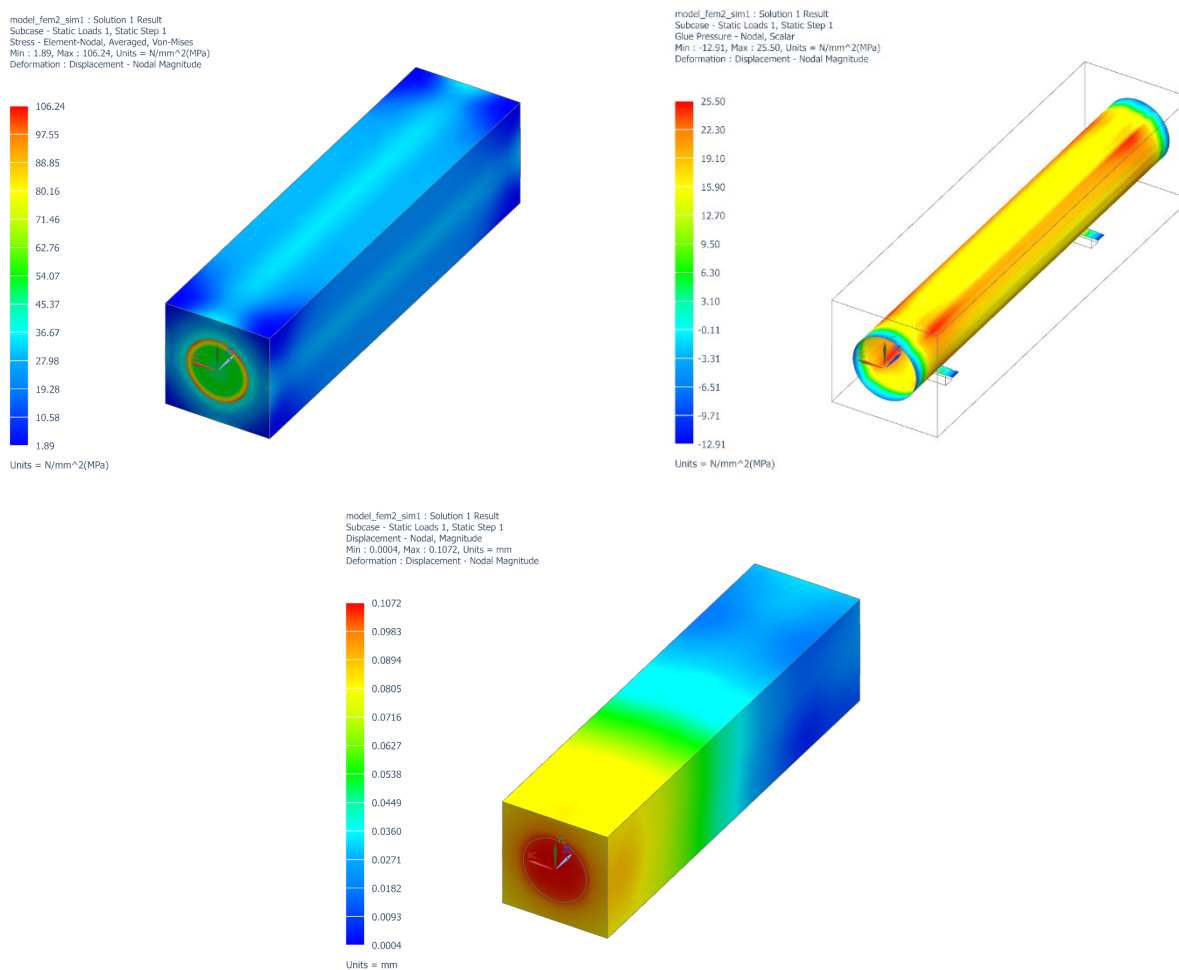
Obr. 27 Výsledky simulace (Podmínky II.)

Tab. 7 Výsledné hodnoty (Podmínky II.)

| OCEL+LITINA 50°C<br>Polymerbeton 20°C (stěny) | OCEL         | LITINA G25 |
|---|--------------|------------|
| Celkové napětí (MPa)                          | 39,84        | 22,59      |
| Přechodové napětí (MPa)                       | 9,56 / -4,84 | 8 / -4,55  |
| Celková deformace (mm)                        | 0,040        | 0,029      |

### Podmínky III. – Celkové napětí, napětí v přechodové vrstvě, deformace

Podmínky: Ocel + Litina 100°C, Vnější stěny Polymer–betonu udržovány na 20°C



Obr. 28 Výsledky simulace (Podmínky III.)

Tab. 8 Výsledné hodnoty (Podmínky III.)

| OCEL+LITINA 100°C<br>Polymerbeton 20°C (stěny) | OCEL          | LITINA G25     |
|--|---------------|----------------|
| Celkové napětí (MPa)                           | 106,24        | 60,25          |
| Přechodové napětí (MPa)                        | 25,5 / -12,91 | 21,33 / -12,15 |
| Celková deformace (mm)                         | 0,107         | 0,079          |



### 4.3 Konstrukční PB náhrada konvenčního lože obráběcího stroje

Používané lože (etalon) je vyrobeno z litiny technologií odlévání. Jelikož je u odlévání kovů nutné dodržovat určitá kritéria pro výrobu formy, jako jsou zaoblení, úkopy nebo tloušťka stěny, je výsledný odlitek hodně členitý s velkým počtem žebrování. Po odlití je odlitek následně obráběn včetně vyvrtání a závitování potřebných děr pro připojení dalších dílů. Dále jsou upraveny funkční plochy na požadovanou jakost a rozměr.



Obr. 29 Původní lože (etalon)

#### 4.3.1 Požadavky kladené na lože a možnosti jejich zhotovení

Základním požadavkem při nahrazení lože je dodržení jeho rozměrů, tolerancí a kvality funkčních ploch. Ve spolupráci s firmou SCHNEEBERGER Mineralgusstechnik s.r.o., byla konzultována vyrobitelnost a možnost zachování požadovaných parametrů lože.

##### Plochy pro upevnění pohybového šroubu

Tyto plochy musí být vyrobeny s vysokou přesností a geometrickou tolerancí. Po konzultaci bylo rozhodnuto, že je vhodné, aby tyto plochy byly součástí kovových dílů a následně byly zality do odlitku. Jakosti a přesnosti ploch se docílí finálním obrobením. Další možností je tyto plochy dodatečně odlévat na již zhotovený odlitek. Tato technologie je ale velice nákladná, jelikož je třeba zhotovit razítko, díky kterému lze odlévat plochy s požadovanými geometrickými tolerancemi a jakostí povrchu. Tato razítko se pro kusovou výrobu prakticky nevyužívají, jelikož jejich zhotovení velmi nákladné.

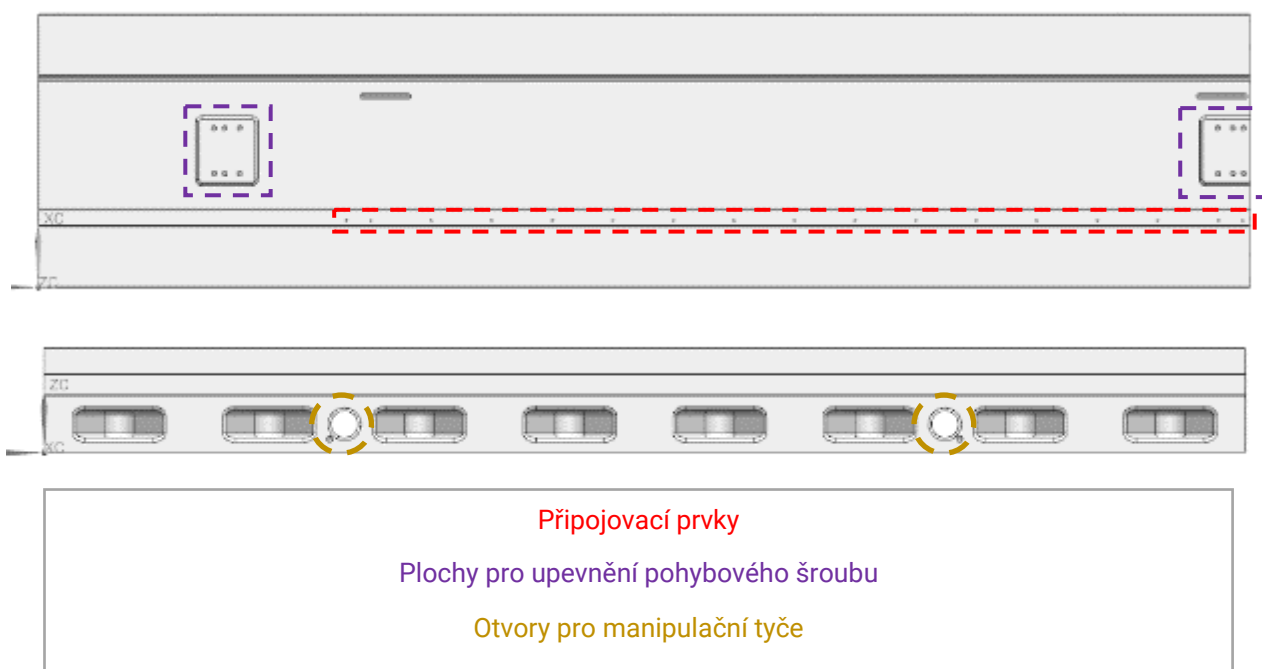
##### Vodící plochy

Požadavky na vodící plochy jsou zaručení kolmosti a rovnoběžnosti mezi plochami, jakost povrchu alespoň Ra 1,6, vysoká otěruvzdornost. Jestliže bude celý díl odlitý z minerální litiny, není možné docílit pouhým odlitím těchto vlastností bez následného obrobení. Jelikož se jedná o odlitek musí být forma upravena tak, aby bylo možné odlitek z formy vyjmout. Pro bezproblémové vyndání z formy je třeba zhotovit úkopy o velikosti zhruba 5 stupňů. Pokud tedy bude požadována kolmost a rovnoběžnost ploch, je třeba

některé z nich po odlití obrábět. V případě, že by byla použita hybridní struktura, byl by technologický proces docílení požadovaných vlastností ploch jednodušší, jelikož by se vodící plochy vkládaly podobně, jako inserty do formy před odléváním.

### Plochy pro upevňování a odměřování

Požadavky jsou zde podobné jako u předchozích ploch. Je nutné dodržet geometrické tolerance s drsností Ra 6,3. Tyto plochy lze bezproblému odlévat a budou tak zhotoveny přímo z minerální litiny. Pro upevnění jsou vloženy inserty, které jsou rozmístěny v celé délce lože.



Obr. 30 Rozbor problémových částí odlitku

### Otvory pro manipulační tyče

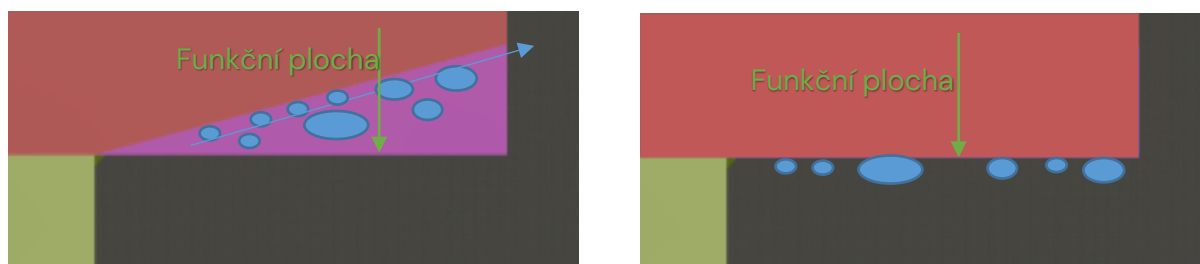
Jakékoli potřebné průchozí, či slepé otvory se v konstrukci odlitků minerálních litin zhotovují ještě před samotným litím za použití plastové nebo kovové trubky či profilu. Trubka požadovaného rozměru se vloží do formy na požadovanou pozici a je následně zalita směsí. Takto se zhotovují například otvory pro manipulaci a otvory pro rozvod kabelů či chladicího okruhu. Materiál tyče dokonale přilne k povrchu a stává se nerozebíratelnou součástí odlitku. Požadavkem pro tyto otvory je zejména otěruvzdornost, která je zaručena, pakliže budou trubky zhotoveny z oceli.

### Otvory pro umístění fixačních prvků

Tyto otvory budou muset být upraveny, jelikož v technologii odlévání polymer-betonu není žádoucí využívat zaoblení. Protože na dané otvory nejsou kladeny žádné výjimečné požadavky, lze tyto otvory přizpůsobit vhodnějšímu tvaru nevyužívajícího zaoblení. Díky této úpravě lze zjednodušit také část formy, která je oproti původní formě pro odlévání litinového lože již zjednodušena díky absenci žebrování v polymer-betonovém odlitku.

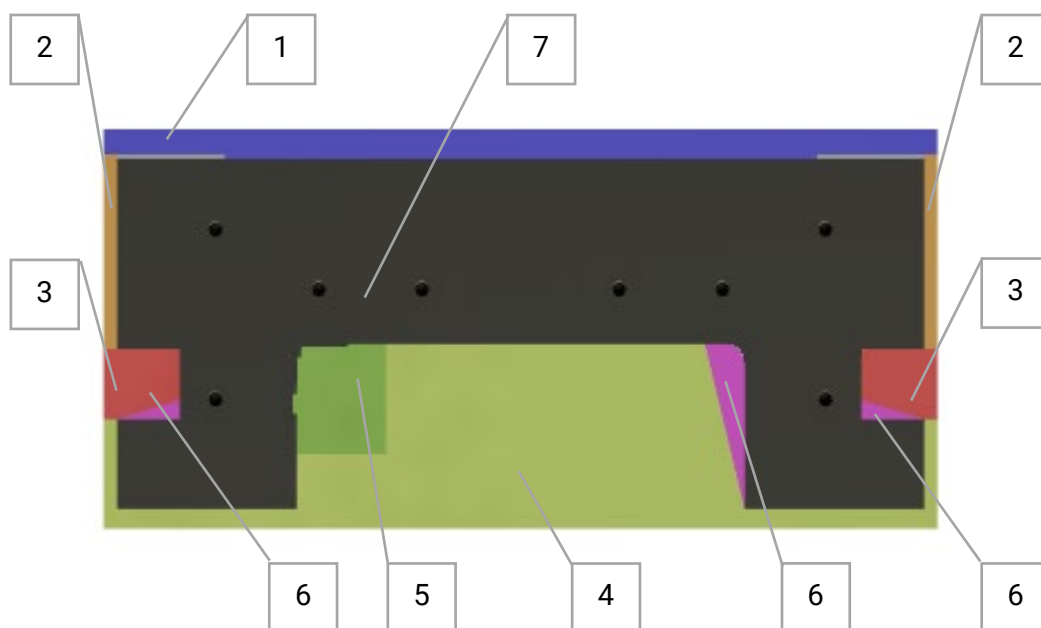
### 4.3.2 Vyrobitelnost odlitku – konstrukce formy

Po společné konzultaci s firmou SCHNEEBERGER Mineralgusstechnik, s.r.o., bylo potvrzeno, že formu pro dané lože lze vytvořit a odlitek zhotovit s několika nutnými kompromisy. Jelikož se jedná o odlitek, je nutné vytvořit úkosy. Tyto úkosy se u odlévání polymer-betonu pohybují ve velikosti 3 až 5 stupňů na dvou stranách ležících proti sobě, nebo úkos na jedné straně o velikosti 6 – 15 stupňů. Čím větší úkos, tím lépe lze odlitek vyjmout z formy. Úkosy také mají za cíl odstranění vzduchových bublin, které by mohly ve větším množství znehodnotit výsledný odlitek. Naklonění roviny, které vznikne úkosem, dopomůže k odvodu bublin směrem vzhůru (Obr. 30). Tím se eliminuje jejich výskyt v místě, kde by byly nežádoucí.



Obr. 31 Příklad vhodné a nevhodné úpravy plochy pro odvod vzduchu

Forma pro odlitek je dělena na několik částí (Obr. 31), které jsou mechanicky spojeny. Díky symetrii dílu bude možné zjednodušit výrobu dílů formy. Odlévání do formy probíhá tak, že spodní část odlitku je otočena o 180 stupňů, jelikož nejkvalitnější povrch je na spodní části formy. Jako první se do formy lije jemnější směs, která zabezpečí vyšší jakost povrchu na požadovaných místech. Následuje lití hrubší směsi, která vyplní větší plochy odlitku, na které není kladen vyšší požadavek jakosti povrchu.



- |    |                      |   |
|----|----------------------|---|
| 1, | Vrchní část formy    | 5, Část tvořící detaily uchycení odměřovacího systému |
| 2, | Boční části formy    | 6, Znáznorněné úkosy                                  |
| 3, | Část tvořící vybrání | 7, Odlitek  |
| 4, | Spodní část formy    |   |

Obr. 32 Rozbor částí formy

### Potřebné dokončovací operace

Po vyjmutí odlitku z formy je nutné odlitek finálně upravit. V případě vizuálních nedostatků na nefunkčních plochách je standardní úpravou zakytování povrchových nedostatků, ruční přebroušení a následné finální lakování. Pokud se jedná o úpravu funkčních ploch je nutné plochy brousit. Jelikož je polymer-beton zčásti složen z minerálů, technologie frézování není přípustná, pokud se nejedná o speciální stroj, který je určen pro obrábění minerálů. Společnost SCHNEEBERGER využívá pro takzvané předlévání také směs, která neobsahuje minerály a lze ji tak obrábět také frézováním. Směs se lije do formy jako první a tam, kde je třeba následně po odlévání obrábět. Po zatuhnutí směsi se následně lije klasická směs s obsahem minerálů. Předlévaná směs má ale horší mechanické vlastnosti než směs s obsahem minerálů a svým složením se podobá spíše plastům. Pokud by MKP simulace vykazala nižší namáhání v tlaku (do 50 MPa), byla by tato směs použitelná i při výrobě lože. V takovém případě by plochy poblíž úkosů byly vyrobeny z této plastické směsi a bylo by možné je místo broušení frézovat. Zbytek formy by byl vyplněn polymer-betonovou směsí. Díky tomu by se náklady na finální opracování snížily.

### 4.3.3 Hybridní odlitek

Také tento způsob výroby byl konzultován se společností SCHNEEBERGER, která se běžně setkává se zpracováním kovových prvků do polymer–betonových odlitků. Důležité je, aby kovové části byly správně připraveny na operaci zalití. Příprava probíhá v podobě odmaštění a pískování kovových ploch, které mají přilnout ke směsi. Takto upravené díly se poté vkládají do formy a po odlití a vytvrzení jsou trvalou součástí odlitku.

