

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270017  
Konstruování strojů a technických zařízení  
**Studijní specializace:** Konstruování výrobních strojů a zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Konstrukce přípravku pro biaxiální zkoušky za vyšších rychlostí**

**Autor:** Murad Abdurakhmanov  
**Vedoucí práce:** doc. Ing. Václav Kubec, PhD.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Murad ABDURAKHMANOV**  
Osobní číslo: **S20N0068P**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Specializace: **Konstruování výrobních strojů a zařízení**  
Téma práce: **Konstrukce přípravku pro biaxiální zkoušky za vyšších rychlostí**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je zpracování konstrukce přípravku pro biaxiální zkoušky, které by byly realizovány pomocí padostroje při vyšších rychlostech. Tvar zkušebního tělesa bude uvažován pouze jeden tzv. motýlek, který se používá pro kombinované namáhání tahem a smykem. Přípravek bude umožňovat pozicování vzorku alespoň v rozsahu  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , čímž bude pokryta celá kombinace biaxiální napjatosti.

Osnova diplomové práce:

1. Specifikace požadavků, analýza úlohy
2. Konstrukční návrh zařízení
3. Vypracování potřebných výpočtů
4. Komplexní hodnocení navrhovaného řešení

Konzultant: Ing. Ondřej Lukáš

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOSNEDL, S. KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra 1. Praha: Computer Press, 1999
- [2] RUDOLF, B. Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce : vysokoškolská učebnice. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [3] Parsa Hassasroudsari. The equipment for biaxial examination. Plzeň, 2020. *Bakalářská práce*. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Václav Kubec, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **30. listopadu 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych využil této příležitosti k poděkování doc. Ing. Václavu Kubcovi, Ph.D., za jeho vedení, odborné rady a podporu během celého procesu psaní diplomové práce. Jsem vděčný za trpělivost a ochotu, se kterou mi poskytl cenné směrnice. Odborné vedení a rady mi pomohly rozšířit mé znalosti a dovednosti v oboru.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Abdurakhmanov	<b>Jméno</b> Murad	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> doc. Ing. Kubec, PhD.	<b>Jméno</b> Václav	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU – FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukce přípravku pro biaxiální zkoušky za vyšších rychlostí		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	61	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	58	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	3
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Cílem práce je zpracování konstrukce přípravku pro biaxiální zkoušky, které by byly realizovány pomocí padostroje při vyšších rychlostech. Tvar zkušebního tělesa bude uvažován pouze jeden, tzv. motýlek, který se používá pro kombinované namáhání tahem a smykem. Přípravek bude umožňovat pozicování vzorku alespoň v rozsahu 0°–90°, čímž bude pokryta celá kombinace biaxiální napjatosti.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Padostroj, padací buchar, zkušebnictví, rázové zkoušky, biaxiální zkoušky, vzorky motýlek, Arcan apparatus

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Abdurakhmanov	<b>Name</b> Murad	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> doc. Ing. Kubec,PhD.	<b>Name</b> Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Construction of fixture for biaxial examination at higher speeds		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	61	<b>TEXT PART</b>	58	<b>GRAPHICAL PART</b>	3
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of the thesis is to design a fixture for biaxial testing, which would be carried out using a drop weight tower at higher speeds. Only one type of test specimen will be considered, the so-called "butterfly" which is used for combined tension and shear loading. The fixture will allow for positioning of the sample in at least the range of 0°-90°, thereby covering the entire combination of biaxial stress.
<b>KEY WORDS</b>	drop machine, drop hammer, testing, impact testing, biaxial test, butterfly specimens, arcan apparatus.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Rešerše .....	11
2.1	Úvod k rešerši.....	11
2.2	Dynamické zkoušky .....	11
2.3	Biaxiální zkušební zařízení.....	12
2.3.1	Obecné teoretické informace.....	12
2.3.2	Vzorek typu motýlek.....	14
2.3.3	Zkušební zařízení .....	15
2.4	Padostroje .....	19
2.4.1	Rozdělení.....	19
2.4.2	Jednočinný šabotový univerzální padostroj pro zkušebnictví.....	22
2.4.3	Vyráběné padostroje.....	23
3	Specifikace zadání.....	23
4	Varianty konstrukčního návrhu.....	24
4.1	Koncepty konstrukce rámu.....	24
4.1.1	Varianta 1 .....	24
4.1.2	Varianta 2 .....	25
4.2	Koncepty provedení biaxiálního zařízení .....	26
5	Popis konstrukčních elementů.....	26
5.1	Vedení.....	26
5.1.1	Vodící rolny.....	26
5.1.2	Vodící tyče .....	27
5.1.3	Pouzdra.....	28
5.2	Uchopovací element .....	29
5.2.1	Kuličková západka .....	29
5.2.2	Uchopovací element. Nábytkový magnet .....	29
5.3	Tlumení rázu.....	30
5.4	Měření zatížení .....	31
5.4.1	Měření průběhu napětí .....	31
6	Hodnocení konstrukčních návrhů rámu .....	35
6.1	Varianta 1 .....	35
6.1.1	Varianta 1. Revize 1 .....	36
6.2	Varianta 2 .....	36
6.2.1	Varianta 2. Revize 1 .....	37



6.3	Varianta 3 .....	37
6.3.1	Varianta 3. Revize 1 .....	38
6.4	Porovnání konstrukčních řešení rámu .....	38
6.4.1	Bodové ohodnocení variant.....	39
6.5	Závěr.....	39
7	Hodnocení konstrukčních návrhů biaxiálního zařízení .....	40
7.1	Použití stávajícího zařízení .....	40
7.2	Výroba nového biaxiálního zařízení se širokým výběrem úhlů pro upevnění .....	41
7.3	Výroba nového biaxiálního zařízení s jedním úhlem pro upevnění .....	43
7.4	Porovnání konstrukčních řešení zařízení .....	44
7.4.1	Multiaxiální zařízení .....	45
7.4.2	Jednoaxiální zařízení .....	47
7.4.3	Závěr.....	49
8	Pevnostní analýza zařízení .....	49
8.1	Analytické silové výpočty .....	49
8.2	Analytické výpočty vzpěru.....	51
9	Konečný model a jeho analýza.....	52
10	Závěr.....	55
11	Bibliografie.....	56
	Seznam obrázků .....	57
	PŘÍLOHA č. 1 .....	i

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou biaxiálního testování a návrhem vybavení pro biaxiální testování vzorků za vyšších rychlostí, které se pro svou speciální geometrii nazývají „motýlek“. Téma této práce bylo zadáno firmou COMTES FHT v Dobřanech, která zajišťuje výzkum a vývoj v oblasti kovových materiálů.

K získání materiálových charakteristik při dynamickém zatěžování jsou používány různé metody. Každá z nich je použitelná v určitém rozsahu rychlosti deformace a poskytuje specifický druh informace. Výsledkem dynamické zkoušky je obecně závislost vložené energie a výsledného průběhu deformací.

Zařízení Arcan, které je k dispozici ve firmě COMTES FHT, je původní zkušební zařízení, speciálně navržené a vyrobené pro provádění kvazistatických biaxiálních zkoušek. Biaxiální zkouška umožňuje výzkumníkům analyzovat anizotropní chování materiálů. Hlavním cílem biaxiálního zatěžování je analyzovat napěťový stav vzorku, a tím určit, zda je vybraný materiál vhodný pro použití v konkrétním případě.

Cílem této diplomové práce je vytvoření vhodné konstrukce pro biaxiální zkoušky v pracovní komoře padostroje k získání dynamických vlastností materiálů s ohledem na všechny potřebné požadavky pro získání správných výsledků zkoušek. Přípravek bude umožňovat pozicování vzorku v rozsahu  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , čímž bude pokryta celá kombinace biaxiální napjatosti.

## 2 Rešerše

### 2.1 Úvod k rešerši

Nejprve, pro lepší pochopení tématu, se tato kapitola zaměří na biaxiální testování a pak na padostroje. Cílem této části práce je získání informací o:

- dynamických zkouškách,
- padostrojích a historii těchto zařízení,
- biaxiálních zkušebních zařízení,
- rozdílech jednotlivých typů těchto zařízení,
- rozdílech mezi jejich konstrukčními řešeními,
- jejich výhodách a nevýhodách.

### 2.2 Dynamické zkoušky

K získání materiálových charakteristik při dynamickém zatěžování jsou používány různé metody. Každá z nich je použitelná v určitém rozsahu rychlosti deformace a poskytuje specifický druh informace.

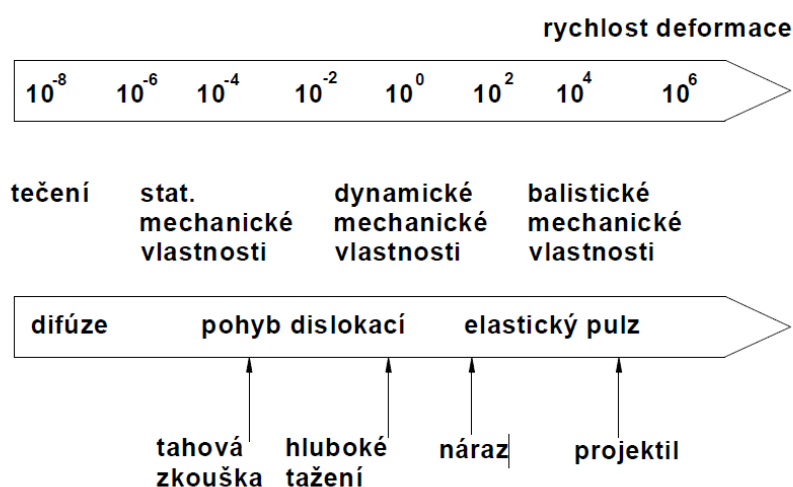
Přehled zkoušek k získání základních materiálových charakteristik v závislosti na aplikované rychlosti zatěžování je uveden na Obrázek 1.