V případě hybridního odlitku zkoumaného lože je optimální vytvořit svařenec z částí, které budou tvořit vodící plochy a z trubek pro manipulační tyče. Díky tomu se vytvoří jeden díl, se kterým se bude lépe manipulovat a umožní vyztužení celé konstrukce. Tento díl bude zakomponován do formy a následně zalit směsí.



Obr. 33 Svařenec pro hybridní odlitek

Výhodou lože vyrobeného touto technologií je vysoká pevnost ve vedení, tvarové zjednodušení formy odlitku a lepší obrobiteľnosť funkčních ploch. Polymer–betonový základ bude tlumit vibrace a zabezpečí lepší tlumící účinky, než by měl ocelový odlitek. Nevýhodou jsou náklady na svařenec, rozdílná teplotní roztažnosť materiálu a zvýšená hmotnosť oproti polymer–betonovému odlitku.



Obr. 34 Hybridní odlitek

#### 4.3.4 Ekonomická studie

##### Varianta výroby lože z minerální litiny

Poptávka na konkrétní lože byla zaslána do firmy SCHNEEBERGER Mineralgusstechnik, s.r.o. Firma zaslala kalkulaci na výrobu lože, včetně časového harmonogramu.

Cena odlití dvou loží je **2 590 euro**. Výroba dřevěné formy pro maximálně dva odlitky je **15 000 euro**. Dvě lože tedy lze vyrobít za **17 590 euro**. Cena jednoho odlitku je tedy **8 795 euro**. Odhadovaná cena obrábění je **1 500 euro**. Celková cena lože je tedy **10 295 euro**.

##### Varianta výroby lože z litiny

Kalkulace na cenu výroby lože z litiny není k dispozici. Lze ji však s určitou odchylkou odhadnout. Při dotazu na cenu odlitku za kilogram odlitku Škoda Machine Tool, a. s. v roce 2013 uvedla 40–65 Kč/kg.

Při váze odlitku (s přídatky na opracování) zhruba 5 tun, je cena čistého odlitku bez opracování s průměrnou hodnotou 55 Kč/kg 275 000 Kč, což je zhruba **10 185 euro**. Odhadovaná cena obrábění je **3 500 euro**. Celková cena litinového lože je **13 685 euro**.

##### Výsledné porovnání

Celková cena lože z minerálních litin je nižší než cena litinového lože (Tab. 9). Litinové lože má výhodu v trvanlivé formě, která snese více odlitků než dřevěná forma na polymer-betonové odlitky. Pokud by se jednalo o kusovou výrobu, byla by tedy varianta lože z minerálních litin výhodnější než litinový odlitek.

Tab. 9 Srovnání cen celkové výroby lože

| Materiál         | Cena za jedno lože včetně obrábění (euro) |
|------------------|---|
| Litina           | 13 685                                    |
| Minerální litina | 10 295                                    |

Tab. 10 Časový harmonogram výroby polymer-betonového lože

| Úkon                                      | Čas       |
|---|-----------|
| Výroba formy<br>(po odsouhlasení výkresů) | 11. týden |
| První odlitek                             | 14. týden |

### 4.3.5 Souhrn poznatků ze studie náhrady lože

Díky spolupráci se společností SCHNEEBERGER bylo do práce vneseno velké množství praktických rad a bylo možné prozkoumat technologii minerálních litin z hlediska samotné výroby. Po konzultacích bylo ustanoveno, že z výrobního hlediska není problém vyrobit lože, které by dokázalo nahradit dosavadní etalon. I přes některé kompromisy v konstrukci je tedy možné dodržet předepsané požadavky a nahradit stávající etalon dvěma různými řešeními, která jako základ využívají minerální litiny. Prvním je celo-polymer-betonový odlitek, který díky svým vlastnostem zabezpečí lepší tlumící účinky a rozměrovou stabilitu, než jakými disponuje etalon odlitý z litiny. Nevýhodou jsou jeho náklady na dokončovací operace (broušení funkčních ploch) a horší mechanické vlastnosti. Druhou možností jak nahradit stávající etalon je hybridní odlitek, který se sestává ze svařence a polymer-betonového základu. Tento odlitek zabezpečí velmi dobré mechanické vlastnosti vedení, nižší hmotnost a lepší tlumení vibrací oproti etalonu. V porovnání s celo-polymer-betonovou variantou je však těžší, má rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti (ocel a minerální litina), což může způsobovat napětí na přechodu materiálů, a má horší tlumící vlastnosti. Výhodou může být i možnost použití konvenčních způsobů obrábění, což ušetří finance a jednoduchost formy. V otázce cenové výhodnosti je řešení polymer-betonového lože zhruba srovnatelné s konvenčním litinovým etalonem.

## 4.4 Výpočtová porovnávací studie lože soustruhu

Cílem výpočtové studie lože soustruhu, je porovnat vlastnosti konvenčních materiálů, jako jsou litina a ocel s polymer-betonem.

Základním modelem zkoumání je suportové lože soustruhu pro velké obrobky. Tento typ soustruhu má odděleno suportové lože od lože koníku. Délka lože je 15 m.

Předmětem zkoumání této studie je, zdali polymer-betonové lože (po nutných úpravách potřebných pro výrobu) dokáže plně nahradit stávající litinové lože z hlediska pevnostního namáhání.

V textu výše jsou uvedeny materiálové vlastnosti polymer-betonu, oceli a litiny. Tyto hodnoty jsou použity pro následující výpočet, přičemž součástí porovnání MKP analýzy je pouze litinové lože a polymer-betonové lože.

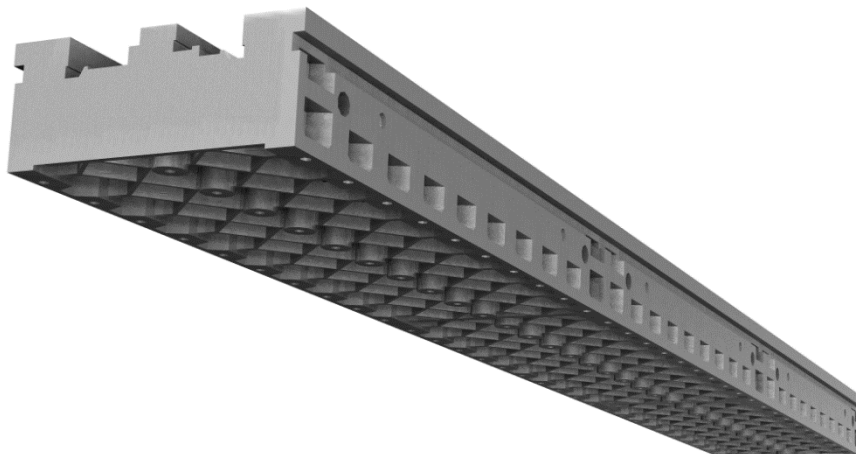
### 4.4.1 Konstrukce litinového lože

Doménou odlitků z litiny je zejména velké množství žeber, která jsou použita pro zpevnění celkové konstrukce. Tato žebra jsou na obrázku (Obr. 35) viditelná na spodní straně lože.

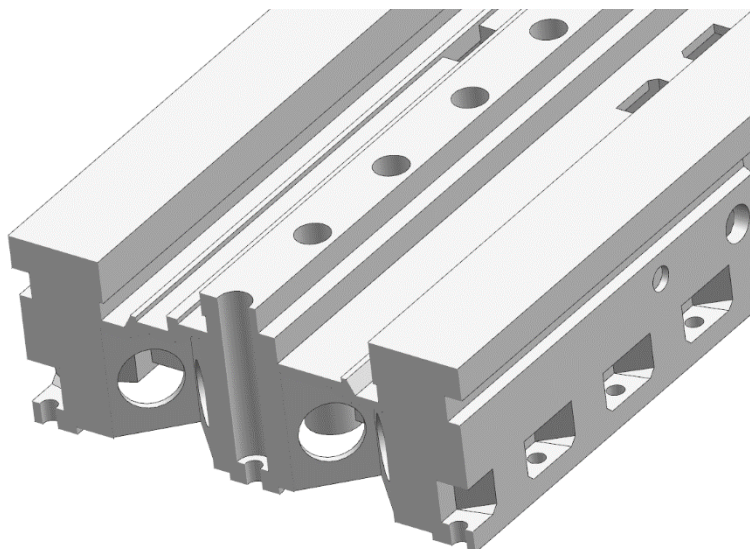
Pro uložení lože na základ jsou použity fixátory. Otvory pro uchycení fixátorů jsou viditelné na spodní straně lože, kde jsou rozmístěny ve 3 řadách (dvě krajní a jedna střední). Pro možnost předepnutí jsou na stranách lože kapsy, ve kterých jsou uloženy matice. Tyto kapsy slouží pro pohodlnou montáž a předepnutí lože vůči základu. Pomocí kapes lze

předepnout pouze dvě řady kotvících šroubů. Třetí (střední) řadu je nutné předepnout na horní straně lože (Obr. 36).

Pro manipulaci lože je nutné zachovat otvory, skrze něž se provlečou nosné tyče. Tyto otvory jsou patrné na bocích lože a procházejí skrz celou šířku lože.



Obr. 35 Litinové lože



Obr. 36 Znáznění otvorů pro fixátory

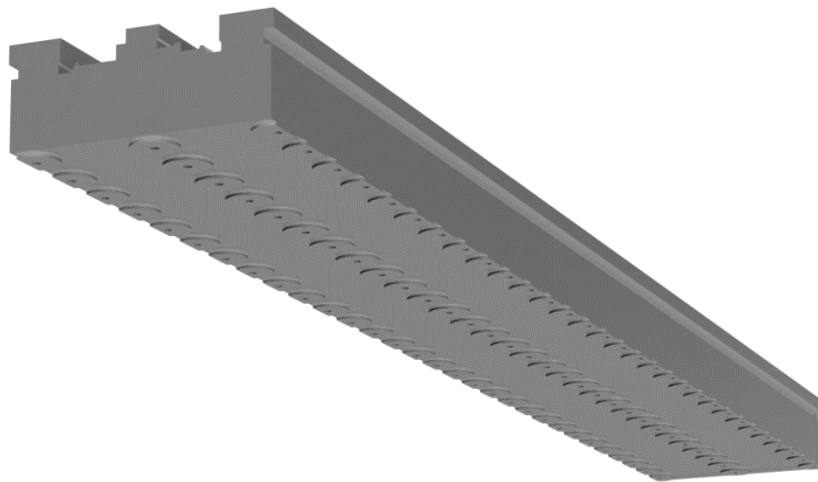


#### 4.4.2 Konstrukce polymer-betonového lože

Polymer-betonový odlitek je méně členitý než litinový. Pravidlem bývá, že polymer-betonové odlitky připomínají velmi jednoduché geometrické tvary jako například krychli či obdélník. Výhodou je, že oproti litinovým formám na odlitky jsou formy pro polymer-betonové odlitky mnohem jednodušší, což se promítá zejména do ceny formy.

Pro uložení polymer-betonového lože jsou stejně jako v případě litinového lože použity fixátory ve třech řadách. Oproti litinovému loži je zde využita jiná technologie fixátorů, které nevyžadují kapsy pro předepnutí. Tím se zjednodušil celý odlitek i na bočních stranách.

Profil vedení (horní část lože) zůstává stejná jako v případě litinového lože. Ačkoli v reálném provedení by pravděpodobně došlo ke konstrukci hybridní struktury, ve které by tělo lože bylo z polymer-betonu a vedení například z oceli, pro účely MKP budeme uvažovat monolitický odlitek. Toto uvažování není v rozporu s vyhodnocením, jelikož polymer-beton snese podstatně menší namáhání než ocel, tudíž pokud bude možné říci, že kompletně polymer-betonové lože je vyhovující, bude to možné říci také o loži hybridním.



Obr. 37 Polymerbetonové lože

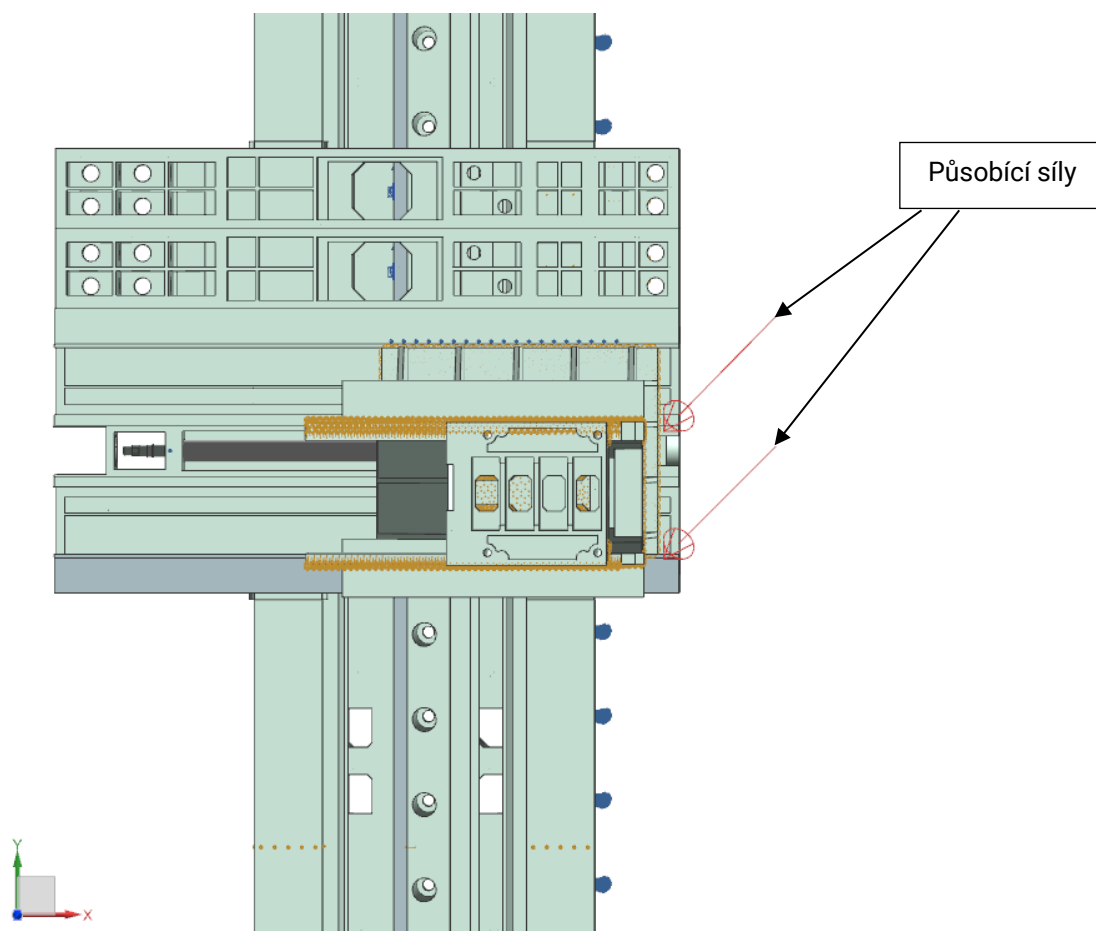
#### 4.4.3 Podmínky MKP analýzy

Obě lože jsou uložena na již zmíněných fixátorech. Lože je namáháno prostorovými reznými silami, které jsou rozloženy do 3 os (Obr. 37, Tab. 11). Pro zachování co nejpřesnějšího přenosu namáhání do lože byly ve výpočtu zachovány ostatní díly suportu (Obr. 38).

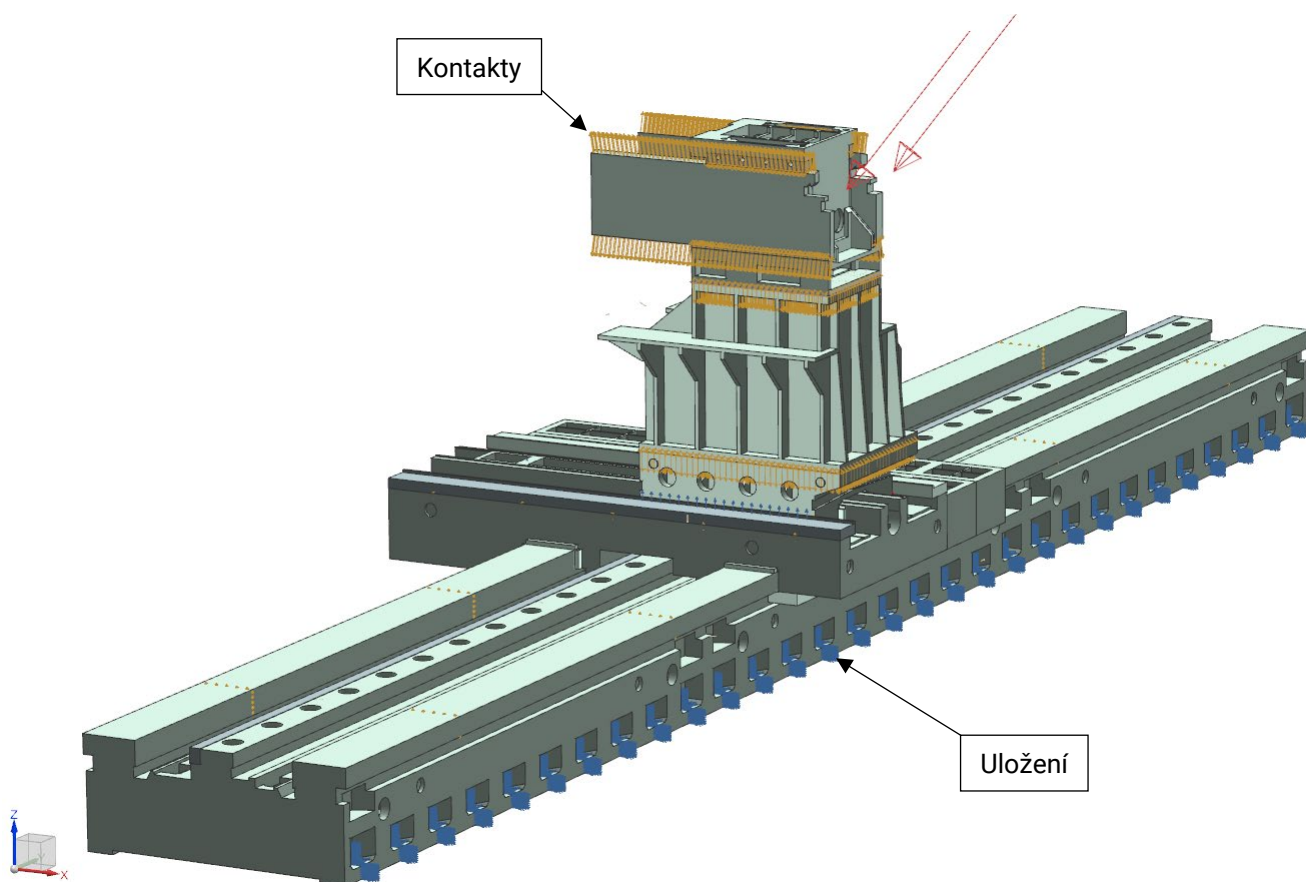
Přenos silových účinků mezi součástmi je definován pomocí kontaktu na vodících plochách (Obr. 39). Aby nedošlo k pohybu suportu po loži je suport fixován v místě vedení pohybového šroubu.