Pro rychlosti deformace, které jsou charakteristické pro tečení, tj. do  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , se bere v úvahu difúzní tok materiálu.

Vyšší rychlosti deformace až do  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  se používají pro stanovení mechanických vlastností při statických zkouškách. Deformační chování materiálu v tomto rozsahu zatěžovacích rychlostí je hlavně popsáno pohybem dislokací a jejich vzájemnými interakcemi.

Rychlosti deformace ležící v intervalu od  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  do  $10^4 \text{ s}^{-1}$  charakterizují dynamické vlastnosti materiálu. Tento rozsah je typický pro automobilové aplikace.

Při dosažení vyšší rychlosti deformace mluvíme už o balistických zkouškách, při nichž se uplatňují elastické napěťové pulzy (1).



Obrázek 1: Rozsahy rychlostí deformace při mechanických zkouškách

Dynamická tahová zkouška se provádí na rychlých trhacích strojích (např. servohydraulický stroj, padostroj), kde snímáme pomocí snímačů průběh zatěžovací síly a prodloužení. Touto metodou můžeme snadno získat dynamické materiálové charakteristiky.

## 2.3 Biaxiální zkušební zařízení

### 2.3.1 Obecné teoretické informace

Obecně lze lom definovat jako proces, při kterém vlivem zatížení vznikají nové povrchy, nebo jinými slovy – materiál se rozdělí na dvě nebo více částí. Mohou být provedena různá dělení z hlediska typu zatížení, energetických a fraktografických aspektů apod.

Pokud jde o zatížení izotropních elastoplastických materiálů, typické pro kovové materiály, vznikají nové napět'ové stavy, které obecně mohou vést k různým reakcím, jako jsou elastické deformace, plastické deformace, nebo dokonce lom. Elastické chování materiálu při zkoušce tahem je charakterizováno Hookovým zákonem. Zde závisí napětí a deformace pouze na Poissonově konstantě a Youngově modulu. Plastické deformace jsou definovány křivkami zpevnění a různé modely plasticity jsou vyjádřeny rovnicemi.

Abychom porozuměli vlastnostem zlomu materiálů, je nutné provádět zkoušky smykové, jednoosé, rovinné a dvojosé. Tyto zkoušky poskytují různé napět'ové stavy. Pro popis problému pružných těles se v mechanice široce používá kontinuální model, který předpokládá, že látky si zachovávají své vlastnosti pro jakýkoli malý objem materiálu. Nezpochybnitelnou výhodou tohoto přístupu je jeho sofistikovaná matematická teorie. Tento model kontinuálního prostředí postačuje v běžné práci, kdy není třeba brát v úvahu strukturu částic skutečných materiálů.

Stav napětí v každém bodě kontinua lze popsat symetrickým tenzorem napětí  $\sigma_{ij}$ . Jedná se o tenzor druhého řádu s pouze šesti nezávislými složkami díky jeho symetrii. Předpokládáme-li, že ve všech směrech jsou materiálové vlastnosti identické (materiál je izotropní), lze napět'ově-deformační efekt z hlediska pevnosti materiálu plně popsat pomocí tří hlavních napětí:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (2).

Autoři zkoumající poškození často používají speciální parametry k popisu stavu napjatosti. Jedním z parametrů je bezrozměrný hydrostatický tlak  $\eta$ , označovaný jako triaxialita. Stav napětí lze popsat pomocí triaxiality napětí a Lodeova parametru. Triaxialita napětí je poměr středního napětí k ekvivalentnímu napětí.

$$\eta = -\frac{p}{q} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{ek}}$$
$$p = -\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}J_1$$

$\sigma_m$  je průměrný hydrostatický tlak, který odpovídá záporné hodnotě hydrostatického tlaku  $p$ . Pro vyjádření definice dalších veličin je nutné vyjádřit invarianty stresového deviatoru:

$$q = \sigma_{ek} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2]} = \sqrt{3}J_2$$

Dalšími parametry jsou normalizovaný třetí invariant napět'ového tenzoru, parametr Lodeho  $\xi$  (v intervalu  $(0 < \xi < [\pi/3])$ ) nebo normalizovaný Lodeho úhel  $\bar{\theta}$  (v intervalu  $-1 < \bar{\theta} < 1$ ), který je definován následujícími rovnicemi. Tento parametr vyjadřuje účinek smykového napětí na počátek poškození.

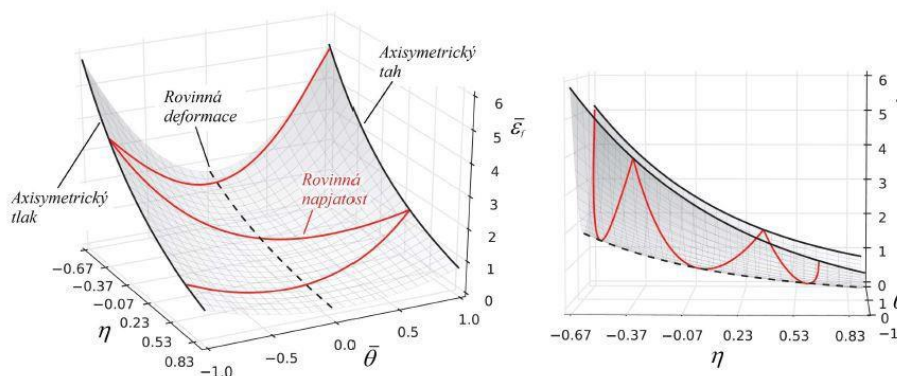
$$\xi = \left(\frac{r}{q}\right)^3 = \cos(3\bar{\theta}) = -\frac{1}{3}J_1 \quad \bar{\theta} = 1 - \left(\frac{6\bar{\theta}}{\pi}\right) = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \xi$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{27}{2}(\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m)} = \sqrt[3]{\frac{27}{2}J_3}$$

Zde  $J_1$  představuje první invariant napětí,  $J_2$  a  $J_3$  představují druhý a třetí invariant. Na základě těchto vztahů může být definován graf triaxiality a Lodeova úhlu související s poškozením tvaru (Obrázek 3). Lomová funkce se tak stává plochou  $\bar{\epsilon}_f(\eta, \bar{\theta})$ . Jedním z modelů popisujících lomovou funkci tímto způsobem je kritérium navržené Baiem a Wierzbickým (2). Jeho model může být vyjádřen ve své finální podobě:

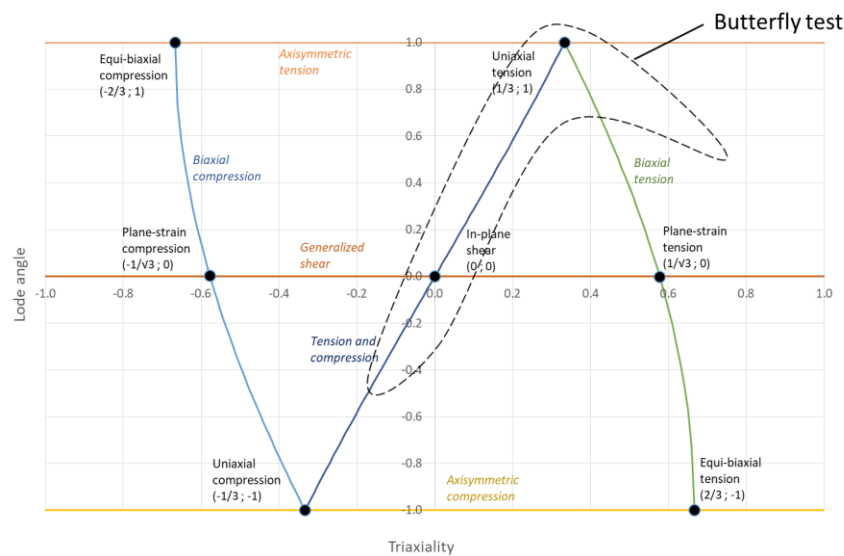
$$\bar{\epsilon}_f(\eta, \bar{\theta}) = \left[ \frac{1}{2}(c_1 e^{-c_2 \eta} + c_5 e^{-c_6 \eta}) - c_3 e^{-c_4 \eta} \right] \bar{\theta}^2 + \frac{1}{2}(c_1 e^{-c_2 \eta} + c_5 e^{-c_6 \eta}) + c_3 e^{-c_4 \eta}$$

Výsledný tvar funkce lomu je znázorněn na Obrázek 2.



Obrázek 2: Všeobecná 3D lomová křivka – Bai–Wierzbicki (2)

Indexy  $c_{1...6}$  lze získat na základě materiálových testů. Jedním z těchto testů je test s motýlovitými vzorky (viz Obrázek 3).