Tab. 11 Velikosti sil

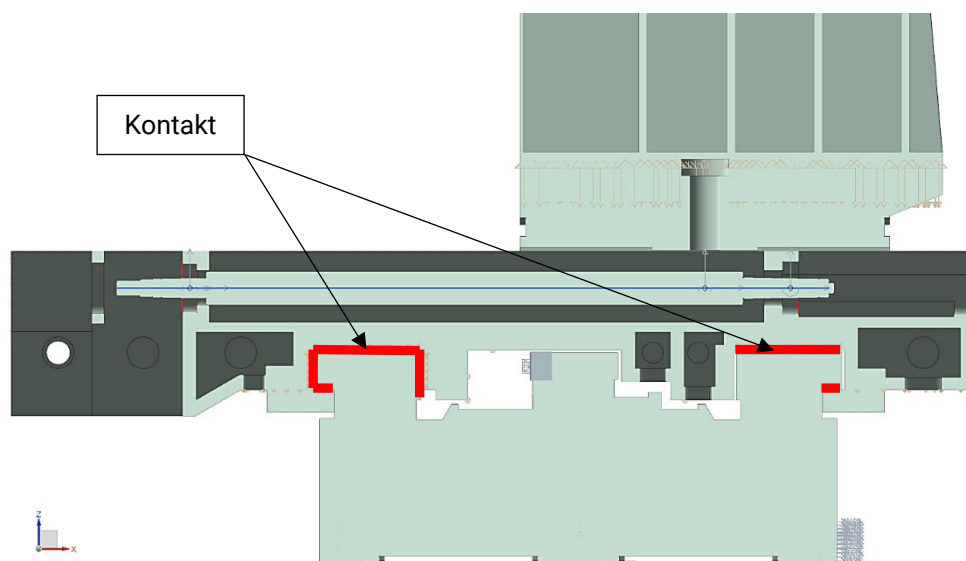
| SÍLA  | VELIKOST SÍLY             |
|-------|---------------------------|
| $F_x$ | $16\ 000 * 0,6\ \text{N}$ |
| $F_y$ | $16\ 000 * 0,6\ \text{N}$ |
| $F_z$ | $16\ 000\ \text{N}$       |



Obr. 38 Působící síly



Obr. 39 Znáznornění celého výpočtového modelu

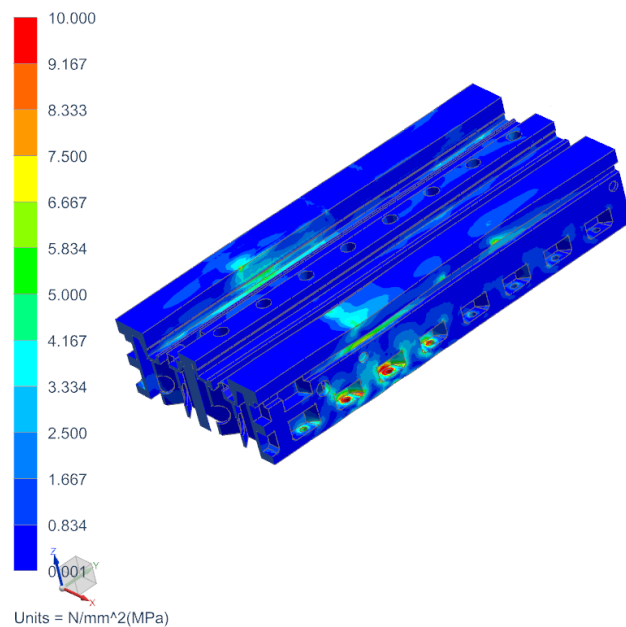


Obr. 40 Znáznornění kontaktů ve výpočtovém modelu

#### 4.4.4 Výsledky MKP analýzy

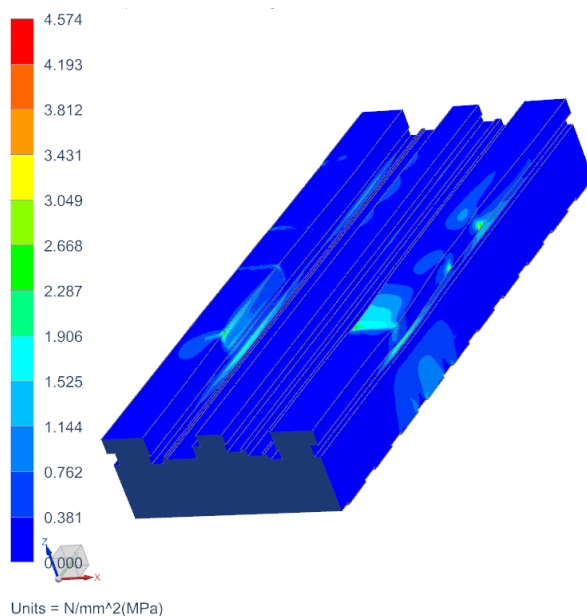
##### Maximální napětí

Na obrázku (Obr. 41) je litinové lože. Zde byla hodnota maximálního napětí 29,3 MPa



Obr. 41 Maximální napětí v litinovém loži

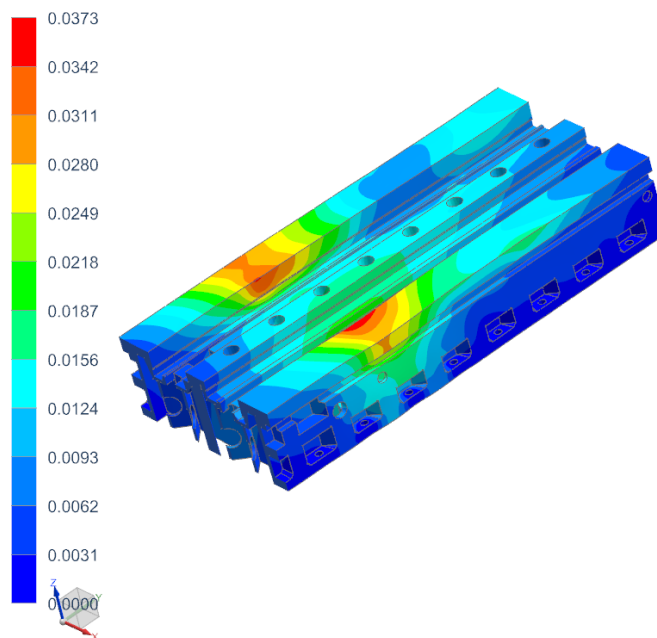
Na obrázku (Obr. 42) je polymer-betonové lože. Zde byla hodnota maximálního napětí 4,5 MPa.



Obr. 42 Maximální napětí v polymer-betonovém loži

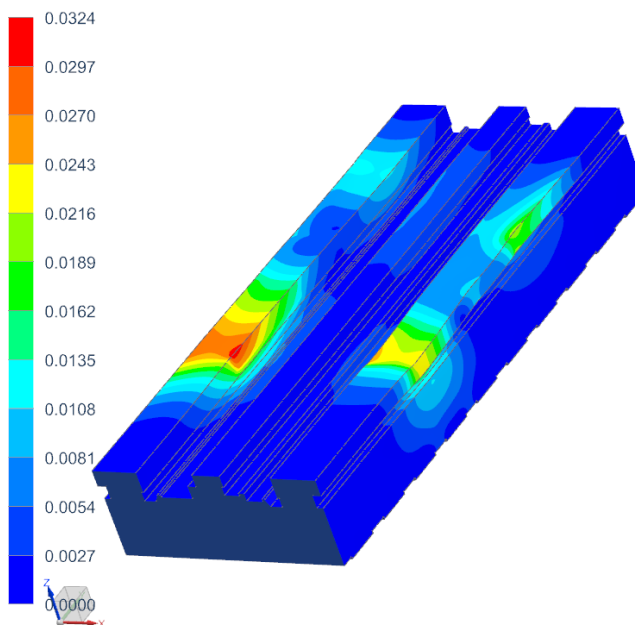
### Maximální deformace

Na obrázku (Obr. 43) je litinové lože. Zde byla hodnota maximální deformace 0,0373 mm



Obr. 43 Maximální deformace v litinovém loži

Na obrázku (Obr. 44) je polymer-betonové lože. Zde byla hodnota maximální deformace 0,0324 mm



Obr. 44 Maximální deformace v polymer-betonovém loži

#### 4.4.5 Souhrn poznatků z výpočtové studie

Cílem studie byla kontrola vhodnosti užití polymer-betonového lože na soustruhu pro velké obrobky. Byly vytvořeny dvě varianty lože, přičemž jedno lože (litinové) je již existující a tudíž je potvrzena jeho použitelnost v praxi. Druhé lože (polymer-betonové) je alternativa, která by mohla zvýšit kvalitu obrábění. To je hlavním důvodem, proč je tato studie prováděna.

U polymer-betonového lože je nutné udržet velikost maximálního napětí pod zhruba 15 MPa. Tato hranice určuje, zda je lože vyhovující pro náhradu, či nikoli. V případě, že maximální napětí vystoupá výše, hrozí známky trvalých deformací, které se projeví prasklinami, nebo úplným rozlomením a tudíž trvalým znehodnocením celého lože.

Maximální deformace polymer-betonového lože by neměla výrazně překročit maximální deformaci litinového lože, aby bylo možné vyhodnotit lože jako vhodné.

Dle výsledků maximálních napětí (Obr. 41, Obr. 42) lze vidět, že díky úpravám konstrukce bylo u polymer-betonového lože výrazně sníženo napětí oproti litinovému loži. MKP analýza u litinového lože uvádí 29,3 MPa. Maximální napětí v polymer-betonovém loži je potom 4,5 MPa. Díky těmto parametrům lze říci, že polymer-betonové lože vyhovuje z hlediska maximálního napětí.

Maximální deformace v obou ložích je velmi podobná. Maximální deformace v litinovém loži je 0,0373 mm, maximální deformace v polymer-betonovém loži je 0,0324 mm. Díky těmto parametrům lze říci, že polymer-betonové lože vyhovuje z hlediska maximální deformace.

Polymer-betonové lože splnilo všechny potřebné předpoklady pro náhradu litinového lože. Dle výsledků MKP analýzy lze říci, že polymer-betonové lože vyhovuje po stránce maximálního napětí i maximální deformace a navíc přináší značně lepší dynamické a teplotní vlastnosti a také nižší hmotnost.

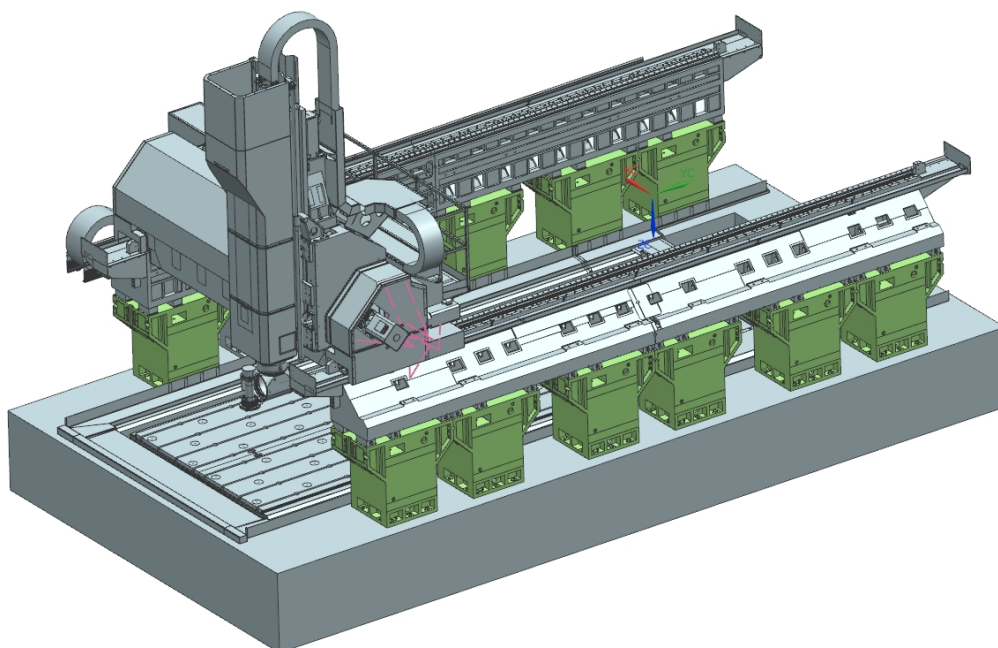
Tab. 12 Souhrn výsledků z MKP studie

|                                       | <b>Litinové lože</b>                 | <b>Polymer-betonové lože</b>          |
|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Maximální napětí</b>               | 29,3 MPa                             | 4,5 MPa                               |
| <b>Maximální deformace</b>            | 0,0373 mm                            | 0,0324 mm                             |
| <b>Váha</b>                           | 53 382 kg                            | 45 254 kg                             |
| <b>Objem spotřebovaného materiálu</b> | 6,817 e <sup>9</sup> mm <sup>3</sup> | 1,968 e <sup>10</sup> mm <sup>3</sup> |

## 5 Výzkumný záměr

Pro výzkumný záměr byl vybrán portálový obráběcí stroj typu „horní gantr“(Obr. 45). Jedná se o velký obráběcí stroj, na němž doposud není polymer-beton standardně využíván. Při rozvaze o výběru nejvhodnějšího dílce se uvažovalo nejprve nad částmi, které jsou blízce řezu (smykadlo, příčník). Na základě informací získaných z částí rešerše, předvýzkumu a také konzultací s kolegy a společností Schneeberger se ukázalo, že tyto dílce nejsou vhodné pro náhradu polymer-betonovým materiálem. Problémů je hned několik. Předně, tyto dílce mohou být vystaveny rázům, které mohou zapříčinit popraskání, nebo kompletní znehodnocení polymer-betonových struktur. Dalším problémem je tvarová složitost. Tyto dílce by bylo nutné konstruovat jako hybridní struktury, jelikož mají tvarově složitě vedení a další prvky. Díky tomu se dostáváme k dalšímu problému a to, že by tyto dílce byly téměř stejně těžké jako konvenční řešení a tudíž by jedna z hlavních výhod (snížená hmotnost) zmizela.

Po dalším zkoumání bylo rozhodnuto, že nejvhodnějším dílem pro zkoumání bude stojna (Obr. 45). Tento díl je tvarově i polohově ideální, aby se na něm projevil všechny výhody polymerního betonu. Díky relativní tvarové jednoduchosti je předem možné říci, že forma na tento díl bude konstrukčně i ekonomicky zásadně méně náročná než v případě výše zmíněných dílců. Současně je stojna objemným dílcem, což znamená, že se může projevit značný úbytek hmotnosti, při správné konstrukci. V neposlední řadě, bude díky tlumícím schopnostem polymer-betonu tento díl jakýmsi tlumícím prvkem oddělujícím stroj a zbytek haly. Tento fakt může pomoci jak pro potlačení vnějších vibrací přenášených do stroje, tak i opačným směrem, tedy ze stroje do haly.



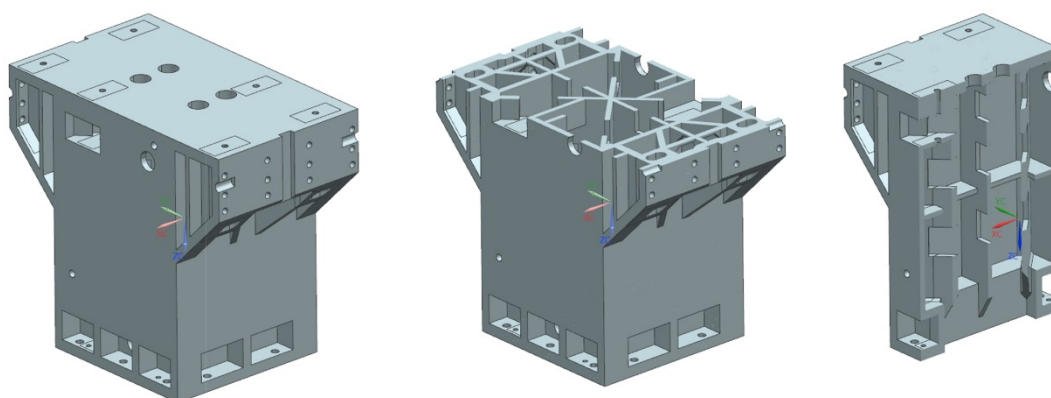
Obr. 45 Stroj a vyznačená stojna (zeleně)

## 5.1 Výpočet stávajícího řešení

### 5.1.1 Referenční Výpočtový model

V první fázi je nutné sestavit výpočtový model (Obr. 46) stávajícího řešení. Výsledky těchto výpočtů poslouží jako reference, pro upravené varianty a na základě těchto referencí bude posuzována vhodnost jednotlivých variant. Porovnání všech výpočtových modelů bude vzhledem k použití dílu posuzováno pomocí výsledků modální analýzy, která pomůže zjistit velikost a tvar vlastních frekvencí, statickou analýzou, která určí velikost deformací a napětí v modelu, hmotností a velikostí útlumu. Referenční model je mírně zjednodušen pro kvalitnější a méně problémovou síť. Byly odstraněny prvky, jako jsou například drobná vybrání a malé otvory. Dále byly vytvořeny zatěžující plochy na vrchní straně dílce, které umožní přenést zatěžný stav přesně na místa, která odpovídají reálnému stavu. Zachována jsou potom všechna žebra a vnitřní prvky původního svařence, tudíž by nemělo dojít k významnému zkreslení hodnot tuhosti a pevnosti dílce.

Síť byla vytvořena pomocí prvků CTETRA (10) se základní velikostí elementů 20 mm. Základní velikost elementů byla zjemněna na kritických místech, jako jsou otvory a další tvarově složitá místa. Vzhledem k tomu, že se jedná o svařenec, nebylo možné využít hrubší síť. Dílci byly přiřazeny mechanické vlastnosti materiálu oceli.



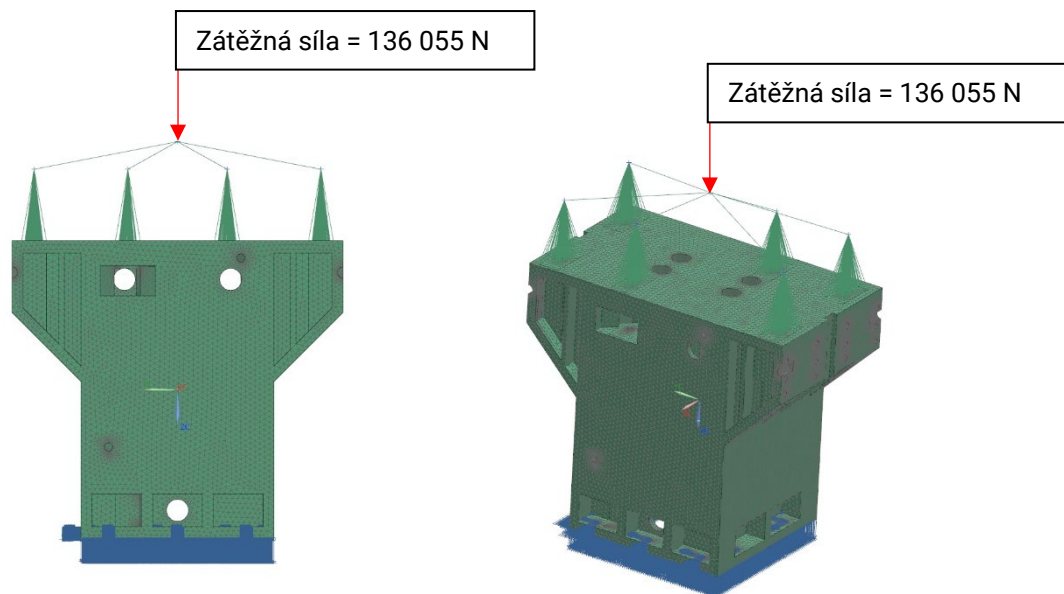
Obr. 46 Referenční model (dílce)

Tab. 13 Vlastnosti oceli využité pro referenční model

|                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| <b>HUSTOTA</b>          | 7829 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>POISSONOVO ČÍSLO</b> | 0,288                  |
| <b>YOUNGŮV MODUL</b>    | 206940 MPa             |



Pro výpočet statického zatížení bylo nutné vytvořit pomocné 1D prvky typu RBE2 (Obr. 47). Přes tyto prvky bude možné roznést sílu na dílec tak, aby to co nejvíce odpovídalo realitě. Tyto prvky jsou umístěny přesně na plochách, na kterých je dílec spojen s další částí stroje. Díky tomu se vliv zátěžné síly v simulaci projeví mnohem přesněji, než kdyby zátěžná síla byla definována na celou vrchní plochu dílce. Při vyhodnocení okrajových podmínek bylo rozhodnuto, že jednotlivé 1D prvky budou spojeny dalšími do zátěžného bodu (zdroje síly), který leží v ose symetrie X a Z. Vzhledem ke konstrukci stroje je to totiž zřejmě zátěžný stav, který nejvíce odpovídá provoznímu zátěžnému stavu. Velikost síly je potom dána hmotností všech částí stroje s naplohou pro maximální zatížení stojny.



Obr. 47 Zatížení modelu a jeho ukotvení

#### 5.1.1.1 Modální analýza

Dílec je podroben modální analýze v zafixovaném stavu. Díky modální analýze zjistíme prvních deset vlastních frekvencí dílce, které můžeme následně využít jako referenci pro modifikované dílce. Dílec je zafixován v co nejvíce přirozeném stavu (otvory pro šrouby a dosedací plocha) (Obr. 47).

#### 5.1.1.2 Statická analýza

U statické analýzy zjistíme velikosti deformací a napětí, díky čemuž budeme moci posoudit kritická místa a zjistíme, kde si dávat pozor při návrhu varianty z polymerního betonu, který je náchylný na vysoká napětí. Zátěžný stav bude pouze jeden, jelikož dílec je při běžném provozu zatížen pouze tíhovou silou dílců stroje. Velikost této síly je **136 055 N**. Nastavení sítě a zafixování bude stejné jako u modální analýzy. Přibude pouze zátěžná síla.

### 5.1.1.3 Tuhost

Z výsledků statické analýzy bude možné získat také hodnoty tuhosti konkrétních dílů. Tyto hodnoty nám ukáží, zda i přes náhradu materiálů je zachována schopnost dílce odolávat deformacím.

Vztah pro výpočet tuhosti: 
$$k = \frac{F}{\Delta l}$$

kde:  $k$  = tuhost [ $N.m^{-1}$ ];  $F$  = zatěžující síla [ $N$ ];  $\Delta l$  = rozdíl délek (deformace) [ $m$ ]

### 5.1.1.4 Hmotnost

Jednou z klíčových hodnot je velikost hmotnosti. Jelikož mají polymerní betony značně nižší hustotu než ocel, bude jedním z hlavních cílů dosáhnout snížení hmotnosti při zachování tuhosti dílce. Referenční dílec je vyroben z oceli.

### 5.1.1.5 Ztráta stability

Tato analýza nám určí velikost násobku síly potřebné pro ztrátu stability konstrukce. Výsledkem je bezrozměrná hodnota. Okrajové podmínky pro tuto analýzu jsou stejné jako u statické analýzy, pouze je zvolen jiný řešič (SOL 105 Linear Buckling).

### 5.1.1.6 Poměrný útlum

Protože je logaritmický dekrement polymer-betonu obecně až desetinásobně vyšší než u oceli, je zde uveden i výpočet poměrného útlumu, který může být ukazatelem přínosu při odtlumení stroje od okolních vibrací, případně odtlumení okolí od vibrací stroje.

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}$$

kde:  $\delta$  je logaritmický dekrement, který je dán pro  $n$  kmitů

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{w(t)}{w(t + T_D)}$$

kde:  $w(t)$  – výchylka v čase  $t$ ;  $w(t+T_D)$  – je výchylka v čase  $(t+T_D)$ ;  $T_D$  je doba periody  
 $n$  – počet kmitů v časovém úseku, pro který byl logaritmický dekrement počítán

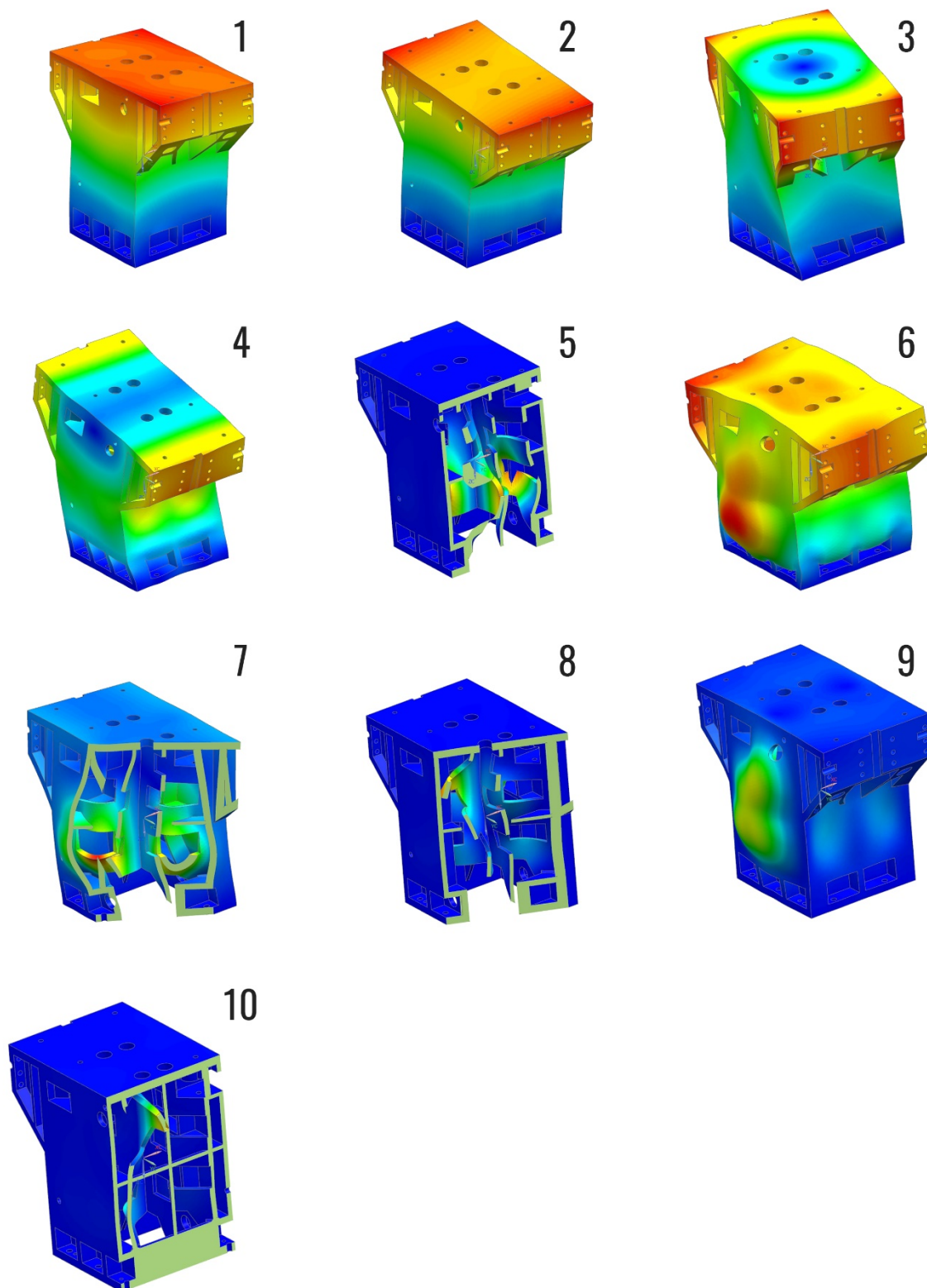
## 5.1.2 Výsledky analýz referenčního modelu

### 5.1.2.1 Modální analýza – výsledky referenčního modelu

Výsledky modální analýzy ukazují, že zafixovaný dílec má prvních deset vlastních frekvencí v rozmezí **198 – 845 HZ**. Na Obr. 48 lze vidět tvary jednotlivých frekvencí.

Tab. 14 Vlastní frekvence referenčního modelu

| Referenční model – vlastní frekvence |              |
|--------------------------------------|--------------|
| ČÍSLO MÓDU                           | HODNOTA (Hz) |
| Mód 1                                | 198,4        |
| Mód 2                                | 200          |
| Mód 3                                | 291,8        |
| Mód 4                                | 613,6        |
| Mód 5                                | 640,7        |
| Mód 6                                | 647,9        |
| Mód 7                                | 733,3        |
| Mód 8                                | 758,2        |
| Mód 9                                | 801,4        |
| Mód 10                               | 844,8        |



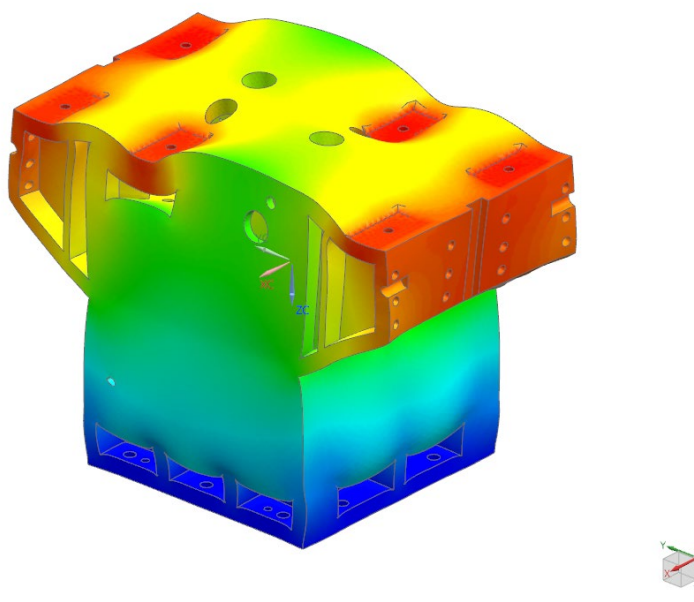
Obr. 48 Tvary vlastních frekvencí referenčního modelu

### 5.1.2.2 Statická analýza – výsledky referenčního modelu

Maximální deformace v jednotlivých směrech ukazují (Tab. 15), že největší deformace vznikají ve směru osy Z, která má stejný směr jako zátěžná síla. Deformace ve směrech X a Y jsou ve srovnání s velikostí v ose zanedbatelné. Odpovídá to tedy předpokladu, že celá konstrukce je navržena zejména na tlakové napětí, které zde působí v ose Z.

Tab. 15 Maximální deformace v jednotlivých směrech

| Referenční model – max. deformace |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| OSA                               | VELIKOST DEFORMACE (mm) |
| X                                 | 0,0040                  |
| Y                                 | 0,0028                  |
| Z                                 | 0,0135                  |

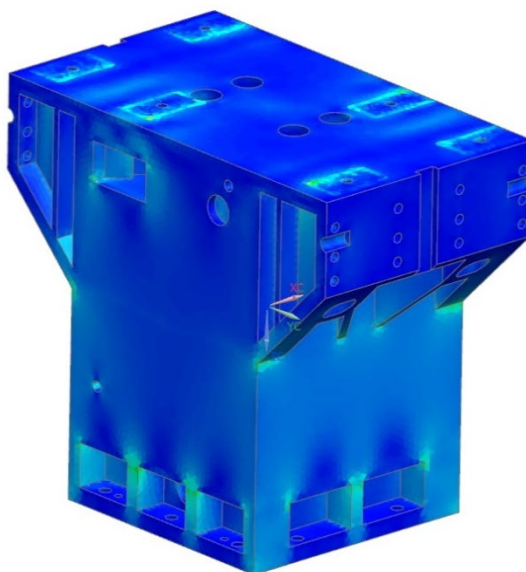


Obr. 49 Deformace referenčního modelu

Velikost napětí bude důležitá zejména pro kontrolu kritických hodnot napětí, které jsou pro polymer beton značně nízké. Jelikož se ale ukazuje, že celý dílec je zatížen tlakovým napětím a hodnoty napětí u referenčního dílce jsou velmi nízké, při správné konstrukci polymer-betonového dílce by nemělo dojít k přiblížení se kritické hranici napětí. U referenčního modelu je maximální napětí 8,66 MPa (Tab. 16).

Tab. 16 Maximální napětí referenčního modelu

| Referenční model – max. napětí    |      |
|-----------------------------------|------|
| <b>VELIKOST MAX. NAPĚTÍ (MPa)</b> | 8,66 |



Obr. 50 Napětí v referenčním modelu

### 5.1.2.3 Tuhost – výsledky referenčního modelu

Referenční model vykazuje největší tuhost ve směru osy Y (Tab. 17). Nejnižší potom ve směru osy Z. Výsledky tuhostí jsou značně ovlivněny směrem působící síly.

Tab. 17 Tuhost referenčního modelu v jednotlivých směrech

| Referenční model - tuhost |                                  |
|---------------------------|----------------------------------|
| <b>OSA</b>                | <b>TUHOST (N.m<sup>-1</sup>)</b> |
| X                         | 3,40*e <sup>10</sup>             |
| Y                         | 4,86*e <sup>10</sup>             |
| Z                         | 1,01*e <sup>10</sup>             |

#### 5.1.2.4 Hmotnost - výsledky referenčního modelu

Hmotnost referenčního dílce je 1675 kg.

Tab. 18 Hmotnost referenčního modelu

| Referenční model - hmotnost |      |
|-----------------------------|------|
| <b>HMOTNOST (kg)</b>        | 1675 |

#### 5.1.2.5 Ztráta stability - výsledky referenčního modelu

Referenční dílec ztrácí stabilitu při násobku síly o hodnotě 2262.

Tab. 19 Hodnota koeficientu ztráty stability

| Referenční model – ztráta stability |      |
|-------------------------------------|------|
| <b>HODNOTA (-)</b>                  | 2262 |

#### 5.1.2.6 Poměrný útlum - výsledky referenčního modelu

Poměrný útlum referenčního dílce je 0,000796. Tuto hodnotu lze doplnit logaritmickým dekrementem útlumu 0,00500 (Tab. 20).

Tab. 20 Hodnoty poměrného útlumu a logaritmického dekrementu

| Referenční model – poměrný útlum    |          |
|-------------------------------------|----------|
| <b>POMĚRNÝ ÚTLUM (-)</b>            | 0,000796 |
| <b>LOG DEKREMENT<br/>ÚTLUMU (-)</b> | 0,00500  |

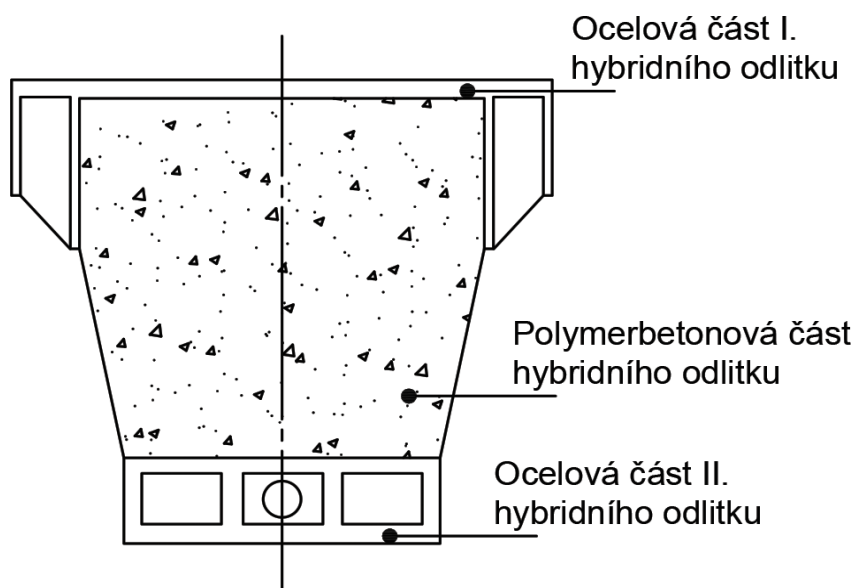
### 5.1.3 Souhrn výsledků referenčního modelu

Výsledky referenčního dílce budou brány jako vstupní porovnávací hodnoty pro nově navržené varianty. Tyto varianty budou podrobeny stejným analýzám, při stejné zátěži. Nastavení výpočtových simulací i okrajových podmínek bude pro nově navržené varianty odpovídat simulacím referenčního dílce.

## 5.2 Návrh nových variant

Na základě zkoumání problematiky a pravidel konstrukce dílců z polymerních betonů bylo navrženo několik variant upravujících referenční model. Všechny varianty jsou navrženy tak, aby odpovídaly zásadám pro návrh polymer–betonových dílců a byly slévatelné. Každá varianta přináší jiné benefity. U všech variant je snahou docílit lepších výsledků než jaké vykazuje referenční model. Na základě získaných hodnot bude možné posoudit, zda je některou z variant vhodné doporučit jako náhradu referenčního dílce.