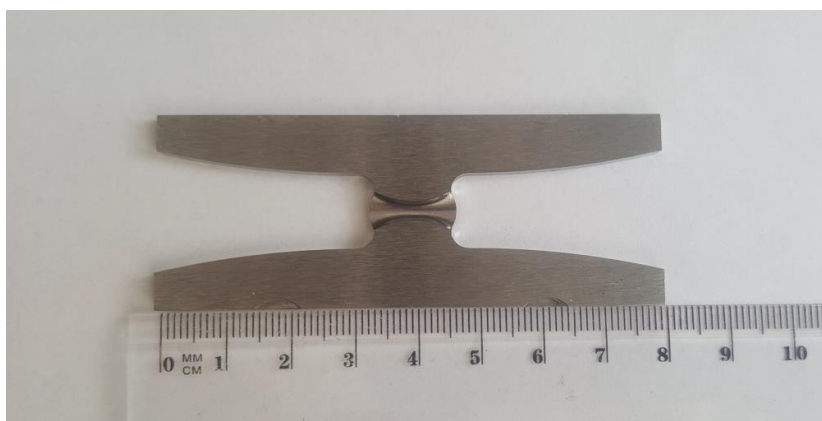
Obrázek 3: Pozice simulovaných mechanických testů v  $(\eta, \bar{\theta})$  prostoru

### 2.3.2 Vzorek typu motýlek

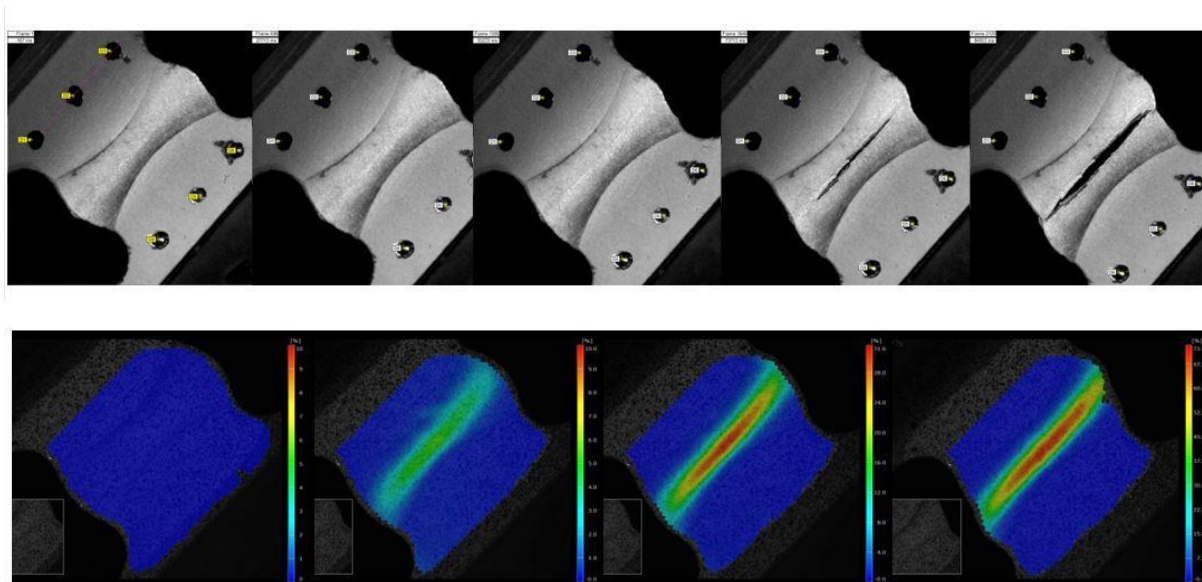
Tvar vzorku typu motýlek byl navržen tak, aby prasknutí nastalo v omezeném malém bodě a zároveň byla široká oblast namáhána napětím v místě vzniku trhliny za různých podmínek zatížení. Dalším faktorem byla možnost popsat stav rovinného napětí pro kombinaci různých napětí, která je v tomto vzorku realizována jako tah, kombinace tahu a smyku, tlak, kombinace smyku a tlaku a pouze smyk.

První generaci vzorku ve tvaru motýla navrhli v roce 2002 Mohr a Henn. Poté druhou generaci navrhli Bao a Bai a třetí generaci opět navrhl Mohr, tentokrát společně s Dunandem.

V současné době se na zařízení v COMTES FHT používá druhá generace navrženého vzorku. Na Obrázek 4 je možné vidět, že oblast měření vzorku zahrnuje speciálně ztavovanou drážku, aby bylo zajištěno, že napětí je umístěno hlavně v centru vzorku (viz Obrázek 5). Aby se výrazně snížila možnost prasknutí na hranici těla, dlouhé ramenní části poskytují dostatečnou úchopovou plochu, což je důležité pro správný přenos zatížení od testovacího zařízení na vzorek. Další vlastností vzorku je významná změna tloušťky mezi ramenem a měřicí částí, což způsobuje, že rameno zůstává během procesu zatížení s minimální deformací.