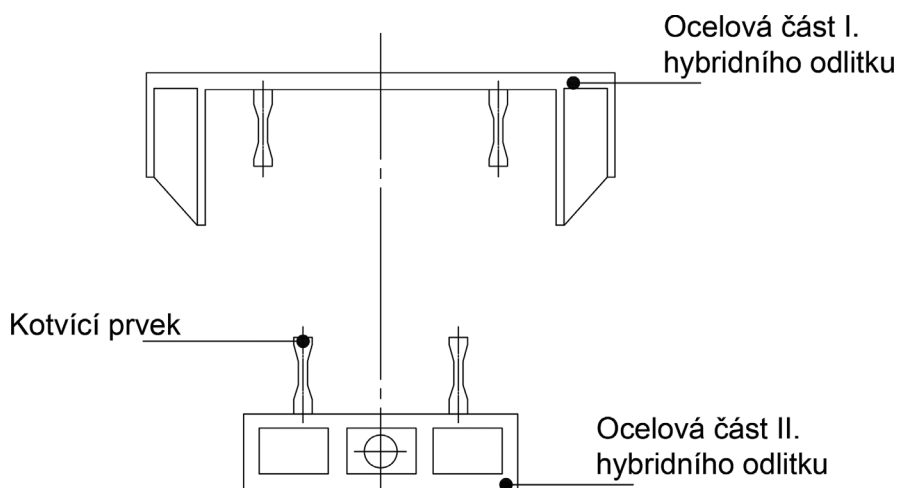
Přístup k základní konstrukci mají všechny varianty stejný. Jedná se o hybridní strukturu kombinace polymerního betonu a oceli. Vrchní a spodní část zůstává zachována z ocelových částí (svařenců). Tento krok byl učiněn zejména za účelem ochrany polymerního betonu, který je méně odolný při případném rázu. Díky tomuto rozhodnutí se ze struktury stává svým způsobem sendvičová struktura. Horní a spodní část mají za úkol ochránit dílec před případnými rázy a dynamickým působením a střední část je kompletně polymer–betonová a má za úkol značně snížit hmotnost a tlumit vibrace.



Obr. 51 Vzor hybridního konceptu

Každá z variant má základní úpravu svařenců – ocelové části I. a II. stejnou. Jedná se o základní tvar svařenců a také kotvící prvky (Obr. 51), které mají přispět k pevnějšímu spojení s polymer–betonovou částí. Tyto úpravy byly navrženy na základě poznatků z předchozích kapitol.



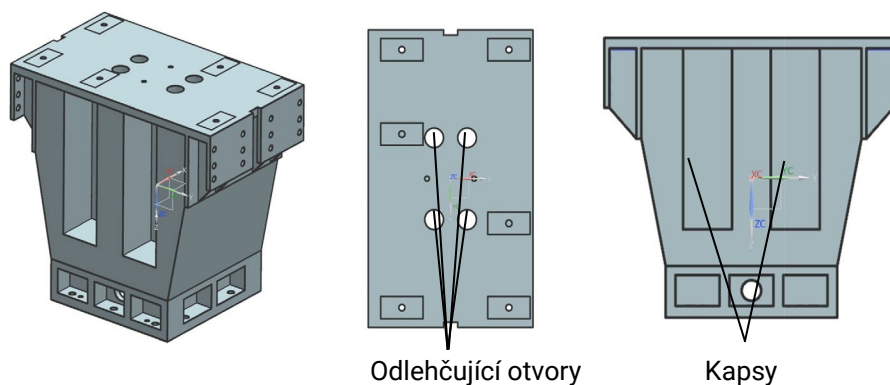


Obr. 52 Ukázka svařenců využitých v hybridním dílci

Díly Ocelová část I. a Ocelová část II. vycházejí z referenčního modelu. Zachovávají si jak základní rozměry, tak i funkční prvky jako jsou díry pro připojení dalších částí stroje, nebo otvory pro manipulaci s dílcem samotným. Tyto prvky jsou umístěny na stejných místech jako na referenčním modelu. U obou ocelových dílů se jedná o svařence. Oba tyto díly navíc budou součástí formy, čímž se počet nutných dílců formy značně sníží.

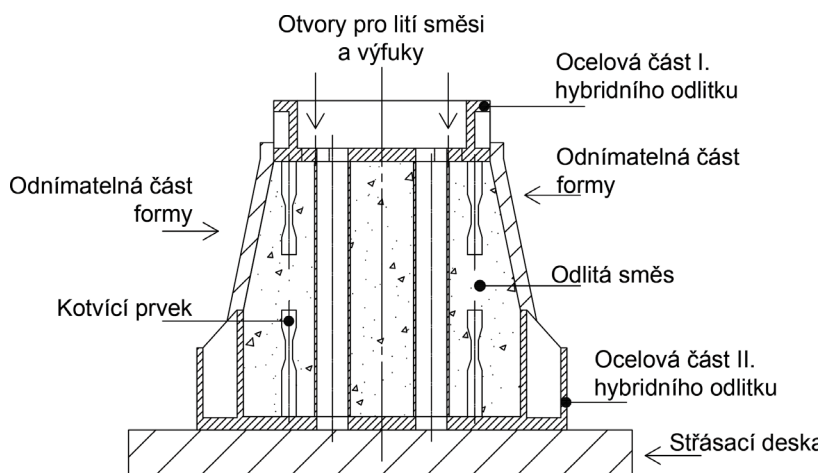
### 5.2.1 Konstrukce varianty I.

V případě první varianty jsou zalaty oba svařence s prvky odlehčení. Jedním z odlehčení jsou 4 otvory (Obr. 53), které jsou průchozí taktéž skrze oba ocelové svařence. Tyto otvory se tedy dají využít pro průchod kabeláže, nebo jiných prvků stroje. Otvory jsou umístěny do střední části dílce. K vytvoření těchto otvorů se využívají plastové trubky vložené do formy. Tyto trubky zamezí zalití požadovaných ploch. Trubky následně zůstávají součástí dílce. Dalším odlehčením je vybrání kapes na bocích dílce. Tyto kapsy mají i druhý účel. Slouží jako prostor pro utažení a seřízení ustavovacích prvků (fixátorů), které spojují dílec s další částí lože.



Obr. 53 Model varianty I.

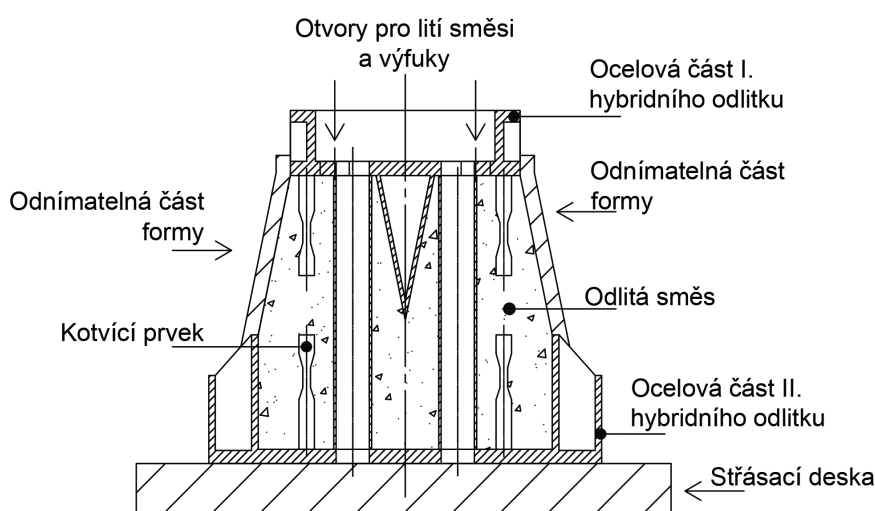
Pro ukázkou je na obrázku níže vidět, jakým způsobem by byla zhruba vytvořena forma pro variantu I.



Obr. 54 Hrubá ukáзка formy pro variantu I.

### 5.2.2 Konstrukce varianty II.

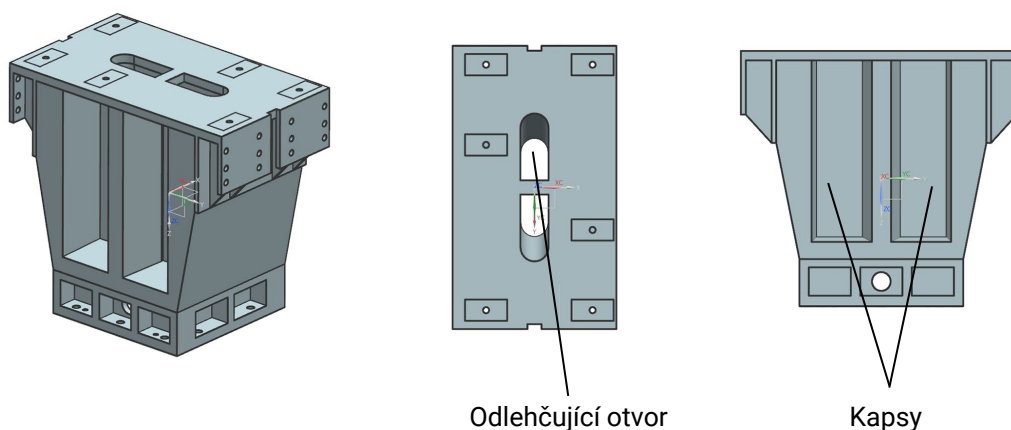
Konstrukce varianty dva je z velké části identická jako varianta I. až na jeden podstatný rozdíl. Na spodním svařenci je u varianty II. umístěn hranol (Obr. 55). Tento hranol má několik funkcí. Jednou z funkcí je, že v případě procesu odlévání a střešení odvede vzduchové bubliny blíže výfuků, čímž bude zamezeno tomu, že by tyto bubliny zůstaly ve směsi a tvořily by póry v bodu spojení mezi polymer-betonem a ocelí. Další funkcí hranolu je možné snížení váhy (hranol je dutý) a zvětšení styčné plochy mezi ocelí a polymer-betonem.



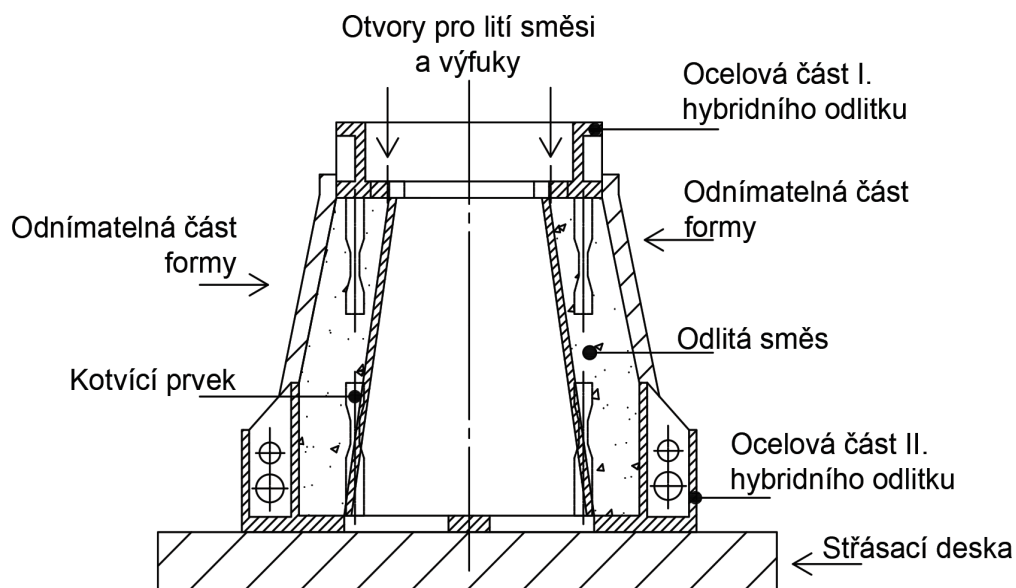
Obr. 55 Hrubá ukáзка formy pro variantu II.

### 5.2.3 Konstrukce varianty III.

Třetí varianta vychází ze snahy provést co největší úsporu hmotnosti. Byl odstraněn hranol a 4 odlehčující otvory. Skrze celý dílec byl potom vytvořen jeden velký otvor zešikmeného tvaru (Obr. 56). Tento otvor může opět sloužit za účelem přívodu kabeláže nebo jiných prvků. Byly také prohloubeny a zvětšeny kapsy na bocích polymerního betonu. Tyto agresivní úpravy vedly k velké úspoře hmotnosti, ale současně dílec stále vyhovuje pravidlům pro konstrukci polymer-betonových dílců.



Obr. 56 Model varianty III.



Obr. 57 Hrubá ukázka formy pro variantu III

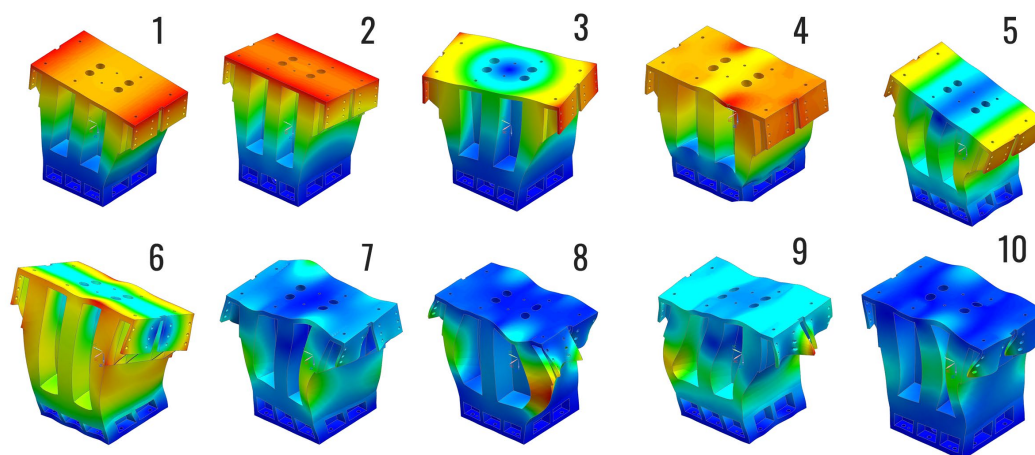
## 5.2.4 Výsledky analýz variant I., II. a III. a porovnání s referenčními výsledky

### 5.2.4.1 Modální analýza

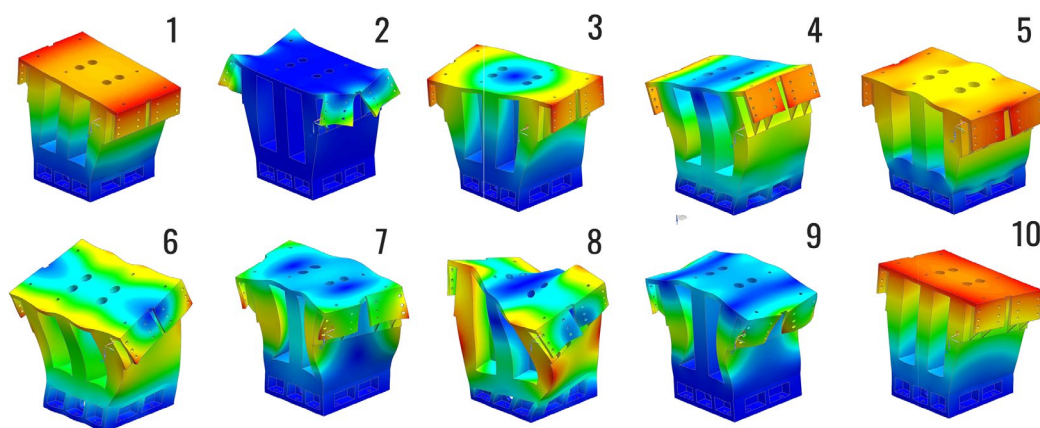
Vzhledem ke značně odlišnému konstrukčnímu i tvarovému řešení zkoumaných variant v porovnání s referenčním modelem je jasné, že modální analýza ukáže odlišné hodnoty od těch referenčních. Cílem bylo držet se pokud možno blízko původních hodnot, nebo nad těmito hodnotami. To se relativně daří všem variantám. Nejlépe si vedou varianty II. a III., jejichž frekvence se propadají pod původní hodnoty méně, než hodnoty varianty I. Pokud budeme uvažovat jako první mód za nejdůležitější, potom je referenčnímu modelu nejbližší varianta III, která má také nejmenší propad u módu 3.

Tab. 21 Vlastní frekvence variant I., II. a III. a jejich porovnání s referenčním modelem

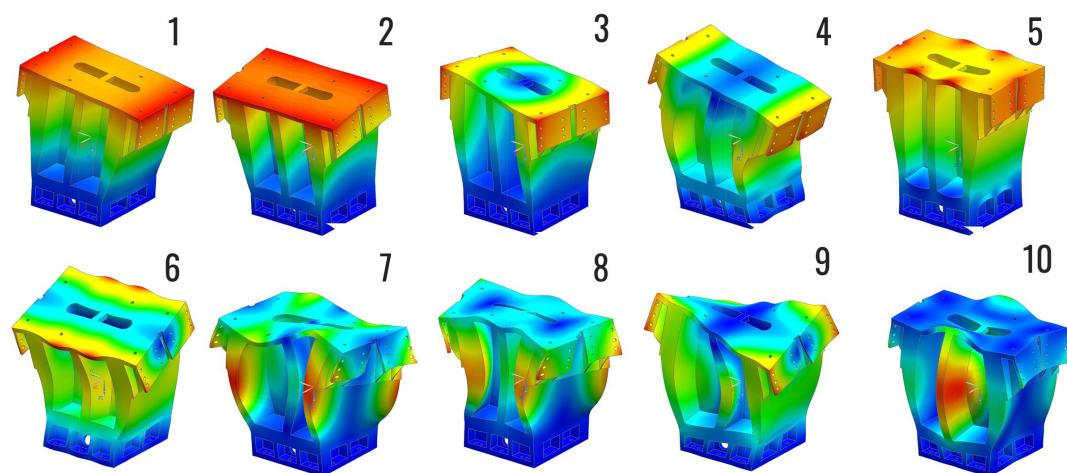
| OZNAČENÍ MÓDU | Varianta I.     |                                   | Varianta II.    |                                    | Varianta III.   |                                     |
|---------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|               | HODNOTA<br>(Hz) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(Hz) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(Hz) | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| 1             | 186,0           | -6,25                             | 200,9           | 1,26                               | 197,1           | -0,66                               |
| 2             | 205,6           | 2,8                               | 223,6           | 11,8                               | 208,5           | 4,25                                |
| 3             | 240,2           | -17,7                             | 242,6           | -16,86                             | 244,1           | -16,35                              |
| 4             | 635,6           | 3,59                              | 677,4           | 10,4                               | 676,8           | 10,30                               |
| 5             | 637,5           | -0,51                             | 692             | 7,99                               | 683,9           | 6,74                                |
| 6             | 729,9           | 12,66                             | 770,6           | 18,94                              | 749,4           | 15,67                               |
| 7             | 1037,9          | 41,54                             | 865,4           | 18,01                              | 1030,2          | 40,49                               |
| 8             | 1039,4          | 37,09                             | 918,5           | 21,14                              | 1032,1          | 36,13                               |
| 9             | 1165,9          | 45,48                             | 1083,9          | 35,25                              | 1091,7          | 36,22                               |
| 10            | 1177,1          | 39,33                             | 1093,2          | 29,4                               | 1166,7          | 38,10                               |



Obr. 58 Tvary vlastních frekvencí varianty I.