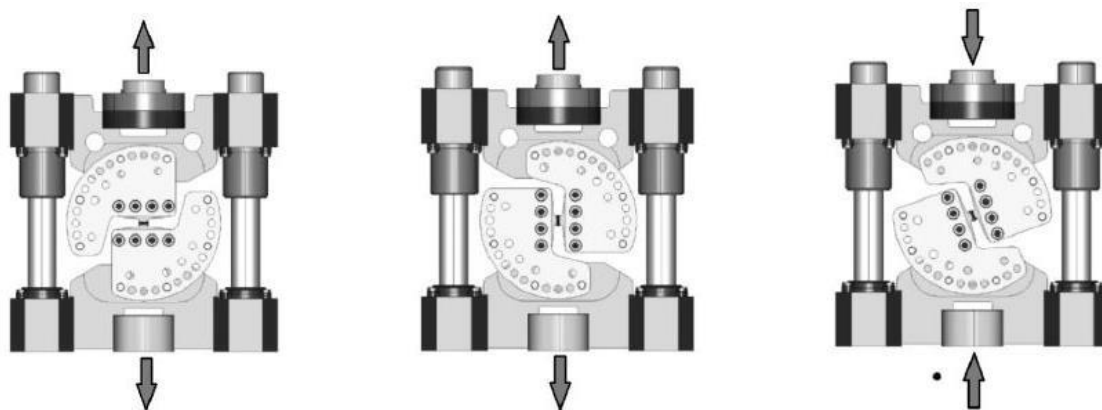
Obrázek 4: II. generace vzorku ve tvaru motýla



Obrázek 5: Videosekvence lomu motýlovitého vzorku (nahore) / Proces místních deformací během testu (dole) (3)

### 2.3.3 Zkušební zařízení

Pro biaxiální zatěžování vzorků typu motýlek ve společnosti COMTES FHT je k dispozici speciální zařízení (viz Obrázek 6). Toto zařízení bylo navrženo tak, aby umožňovalo aplikovat rovinné biaxiální zatížení na vzorek během jednoosého zatížení samotného zařízení. Navržené zařízení umožňovalo vzorkům rotovat o  $10^\circ$  v rozsahu  $0^\circ$  až  $90^\circ$  a dosáhnout různých úrovní napjatosti.



Obrázek 6: Příklad způsobu zatěžování ( $0^\circ$ – $90^\circ$ – $110^\circ$ ) (4)

Toto zařízení bylo navrženo podle univerzálního biaxiálního zkušebního zařízení (UBTD – Universal Biaxial Testing Device) a základní návrh UBTD je inspirován tzv. zařízením Arcan.

Dále v této kapitole budou prezentovány návrhy a principy známého vybavení.

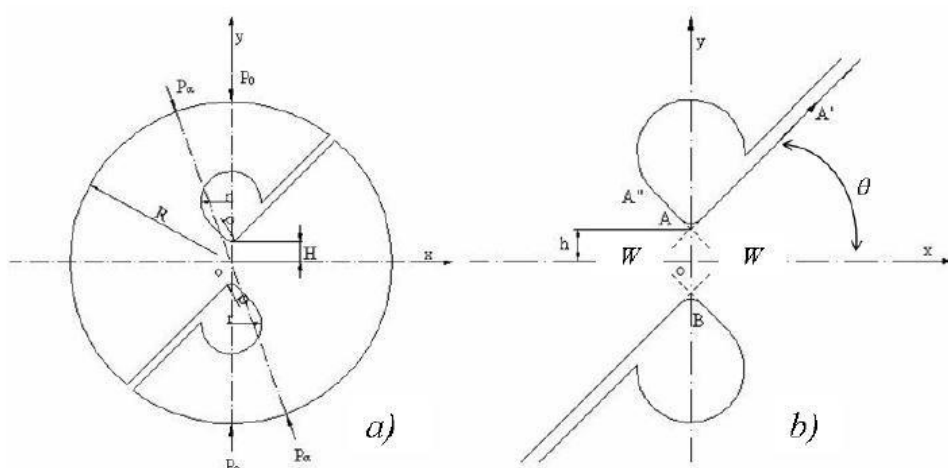
#### *Zařízení Arcan (2)*

Jednoduchý kruhový vyříznutý element byl původně navržen pro charakterizaci elastických vlastností kompozitů s vlákny. Bohužel jeho optimalizovaná geometrie neumožňuje měření s dostatečnou přesností jak pevnosti ve smyku, tak za podmínek porušení za obecného stavu biaxiálního napětí, protože účinky koncentrace napětí na zářezy dvou V-drážek a vnitřní kruhové hrany jsou zodpovědné za předčasné trhliny v důsledku jednoosých napěťových stavů okrajů zářezů.

Metodologie počítá s použitím buď kruhových vyříznutých vzorků podrobených diametrálnímu stlačení, nebo dvojité V-vyříznutých vzorků, také označovaných jako vzorky ve tvaru motýlích křídel, na které jsou testovací zatížení přenášena pomocí speciálního zařízení (Arcanovo zařízení). Oba druhy vzorků mohou v oblasti nejbližší k minimálnímu průřezu dosáhnout téměř rovnoměrného napěťového pole s hlavními napětími opačného znaménka. Dosud byl tento typ testování používán k měření elastických smykových modulů lineárně ortotropních materiálů pro analýzu nelineární odezvy na smyk tlustostěnných pultrudovaných kompozitních nosníků FRP, pro studium smíšené nebo módu II pevnosti v tlaku materiálů a spojů, nebo k analýze jevů lokalizace deformace v buňkových materiálech.

Geometrie Arcanova zařízení byla definována následujícími parametry: tloušťka  $t$ , poloměr vnějšího kruhového okraje  $R$ , poloměr vnitřního kruhového okraje  $r$ , půlválcový úhel drážky ve stupních, poloměr zaoblání zářezu a polovýška  $h$ , kterou by měl minimální pevnostní průřez, pokud by poloměr zaoblání zářezu byl nulový (Obrázek 7). Původní geometrie navržená Arcanem je definována následujícími hodnotami:

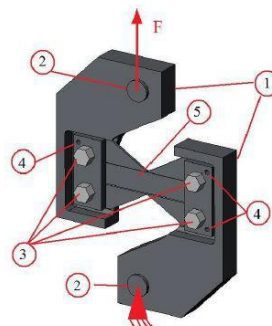
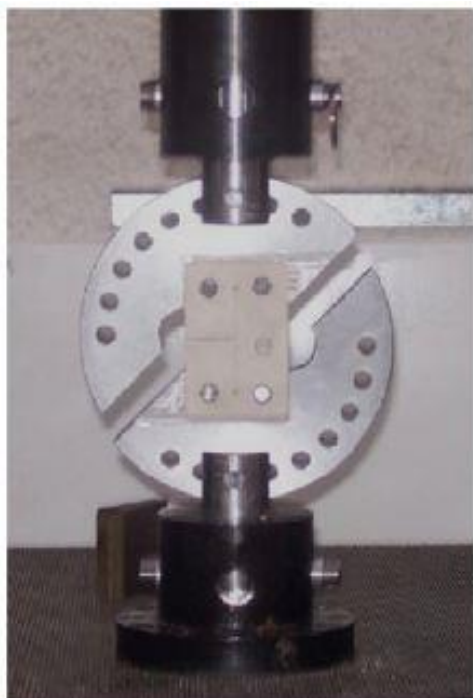
$$h/R = 0.1, r/R = 0.2, r/R = 0.028, q = 45^\circ$$



Obrázek 7: Původní geometrie (2)

Zařízení se v průběhu času měnilo z různých důvodů. První nastavení původního testu se ukázalo vhodné, avšak v některých případech se objevily nežádoucí faktory ovlivňující výkon a výsledky testování. Například, protože vzorek není veden v laterálním směru, malé odchylky od roviny mohou vést k problémům s nestabilitou. Jedním z důvodů modifikace bylo zlepšení zařízení pro lepší řízení rovinného smyku.

Pokud jde o obecný tvar zařízení, obecně je pro vytvoření testovací konfigurace zařízení Arcan tvořeno dvěma identickými částmi. Mezi těmito dvěma polovinami je buď lepen vzorek ve tvaru motýla, nebo jsou spojeny šroubovým spojením v antisymetrickém smyslu.



Obrázek 8: Upravený přístroj Arcan (vlevo) a jeho metoda zatížení (vpravo) (2)



### **Univerzální biaxiální zkušební zařízení (Universal Biaxial Testing Device – UBTD)**

Základní konstrukce univerzálního biaxiálního zkušebního zařízení je inspirována takzvaným zařízením Arcan, zmíněným v předchozí kapitole.