Obr. 59 Tvary vlastních frekvencí varianty II.



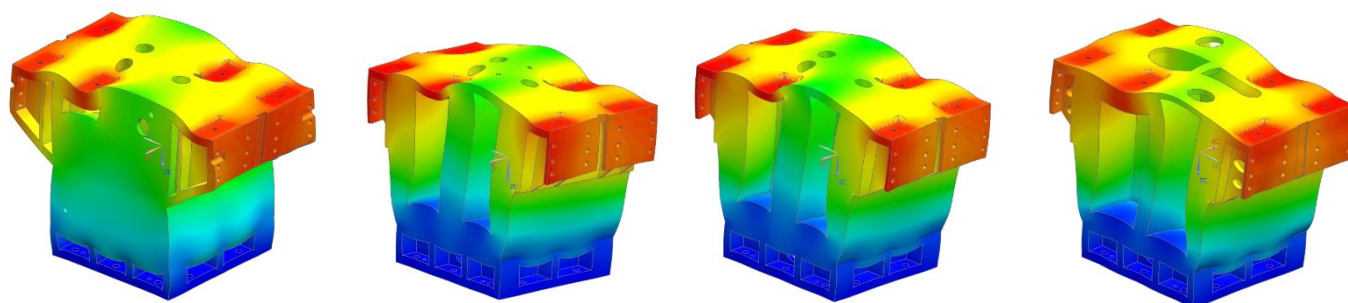
Obr. 60 Tvary vlastních frekvencí varianty III.

### 5.2.4.2 Statická analýza

Maximální deformace jsou u všech variant ve všech směrech nižší s výjimkou deformace v ose Z u varianty I. Nejlépe vychází varianta II. Obecně ale lze říci, že i přes lehce zvýšenou deformaci by i tuto variantu, vzhledem k velmi nízkým hodnotám, bylo možno považovat za vyhovující.

Tab. 22 Výsledky maximální deformace v jednotlivých směrech pro variantu I., II. a III.

|                                    | Varianta I.     |                                   | Varianta II.    |                                    | Varianta III.   |                                     |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|                                    | HODNOTA<br>(mm) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(mm) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(mm) | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| <b>MAXIMÁLNÍ DEFORMACE V OSE X</b> | 0,0015          | -62,25                            | 0,0014          | -65,25                             | 0,0017          | -58,25                              |
| <b>MAXIMÁLNÍ DEFORMACE V OSE Y</b> | 0,0025          | -11,07                            | 0,0021          | -26,07                             | 0,0028          | 0                                   |
| <b>MAXIMÁLNÍ DEFORMACE V OSE Z</b> | 0,0138          | 2,22                              | 0,0114          | -15,26                             | 0,0118          | -12,60                              |

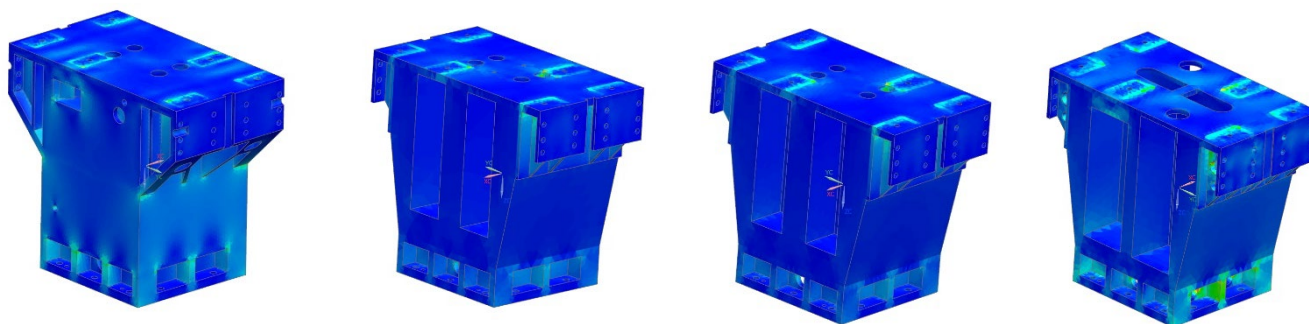


Obr. 61 Deformace dílců – zleva: referenční model, varianta I, varianta II, varianta III.

Maximální napětí bylo zkoumáno zejména z důvodu nízké meze pevnosti polymer-betonu, který dosahuje povoleného napětí v tahu cca 15 MPa. Výsledky ukazují, že maximální napětí u všech variant je výrazně pod touto hodnotou. Navíc je zatížení působící na dílec převážně tlakové a v takovém případě je mez pevnosti polymer-betonu až 150 MPa. V porovnání s referenčním modelem napětí kleslo až o 39% (varianta III.). Je to zejména vlivem změny struktury, kdy vznikly pro přenos síly větší plochy, tudíž mohl být vliv síly lépe rozložen.

Tab. 23 Výsledky maximálního napětí pro variantu I, II. a III.

|                  | Varianta I.   |                                   | Varianta II.  |                                    | Varianta III. |                                     |
|------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
|                  | HODNOTA (MPa) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (MPa) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (MPa) | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ | 8,648         | -0,139                            | 8,293         | -4,238                             | 5,278         | -39,053                             |



Obr. 62 Napětí v dílcích - zleva: referenční model, varianta I, varianta II, varianta III.

### 5.2.4.3 Tuhost

Výsledná tuhost u všech nově navržených variant je opět zásadně lepší než u referenčního modelu. Nejlepší tuhosti vykazuje varianta II.

Tab. 24 Výsledky tuhostí pro variantu I., II. a III.

|                | Varianta I.                    |                                   | Varianta II.                   |                                    | Varianta III.                  |                                     |
|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|                | HODNOTA<br>(Nm <sup>-1</sup> ) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(Nm <sup>-1</sup> ) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(Nm <sup>-1</sup> ) | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| TUHOST V OSE X | 9,01*e <sup>10</sup>           | <b>164,9</b>                      | 9,79*e <sup>10</sup>           | <b>187,8</b>                       | 8,15*e <sup>10</sup>           | <b>139,5</b>                        |
| TUHOST V OSE Y | 5,46*e <sup>10</sup>           | <b>12,4</b>                       | 6,57*e <sup>10</sup>           | <b>35,3</b>                        | 4,86*e <sup>10</sup>           | <b>0</b>                            |
| TUHOST V OSE Z | 9,86*e <sup>9</sup>            | <b>-2,2</b>                       | 1,19*e <sup>10</sup>           | <b>18,0</b>                        | 1,15*e <sup>10</sup>           | <b>14,4</b>                         |

#### 5.2.4.4 Ztráta stability

Ztráta stability vyjadřuje, kolikanásobně by se musela zvětšit síla, aby došlo ke zhroucení konstrukce. Nejvyšší hodnoty vykazuje varianta I., avšak varianta III. vykazuje také velmi dobré výsledky.

Tab. 25 Výsledné hodnoty ztráty stability pro variantu I., II. a III.

|                  | Varianta I. |                                   | Varianta II. |                                    | Varianta III. |                                     |
|------------------|-------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
|                  | HODNOTA (-) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (-)  | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (-)   | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| ZTRÁTA STABILITY | 3439        | <b>52,03</b>                      | 2760         | <b>22,02</b>                       | 3239          | <b>43,19</b>                        |

#### 5.2.4.5 Hmotnost

Jedním z nejzásadnějších parametrů nově navržených variant je úspora hmotnosti. Zde je jednoznačně vidět, že varianta III., která byla navržena právě s ohledem, na co možná největší úsporu hmotnosti vykazuje nejlepší výsledky. Nabízí až 20% úsporu hmotnosti oproti referenčnímu modelu.



Tab. 26 Hmotnosti variant I, II. a III.

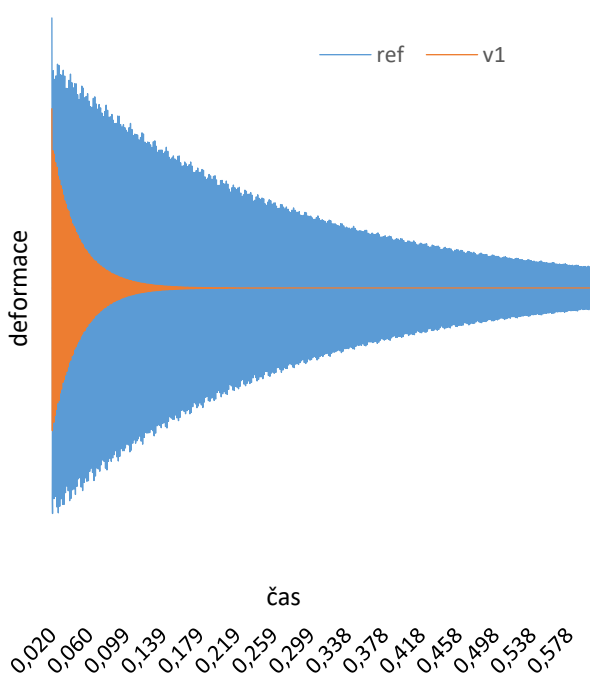
|          | Varianta I.  |                                   | Varianta II. |                                    | Varianta III. |                                     |
|----------|--------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
|          | HODNOTA (kg) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (kg) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA (kg)  | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| HMOTNOST | 1501         | <b>-10,4</b>                      | 1503         | <b>-10,3</b>                       | 1341          | <b>-20</b>                          |

#### 5.2.4.6 Poměrný útlum

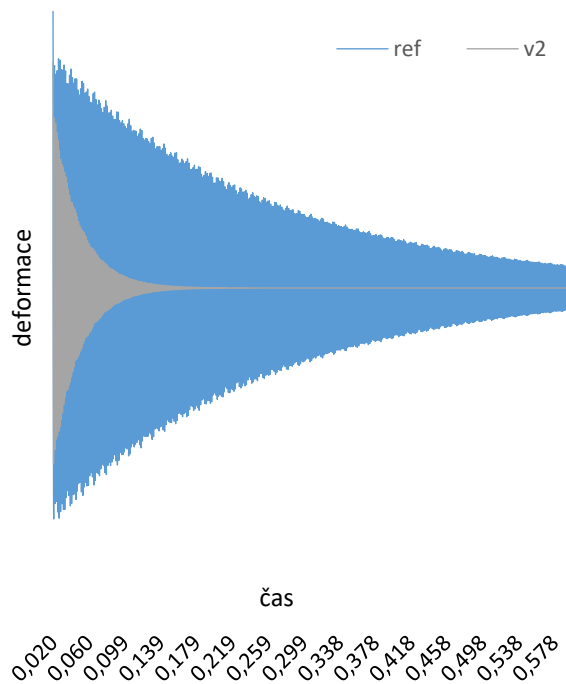
Dalším významným parametrem je hodnota útlumu. Z výsledků je vidět, že nově navržené varianty dokáží vibrace odtlumit několikanásobně lépe než referenční dílec.

Tab. 27 Poměrný útlum a logaritmičtý dekrement pro variantu I, II. a III.

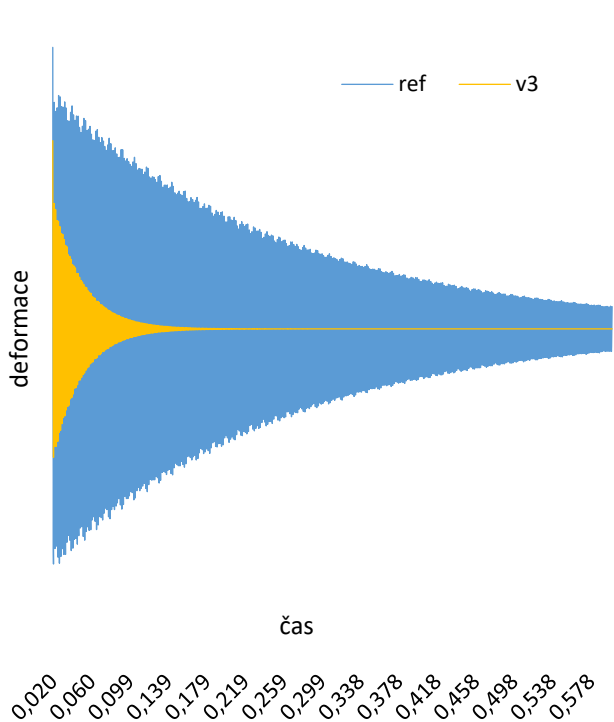
|                          | Varianta I.    |                                   | Varianta II.   |                                    | Varianta III.  |                                     |
|--------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
|                          | HODNOTA<br>(-) | ROZDÍL (%)<br>(I. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(-) | ROZDÍL (%)<br>(II. vs. REFERENČNÍ) | HODNOTA<br>(-) | ROZDÍL (%)<br>(III. vs. REFERENČNÍ) |
| POMĚRNÝ ÚTLUM            | 0,007765       | <b>873</b>                        | 0,00758        | <b>851</b>                         | 0,00751        | <b>842</b>                          |
| LOG. DEKREMENT<br>ÚTLUMU | 0,0488         |                                   | 0,0476         |                                    | 0,0472         |                                     |



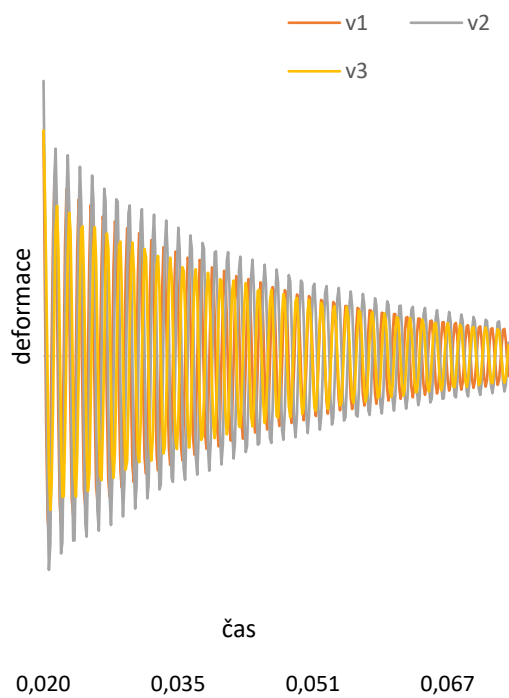
Obr. 64 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty I.



Obr. 63 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty II.



Obr. 66 Srovnání útlumu referenčního dílce a varianty III.



Obr. 65 Srovnání útlumu mezi variantami

## 5.2.5 Vyhodnocení nejlepší varianty dle výsledků analýz

Na základě vyhodnocení dílčích analýz byla vyhotovena komplexní tabulka, ve které je zahrnuto hodnocení každé z variant. Výsledek každé analýzy byl bodově odhodnocen na základě pořadí. Nejlepší varianta získala 4 body, ta nejhorší potom 1 bod. Protože každá analýza je pro celkové hodnocení jinak důležitá, byla vytvořena hodnota koeficientu váhy. Tento koeficient zohledňuje, nakolik je výsledek dané analýzy důležitý v celkovém hodnocení. Koeficientem se násobí body, které jednotlivá řešení dostala. V tabulce (Tab. 28) už jsou uvedeny konečné násobky, jejich součet a pořadí jednotlivých řešení.

Tab. 28 Vyhodnocení nejlepší varianty

|  |                 | Ref. model | Varianta I. | Varianta II. | Varianta III. |
|--|-----------------|------------|-------------|--------------|---------------|
| TYP ANALÝZY                            | KOEFICIENT VÁHY | POČET BODŮ | POČET BODŮ  | POČET BODŮ   | POČET BODŮ    |
| MODÁLNÍ ANALÝZA                        | 0,5             | 2          | 0,5         | 1            | 1,5           |
| STATICKÁ ANALÝZA<br>(MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ) | 0,5             | 0,5        | 1           | 1,5          | 2             |
| TUHOST                                 | 0,8             | 0,8        | 1,6         | 3,2          | 2,4           |
| HMOTNOST                               | 1               | 1          | 2           | 3            | 4             |
| ZTRÁTA STABILITY                       | 0,5             | 0,5        | 2           | 1            | 1,5           |
| POMĚRNÝ ÚTLUM                          | 1               | 1          | 4           | 3            | 2             |
| <b>SOUČET BODŮ</b>                     | =               | <b>5,8</b> | <b>11,1</b> | <b>12,7</b>  | <b>13,4</b>   |
| <b>POŘADÍ</b>                          | =               | <b>4.</b>  | <b>3.</b>   | <b>2.</b>    | <b>1.</b>     |

U modální analýzy získal největší počet bodů referenční model, jelikož se jedná o funkční řešení a tudíž jeho vlastní frekvence jsou brány jako ideální pro daný stroj. Jako druhá byla vyhodnocena varianta III., která měla první vlastní frekvenci nejbližší referenčnímu modelu a na problémovém módu 3 vykázala nejmenší pokles referenční hodnoty. Jako třetí nejlepší byla vyhodnocena varianta II. a následně varianta I.

Maximální napětí v dílci bylo zkoumáno zejména z důvodu bezpečnosti polymer-betonu. Tento materiál je náchylný na vysoká napětí. Všechny varianty ale vykázaly hodnoty nižší, než jsou ty kritické. Nejlepší výsledky vykázala varianta III., která měla o téměř 40% nižší maximální napětí, než referenční model. Následovala varianta II. a poté varianta I. Nejhuře vyšlo napětí u referenčního modelu, jelikož jeho svařovaná konstrukce vytváří možnosti vzniku lokálních špiček napětí.

Z hlediska tuhosti se nejlépe prokázala varianta II. Následovala varianta III., která je výrazně odlehčenější, což je možnou příčinou horšího rozkladu síly a tudíž následně lehce zvýšené deformace. Varianta I. ztratila 2,2% tuhosti v ose Z ve srovnání s referenčním modelem. V ose X a Y byla ale znatelně lepší.

Jedna ze dvou klíčových hodnot této studie je hodnota vlastní hmotnosti dílce. Polymerní beton má znatelně nižší hustotu než ocel, ale vyžaduje využití většího objemu, aby mohla být zachována tuhost a stabilita dílce. Každá z variant vykázala snížení hmotnosti. Varianta I. a II. cca o 10%. Varianta III. byla konstruována speciálně za účelem minimalizace hmotnosti dílce. Díky tomuto přístupu se podařilo snížit hmotnost o 20% proti referenčnímu dílci.

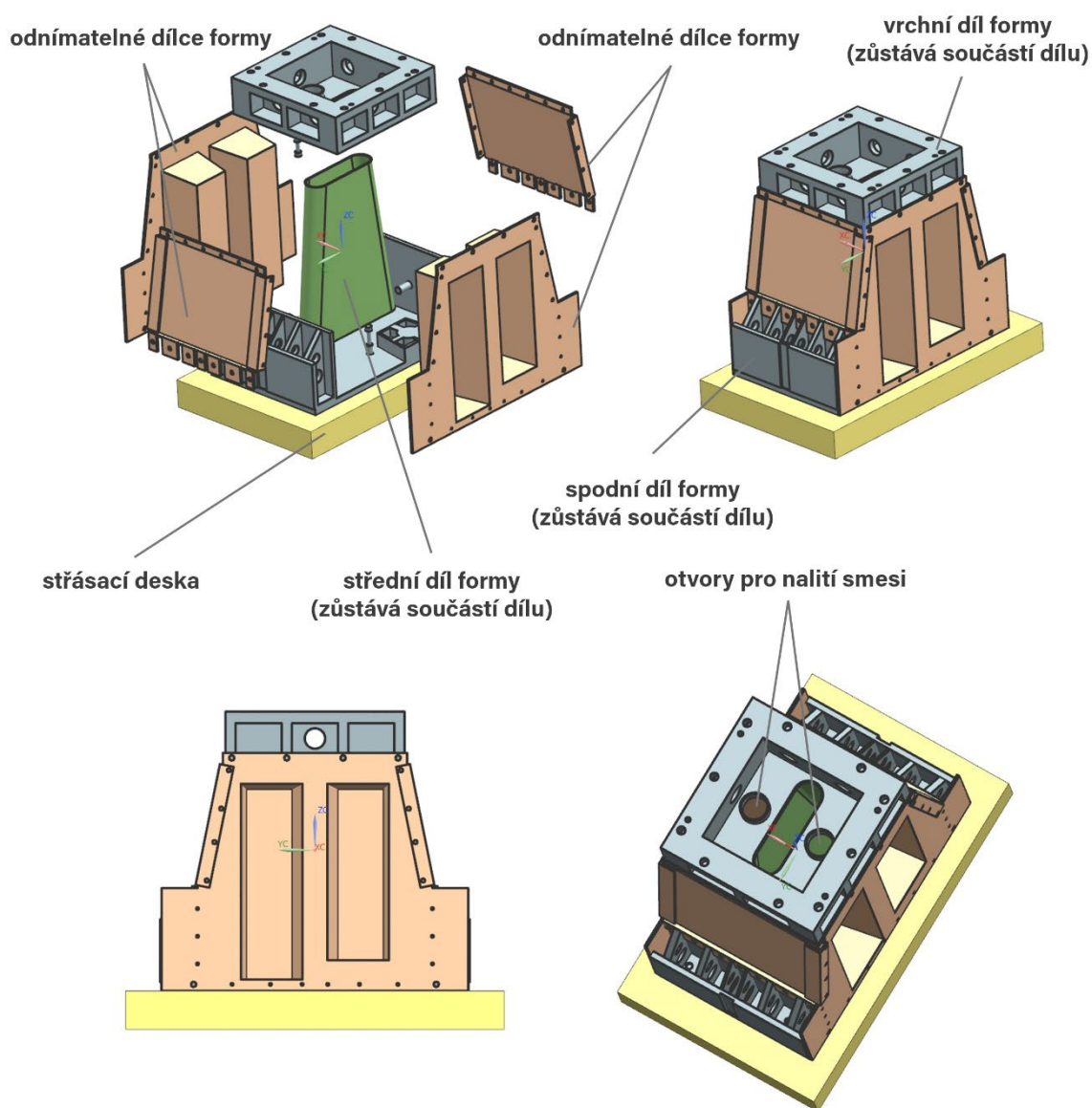
Při analýze ztráty stability se ukázalo, že všechny varianty vykazují značné zlepšení v této oblasti oproti referenčnímu modelu. Nejlépe je na tom varianta I., která vykazuje zlepšení o víc než 50%.

Druhou zásadní hodnotou této studie je poměrný útlum. Díky polymer-betonu, jehož tlumící schopnosti dosahují až 10x lepších hodnot, než které vykazuje ocel, se dalo předpokládat, že nové varianty budou značně lepší, než referenční model. Všechny varianty vykázaly zlepšení o víc než 800%. Dle výsledků nejlépe tlumí varianta I., která má v konstrukci i největší objem polymer-betonu. Následuje varianta II. a varianta III., u které se projevilo snížení objemu polymer-betonu za účelem nižší váhy. Vzhledem k faktu, že všechny varianty jsou vytvořeny jako hybridní struktury, jsou tyto hodnoty velmi dobré. Do výsledku poměrného útlumu nezasahují pouze vlastnosti samotného materiálu, ale také konstrukce dílce a jeho uložení.

Při součtu všech bodů byla vyhodnocena jako nejlepší varianta III.. Tato varianta má zásadně nejnižší hmotnost, jednodušší konstrukci svařenců a také velmi dobré tlumící vlastnosti. Dá se říci, že ve všech ohledech vykázala lepší výsledky než referenční model. Ve srovnání s ostatními variantami vyhrává zejména díky hmotnosti, ale také díky nejnižšímu maximálnímu napětí. V hodnotách útlumu zaostala varianta III. o zhruba 30% za nejlepší variantou. V kontextu referenčního dílu lze stále mluvit o ohromném zlepšení 840%.

## 6 Možná podoba formy nově navržené varianty III.

Z nově navržených variant byla nejlépe vyhodnocena varianta III.. V rámci ukázky možné podoby formy a jejích jednotlivých částí byl vytvořen hrubý model toho, jak by mohla forma vypadat (Obr. 67). Výhodou takto řešené formy je, že by ocelové dílce finálního modelu tvořily její součást. Tím by se snížil počet dalších dílů formy. To by mělo pozitivní dopad jak na obtížnost konstrukce formy, tak na ekonomický aspekt výroby.



Obr. 67 Možná verze formy pro odlití varianty III.

## 6.1 Díly formy

### Odnímatelné dílce formy

Odnímatelné dílce jsou celkem čtyři. Tyto části jsou šroubovým spojem spojeny mezi sebou a současně mezi pevnými díly, které jsou po odlití trvalou součástí hybridního odlitku. Tyto dílce jsou tvořeny jako svařence a jsou uzpůsobeny tak, aby byly po odlití snadno rozebíratelné. Díky těmto součástem se vytvoří požadovaný tvar polymer-betonové části.

### Střední díl formy

Tento díl slouží k vytvoření dutiny, která se táhne celým dílem. Díky tomu se ušetří značná část hmotnosti. Tento díl je trvalou součástí odlitku. Aby vlivem velkého objemu a hmotnosti lité směsi nedošlo k deformaci tohoto relativně tenkostěnného dílu, mohou být využity rozpěrné desky, které budou po odlití a vytvrzení odmontovány.

### Vrchní a spodní díl formy

Tyto díly tvoří část formy, která bude trvalou součástí hybridního odlitku. Vrchní díl má připraveny dva otvory na lití a otvory na odvodu směsi. Spodní díl je uložen na střešací desku, která vlivem vibrací zajistí lepší zabíhavost směsi do všech částí formy a současně vyžene vzduch ven z formy. Vrchní a spodní díl formy jsou současně nejrobustnější díly a fungují jako základny pro montáž dalších dílců formy. Na dílce jsou navařeny kotvící prvky, které umožní lepší propojení svařenců a odlité směsi.

## 6.2 Postup výroby dílu

Pokud je forma vyrobena, může se přistoupit k samotnému odlévání. To probíhá již na střešací desce, kdy během procesu lití je směs vlivem vibrací rozmístěna co nejlépe ve volném prostoru formy. Po kompletním odlití je díl po určitou dobu ponechán v zaformovaném stavu, aby mohl vytvrdnout.

Po vytvrzení se díl odformuje. Dalším krokem po odformování je kontrola, zda směs zatekla všude a odlitek je ve vyhovujícím stavu. Může dojít i na různé detekce odhalující vnitřní nedostatky odlitku. Pokud mimo kosmetických vad na povrchu polymer-betonu nejsou vážné vady jako praskliny nebo pukliny způsobené vlivem špatného odlití, může se dílec přesunout na dokončovací operace.

Jako první je vhodné obrobit ocelové části dílu do finální podoby. Obrobí se tedy všechny plochy na předepsanou přesnost a vytvoří se otvory pro šrouby. Následně dojde k dokončovacím operacím u polymer-betonu. Všechny nedokonalosti na povrchu se buď vybrousí nebo zakryjí. Následně může být nanesena finální vrstva laku.

## 7 Metodika vyhodnocování vhodnosti využití polymer-betonu jako náhrady konvenčních materiálů

Na základě předchozích kapitol lze definovat, kdy je vhodné při konstrukci uvažovat s využitím polymerního betonu. Díky rešerši, části předvýzkumu i samotným výpočtům z výzkumu můžeme celkem obstojně definovat silné a slabé stránky polymer-betonu a určit, kdy je vhodné využít čistě polymer-betonový odlitek, kdy je vhodné vytvořit hybridní strukturu a kdy je naopak lepší zůstat u konvenčního řešení svařenců, nebo odlitků z litiny a oceli.

Při rozhodování by mělo být základní otázkou, zda je pro daný díl přínosné, aby byl vytvořen z polymerního betonu. Pokud je vyžadován od dílu útlum, nízká hmotnost nebo teplotní stabilita, potom je polymer beton vhodnou volbou. Pokud je od dílu vyžadována vysoká pevnost a absorpce dynamických sil, potom by bylo vhodnější zaměřit se na jiný typ kompozitu.

Pokud konstruktér přistoupí na využití polymer-betonu, musí se obeznámit se specifickými pravidly návrhu odlitku, která se musí dodržovat, aby byl díl slévateľný, odformovateľný a dostatečně pevný. Přehled těchto pravidel je uveden v kapitole 3.4.

Při návrhu je nutné uvažovat i nad tím jakým způsobem bude díl zatěžován. Z předchozích kapitol je zjevné, že nejideálnější typ namáhání pro polymer-betonové díly je tlakové namáhání. Nejhorším typem namáhání pro tyto díly je naopak tahové namáhání, kde polymer-beton vydrží jen cca 15 MPa. Tato hodnota se může lišit na základě použité směsi a aditiv.

Vliv prostředí také hraje velkou roli při využití tohoto materiálu. Pokud je využita hybridní struktura (kombinace oceli a polymer-betonu), není vhodné díl vystavovat prostředí, kde se skokově mění teplota s velkým rozsahem. Vlivem rozdílu v koeficientu tepelné vodivosti může dojít v přechodové vrstvě k napětí, které může způsobit nevratné deformace dílu.

V neposlední řadě je nutné zohlednit také ekonomické hledisko. Pokud se jedná o díly tvarově jednoduché, můžeme říci, že cena bude v případě kusové výroby cca podobná jako v případě svařenců a litinových odlitků (kapitola 4.3.4). Pokud budeme uvažovat sériovou výrobu, je možné náklady dokonce snížit. I zde ale mluvíme o obecném předpokladu, protože cena bude dána především konkrétním tvarem dílu, potažmo náročností výroby formy.

## 7.1 Souhrn zjištěných pozitivních a negativních vlastností polymerního betonu, hybridního dílu a konvenčního řešení

### Polymer-betonový odlitek

Uvažujeme-li, že čistě polymer-betonový odlitek obsahuje jen nejnütnější ocelové prvky, jako jsou závitové vložky, manipulační pouzdra a podobně, potom je tento typ odlitku ideální pro využití na měřících strojích, velkých dílech jednoduchých tvarů, nebo jako základ strojů. Výborně se zde dá využít teplotní stabilita, tlumící schopnost a také nízká hmotnost. Je ideální, aby tyto díly byly zatěžovány tlakovým namáháním

Tab. 29 Výhody/nevýhody – polymer-betonový odlitek

| POLYMER-BETONOVÝ ODLITEK          |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| KLADY (Proč využít?)              | ZÁPORY (Proč nevyužívat?)             |
| NEJLEPŠÍ MOŽNÉ TLUMÍCÍ SCHOPNOSTI | VELMI NÍZKÁ PEVNOST V TAHU            |
| NEJVÝZNAMĚNŠÍ SNÍŽENÍ HMOTNOSTI   | NUTNOST OBEZŘETNÉ MANIPULACE (KŘEHKÉ) |
| VÝBORNÁ TEPLITNÍ STABILITA        | NENÍ VHODNÉ DÍL VYSTAVOVAT RÁZŮM      |
| CENA                              | OBRÁBĚNÍ DÍLU JE SLOŽITÉ A NÁKLADNÉ   |
| JEDNODUCHOST TVORBY FORMY         |                                       |
| MOŽNOST NÁLITKŮ A JINÝCH DOPLNĚNÍ |                                       |

### Hybridní odlitek

Hybridní odlitek je ideální kompromis mezi konvenčním řešením a čistě polymer-betonovým odlitkem. Za hybridní odlitek lze považovat součást, která má v polymerním betonu zalité větší ocelové dílce. Tyto dílce vesměs slouží jako výztuha dílu nebo vedení. Čím je větší podíl oceli v odlitku, tím se významně snižují žádoucí vlastnosti polymer-betonu. Projeví se narůstající hmotnost. Následně se snižuje i schopnost útlumu a teplotní stability. Je nutné ke konstrukci přistupovat vhodným způsobem a celý díl navrhnout efektivně tj. využít minimum oceli pro dosažení požadovaných vlastností. Výhodou je následně vyšší tuhost dílu a také rychlejší a levnější dokončovací operace. Řešení hybridního odlitku lze vnímat jako nejideálnější variantu v konstrukci velkých obráběcích strojů vybraných dílců.



Tab. 30 Výhody/nevýhody - hybridní odlitek

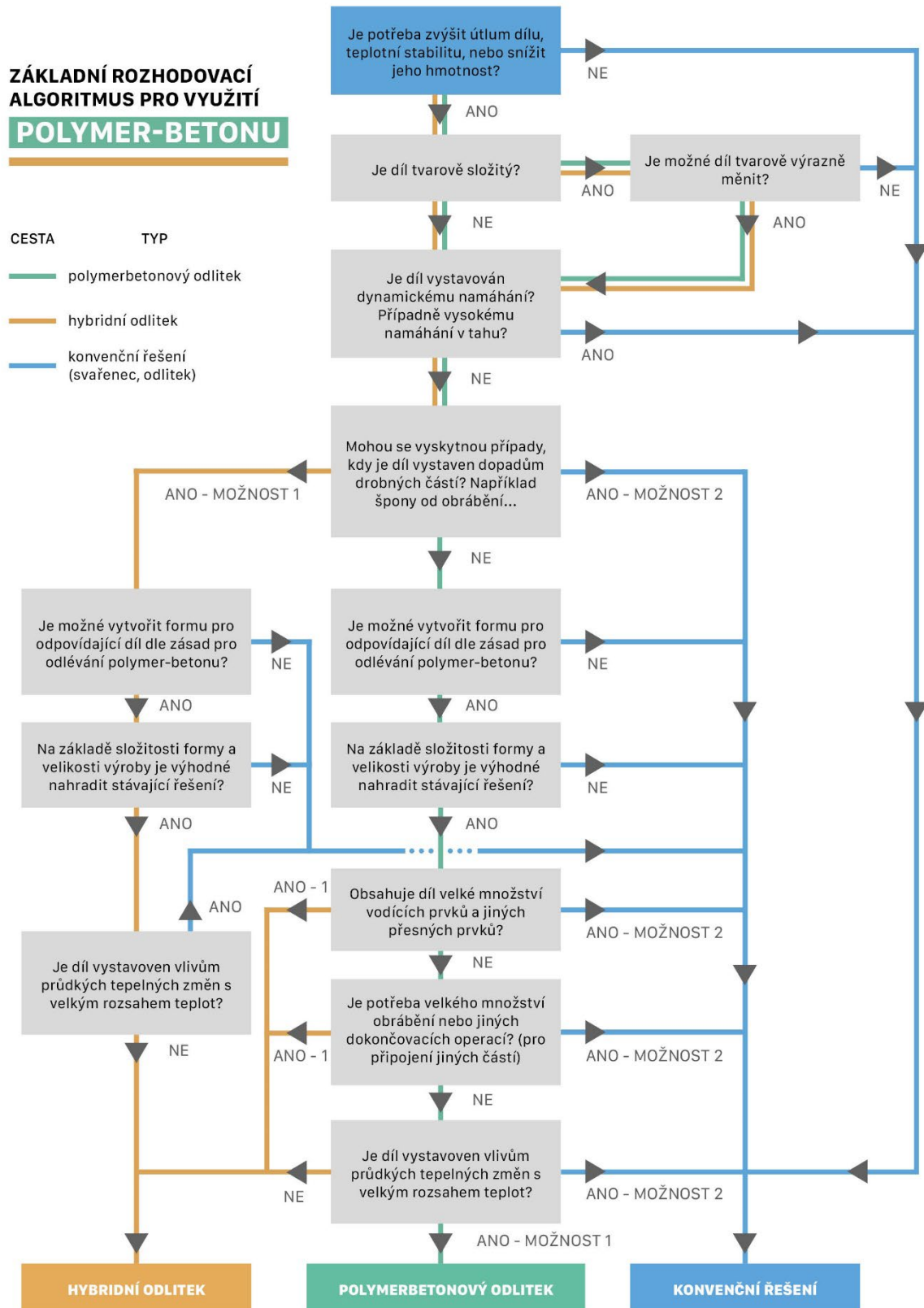
| <b>HYBRIDNÍ ODLITEK</b>                                    |  |
|--|--|
| <b>KLADY (Proč využít?)</b>                                | <b>ZÁPORY (Proč nevyužívat?)</b>   |
| VELMI DOBRÉ TLUMÍCÍ SCHOPNOSTI                             | NÍZKÁ PEVNOST V TAHU   |
| MOŽNÉ SNÍŽENÍ HMOTNOSTI                                    | VÁHA JE VYŠŠÍ NEŽ U ČISTĚ<br>POLYMERBETONOVÉHO ODLITKU                           |
| ZLEPŠENÍ TEPLOTNÍ STABILITY PROTI<br>KONVENČNÍMU ŘEŠENÍ    | NENÍ VHODNÉ DÍL VYSTAVOVAT RÁZŮM   |
| MOŽNOST ZAKOMPO NOVAT OCEL NA MÍSTA<br>NÁSLEDNÉHO OBRÁBĚNÍ | TLUMÍCÍ SCHOPNOST SE SNIŽUJE SE<br>VRŮSTAJÍCÍM POMĚREM OCELI V DÍLU              |
| LEPŠÍ OCHRANA POLYMERBETONOVÉ ČÁSTI                        | MŮŽE DOJÍT K TRVALÝM DEFORMACÍM<br>VLIVEM VELKÝCH A PRUDKÝCH<br>TEPLOTNÍCH SKOKŮ |
| ZVÝŠENÁ TUHOST OPROTI<br>POLYMERBETONOVÉMU ODLITKU         |  |

### Konvenční řešení

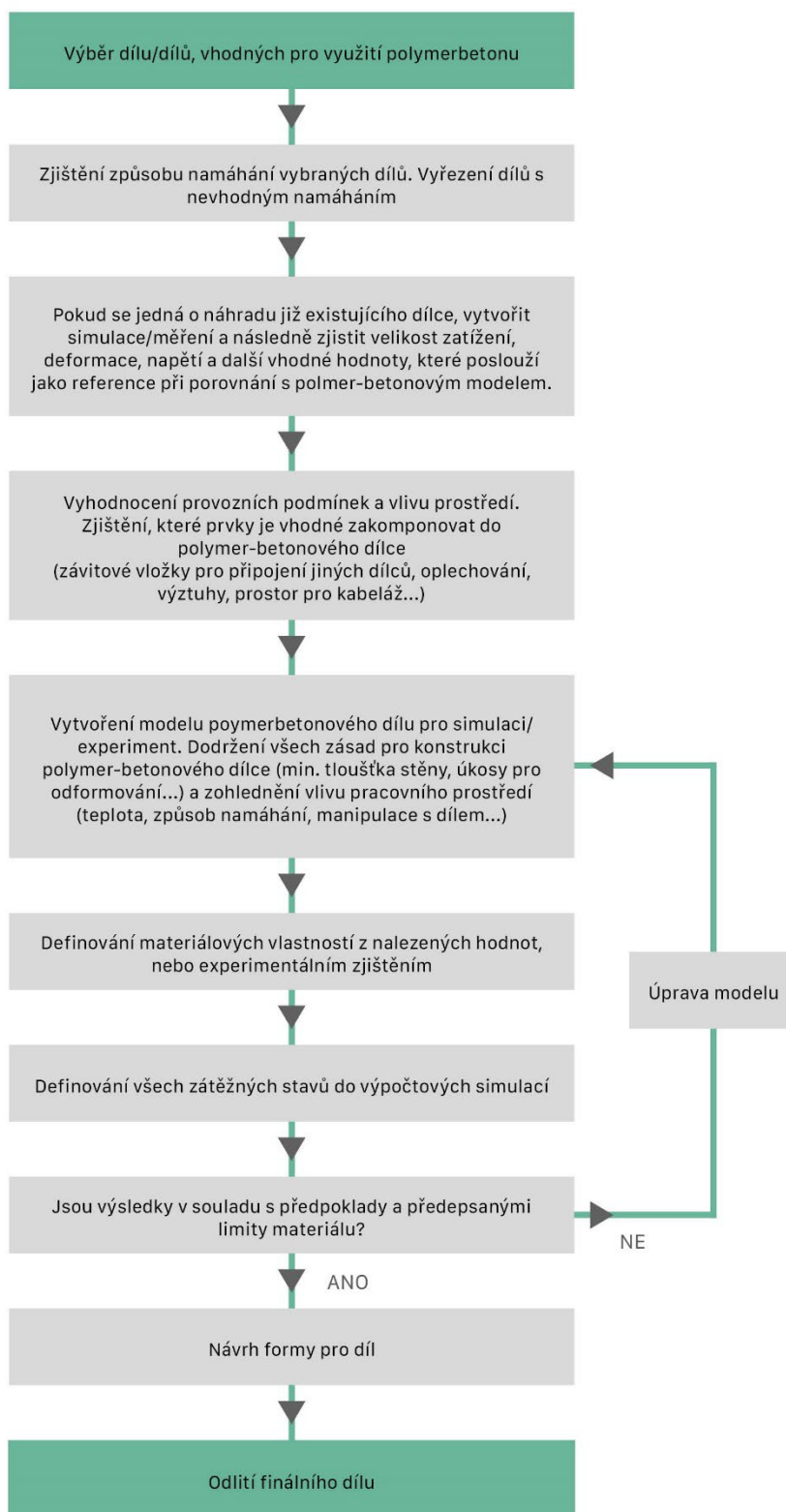
Mezi konvenční řešení lze zahrnout svařence a ocelové/litinové odlitky. Výhody a nevýhody těchto řešení jsou již známé. Tato řešení polymer-beton předčí v oblasti dynamického namáhání a vyšším modulem pružnosti. Naopak lze říci, že konvenční řešení zaostává v úspoře hmotnosti, tlumících schopnostech a v teplotní stabilitě. Aktuálně nelze říci, že je konvenční řešení plně nahraditelné polymer-betonem. Je však možné zkombinovat na vhodných místech tyto varianty a dosáhnout při návrhu stroje nejlepších možných vlastností. Pokud by se v konstrukci začalo uvažovat i s jiným typem kompozitu, mohou se stroje značně posunout ve směru hmotnosti a tlumení, což může umožnit efektivnější a přesnější chod stroje.

Tab. 31 Výhody/nevýhody - konvenční řešení

| <b>KONVENČNÍ ŘEŠENÍ (ODLITKY A SVAŘENCE - OCEL/LITINA)</b> |                                  |
|--|----------------------------------|
| <b>KLADY (Proč využít?)</b>                                | <b>ZÁPORY (Proč nevyužívat?)</b> |
| VYSOKÁ MEZ PEVNOSTI  | NÍZKÁ SCHOPNOST TLUMENÍ          |
| ROZŠÍŘENÉ A ZNÁMÉ VÝROBNÍ PROCESY                          | VYSOKÁ HMOTNOST                  |
| ODOLÁVÁ RÁZŮM  | HORŠÍ TEPLOTNÍ STABILITA         |
| SNADNÉ OBRÁBĚNÍ  |                                  |



Obr. 68 Rozhodovací algoritmus



Obr. 69 Logický postup při návrhu polymer-betonového dílce

## 8 Vyhodnocení výsledků DiP

Cílem této práce bylo získat obecný přehled o technologii minerálních litin a hybridních struktur a předepsat obecná doporučení a postupy pro návrh a konstrukci případných dílů. Práce obsahuje souhrn základních vlastností polymer-betonů, jejich technologii složení a přímé porovnání některých klíčových vlastností důležitých pro konstrukci s kovovými materiály.

V případě polymer-betonových dílů kombinovaných s ocelovými celky (hybridní odlitky), může při prudkých teplotních výkyvech hrozit vznik napětí na přechodu materiálů. Pokud by se takovéto napětí pohybovalo v řádech desítek MPa, může dojít k trvalým deformacím ve struktuře polymer-betonu. Proto byla první část předvýzkumu (kapitola 4.2) zaměřena na tuto problematiku. Bylo zjištěno, že pokud se teploty skokově mění, může dojít ke vzniku napětí, které by mohlo způsobit trvalé deformace. Takto kritické napětí však vzniká až při rozdílu teplot v materiálech okolo 80 °C. Na základě tohoto zjištění vznikl lepší přehled, do jakého pracovního prostředí je vhodné polymer-betonové dílce navrhovat.

Díky spolupráci s firmou Schneeberger, která má s polymerními betony letité zkušenosti, bylo vypracováno několik zásad, které je nutné při konstrukci polymer-betonových odlitků a jejich forem dodržovat. Ve spolupráci s firmou Schneeberger byl vytvořen také model náhrady existujícího lože (kapitola 4.3), kdy bylo hlavním cíle zjistit, zda je reálné aplikovat technologie polymerních betonů na již existující zařízení. To obnášelo zachování základních rozměrů a vlastností. Tento úkol se ukázal pro dané lože jako splnitelný. Z hlediska konstrukce bylo navrženo několik možností zhotovení lože. Všechny uvedené konstrukční možnosti byly navrhovány s ohledem na nabyté znalosti v oblasti technologie odlévání polymer-betonových odlitků. Lože vyrobené z polymerního betonu, by mělo mít zejména výhodu v oblasti dynamických vlastností a také v úspoře hmotnosti. Obecně nejlepším řešením z uvedených možností je, co se výsledných vlastností týká, hybridní polymer-betonové lože. Ekonomické zhodnocení ukázalo, že cena v případě kusové výroby polymer-betonového lože je srovnatelná s cenou výroby z konvenčního materiálu.

Další část této práce porovnává dvě shodná lože velkého soustruhu, která jsou vyrobena ze dvou různých materiálů (litina, polymer-beton). Obě tato lože jsou zatížena shodnými silami a pomocí metody MKP jsou určena maximální napětí a deformace. Protože litinový odlitek je výrazně členitý, musel být model polymer-betonového lože upraven tak, aby odpovídal zásadám pro konstrukci polymer-betonových odlitků. Lože jsou tedy základními rozměry stejná (délka, šířka, výška), avšak v detailech se liší. Po podrobení loží MKP analýze bylo zjištěno, že maximální napětí je díky rozdílnému přístupu v návrhu odlitku u polymer-betonu několikanásobně nižší, než u litinového odlitku. Maximální deformace jsou přibližně stejně velké. Jelikož je namáhání polymer-betonového lože výrazně menší než je dovolené namáhání lože zhotoveného z tohoto materiálu, lze říci, že i v tomto případě je polymer-beton vhodnou alternativou pro využití v konstrukci typově podobných loží.

Hlavní výzkumná část spočívala v náhradě vhodného dílce velkého obráběcího stroje, u kterého by využití polymer-betonu vykazovalo zlepšení vlastností stroje. Na základě

konzultací s kolegy z katedry Konstrukce obráběcích strojů, s kolegy z ČVUT a zástupci společnosti Schneeberger bylo zjištěno, že nejideálnější díl pro náhradu je stojna, která je robustní, tvarově jednoduchá a současně je stojen na tomto stroji velké množství. Tyto aspekty umožní jednoduchou konstrukci formy a sériovou výrobu, což se projeví i po ekonomické stránce. Díl navíc není vystavován dynamickým rázům, tudíž je u něj nejmenší nebezpečí, že by došlo ke znehodnocení polymer-betonového odlitku, který je na dynamické namáhání náchylný. Nejprve byl vytvořen model stávajícího řešení, který byl podroben analýze statického zatížení, modální analýze, zjištění hodnot útlumu, zjištění hmotnosti a zjištění kritické hodnoty ztráty stability. Tyto výsledky byly v další části využity jako referenční. V dalším kroku byly vytvořeny 3 varianty potenciální náhrady. Podmínkou bylo, aby dílec měl stejné nebo velmi podobné základní a přípojovací rozměry. Výsledky analýz jednotlivých variant potom musí předčít referenční model, aby bylo možné uvažovat o nahrazení stávajícího řešení. Po vyhodnocení výsledků se ukázalo, že všechny varianty přinesou určité zlepšení oproti konvenčnímu. Nejlépe byla vyhodnocena varianta III., která přinese zejména vysokou úsporu hmotnosti (až 20%) a proti referenčnímu řešení víc než osminásobné zlepšení útlumu.

Jelikož byly všechny varianty navrženy jako hybridní odlitky, byl vytvořen také hrubý návrh formy pro odlití nejlépe vyhodnocené varianty III.. Na návrhu (kapitola 6) je demonstrována relativní jednoduchost odlití tohoto konkrétního dílce. Výhodou je, že součástí formy jsou i ocelové svařence, které následně zůstávají pevnou součástí odlitku. Díky tomu se nutný počet dílců formy, které jsou po odlití demontovány, sníží. V případě hromadné výroby zde existuje předpoklad, že při vytvoření trvalé formy z oceli, by náklady měly být stejné, nebo dokonce nižší, než při výrobě konvenčního svařence.

Ze všech poznatků nabytých v problematice polymer-betonu a z výsledků simulací bylo možné vytvořit dva diagramy, které v obecné rovině mohou zjednodušit rozvahu, zda polymer-beton využít a ukázat, jak přistupovat k následné konstrukci dílců. První diagram (Obr. 68) nabízí logickou rozvahu, která vede k ideálnímu řešení mezi třemi variantami: Využít polymer-beton, využít hybridní odlitek, nebo setrvat u konvenčního řešení. Součástí kapitoly je také souhrn výhod a nevýhod jednotlivých variant a doporučení pro jejich případná využití.

Celá práce přináší, mimo jiné, souhrn vlastností, pravidel a doporučení, která, pokud jsou respektována, mohou eliminovat chyby v konstrukci polymer-betonových dílců i chybně plánovaná využití tohoto materiálu. Současně je vidět, že tento materiál přináší mnoho zajímavých možností v oblasti konstrukce strojů ať už díky snížení hmotnosti, zlepšení útlumu, nebo díky teplotní a rozměrové stabilitě. Je však nutné, aby konstruktér dobře znal úskalí v podobě napětových limitů materiálu a také navrhl dílec tak, aby zohlednil slévatelnost.

## 9 Směřování dalších kroků zkoumané oblasti

Je zde několik oblastí, které se mohou dále zkoumat a testovat. Velmi zajímavá může být kombinace polymer–betonu s jiným typem kompozitu např. uhlíkovým kompozitem. Tato kombinace by mohla přinést další úsporu hmotnosti, při zachování tuhosti.

Samozřejmostí je oblast zkoumání polymerních betonů z hlediska úprav směsi. Dá se testovat jak poměr plniva, pojiva a aditiv, tak i například vliv velikosti prvků plniva a jeho typ. Pokud by se dokázal najít typ pryskyřice, která umožní zvýšení pevnosti odlitku (zejména při namáhání v tahu), nebo zvýší odolnost proti rázům, může to otevřít dveře k dalšímu využití těchto materiálů.

## 10 Citovaná literatura

- [1] Cortés, F a Castillo, G. *Comparison between the dynamical properties of polymer concrete and grey cast iron for machine tool applications*. Mondragon : Department of Mechanical Engineering, Mondragon Unibertsitatea, 2007.
- [2] Kosnar, Martin a Lašová, Václava. *Závěrečná zpráva projektu 1.2.2*. Praha : ČVUT, 2005.
- [3] Jančář, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003.
- [4] Daďourek, Karel. *Kompozitní materiály – druhy a jejich využití*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [5] Schneeberger. *Schneeberger linear technology*. [Online] Schneeberger, 2017. <http://www.schneeberger.com/products/mineralcasting>.
- [6] RAMPF Holding GmbH & Co KG. [www.mineralguss.de](http://www.mineralguss.de). [Online] RAMPF Holding GmbH & Co KG, 2017. <http://www.mineralguss.de/mineralguss-konstruktion/>.
- [7] Siemens. *Siemens NX 11 Help*. místo neznámé : Siemens PLM Software Inc., 2016.
- [8] Suh, Do, Jung a Lee, Gil, Dai. *Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine*. místo neznámé : Springer Netherlands, 2008.
- [9] Ohama, Yoshihiko. *Recent progress in concrete-polymer composites*. Koriyama : Department of Architecture, College of Engineering, Nihon University, 1998.
- [10] Fowler, D.,W. *Polymers in concrete: a vision for the 21st century*. Austin : International Centre for Aggregate Research, The University of Texas at Austin, 1999.
- [11] Kim, Surk, Hyun, Park, Yeol, Kyul a Lee, Gil, Dai. *A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed*. Taejon : Dept. of Precision Engineering and Mechatronics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1995.
- [12] [metals-china.com](http://www.metals-china.com/cast-iron-CNC-machine-parts-lathe-bed-casting.html). [Online] <http://www.metals-china.com/cast-iron-CNC-machine-parts-lathe-bed-casting.html>.
- [13] [mmspektrum.com](http://firmy.mmspektrum.com/clanek/loze-z-mineralniho-kompozitu.html). [Online] <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/loze-z-mineralniho-kompozitu.html>.
- [14] [mmspektrum.com](https://www.mmspektrum.com/clanek/mineralni-kompozit.html). [Online] <https://www.mmspektrum.com/clanek/mineralni-kompozit.html>.

- [15] *productionmachining.com*. [Online]  
<https://www.productionmachining.com/articles/concrete-reasoning-on-swiss-turning>.
- [16] Smolík, Jan. *Přehled nekonvenčních materiálů a struktur pro stavbu obráběcích strojů*. místo neznámé : Společnost pro obráběcí stroje a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Výzkumné centrum pro strojírenskou a výrobní technologii a techniku, 2007.
- [17] Kubíček, Josef. *Konstrukce a výpočty obráběcích strojů*. Plzeň ŽČU 1994



## 11 Publikační činnost doktoranda

### 1) Seznam prací doktoranda publikovaných (přijatých k publikaci):

- Limberg, L. (80%), & Tančin M. (20%) (2017). Thermal FEM analysis of hybrid structure. *55th International Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2017*. Nový Smokovec
- Tančin, M. (80%), & Limberg, L. (20%) (2017). Modal analysis of composite ram. *55th International Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2017*. Nový Smokovec.
- Drexler, T. (50%), & Limberg, L. (50%) (2016). Modernization of a vibrating machine. *54th International Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2016*. Srní ISBN 978-80-261-0623-4
- Limberg, L. (60%), & Lašová, V. (20%), & Drexler, T. (20%) (2015). Application of Polymer Concrete by Using the MKP Analysis. *53th International Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2015*. Český Krumlov ISBN 978-80-01-05734-6
- Drexler, T. (70%), & Limberg, L. (30%) (2015). Causes and Analzsis of warpage in Injetion Molding. *53th International Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2015*. Český Krumlov ISBN 978-80-01-05734-6
- Kulíšek, Viktor, a další. WP7 – Závěrečná zpráva za rok 2018 (2019). *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE*.
- Kulíšek, Viktor, a další. WP7 – Závěrečná zpráva za rok 2019 (2018). *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE*.
- Kulíšek, Viktor, a další. WP7 – Závěrečná zpráva za rok 2017 (2017). *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE*.

### 2) Přehled vystoupení doktoranda na konferencích:

- Účast na SVOČ 2014, téma: FEM analysis of hybrid structure
- Účast na 53. Mezinárodní konferenci EAN v Českém Krumlově, ČR 2015 téma: Application of Polymer Concrete by Using the MKP Analysis
- Účast na 54. Mezinárodní konferenci EAN v Srní, ČR 2016 téma: Modernization of a vibrating machine
- Účast na 55. Mezinárodní konferenci EAN v Novém Smokovci, Slovensko 2017 téma: Thermal FEM analysis of hybrid structure

3) Další relevantní aktivity:

- Zapojení se do projektu SGS
- Zapojení se do projektu CK – SVT
- Výuka cvičení KKS/CAD-CAE, KKS/ZSVS
- Účast na 2. ročníku kurzu letní školy mechaniky kompozitních materiálů MK 2 v Skalní město v Prachovských skalách; září 2013
- Tvorba výukových brožur na téma výpočty v softwaru Siemens NX řešení nelineárních úloh, pružných prvků a kontaktů v CAE