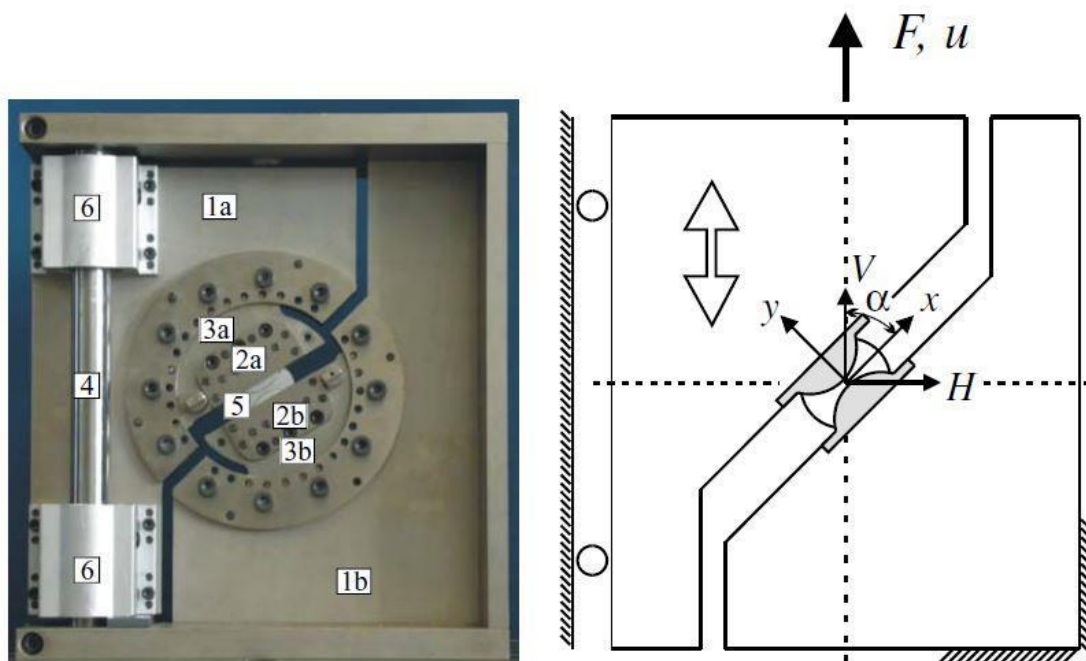
UBTD jsou dražší než jednoosé stroje, především kvůli složitosti rámu zařízení, který vyžaduje více aktuátorů a přidružených zařízení pro provedení testování.

UBTD byl navržen k odstranění problémů nestability a kontroly zařízení Arcan. Později byl též upraven pro různé typy testování, jako například biaxiální testování hliníkových plechů. Na Obrázek 9 je zobrazen přípravek spolu se skicou testovacího zařízení (4).

Testovací přístroj se skládá z pohyblivé a pevné části. Pohyblivá část přístroje [části #1a, #2a, #3a na Obrázek 9] se posouvá svisle podél dvou pevných vodicích tyčí (část #4, druhá tyč je na zadní straně zařízení), zatímco pevná část přístroje (části #1b, #2b, #3b, #4) je pevně spojena se stolem univerzálního testovacího stroje. Takže jediným pohybem povoleným konstrukcí přístroje je posuv pohyblivé části podél svislé osy. Umístěním vzorku (část #5) mezi pohyblivou a pevnou částí lze na ramena vzorku aplikovat řízený posun.

Směr zatěžování posunem je definován orientací vzorku vzhledem ke svislé ose zařízení. Tato orientace, takzvaný biaxiální úhel zatížení  $\alpha$  [Obrázek 9], je před testováním nastavena otáčením držáků vzorku (části #2a, #2b, #3a, #3b). Testy lze provést při jakémkoli úhlu zatížení mezi 0 a 90 stupni. Vzorek je připevněn k přístroji pomocí sady spon (části #2a, #2b). Celková svírací síla přibližně 100 kN je aplikována sedmi šrouby (typ M5-12.8).

Spolu s 200  $\mu\text{m}$  hlubokým vzorem na kleštích vzorku bylo úspěšně zabráněno jakémukoli relativnímu pohybu mezi vzorkem a kleštěmi vzorku. Svislá síla 200 kN je měřena siloměrem na univerzálním zkušebním stroji. Lineární napěťový převodník (LVDT) byl připevněn na zadní straně pohyblivého držáku vzorku (není znázorněn na Obrázek 9), aby byla změřena svislá výchylka. Experimentální měření jsou shrnuta grafem svislé síly proti svislé výchylce pohyblivého držáku vzorku (5).



Obrázek 9: Příklad UBTD a jeho způsob zatěžování (4)

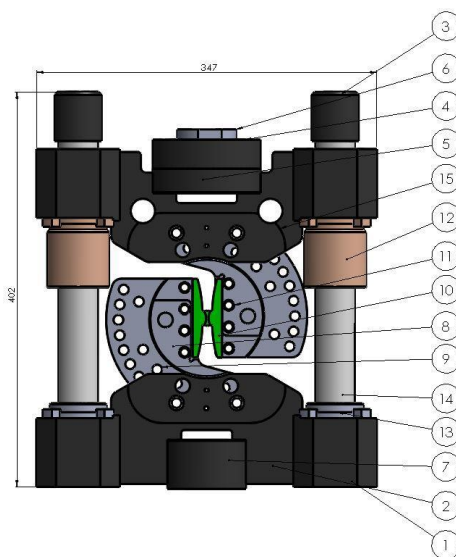
### Zařízení v COMTES FHT

Stejně jako v předchozích případech, bylo i toto na zakázku vyrobené zařízení v COMTES FHT navrženo k aplikaci rovinného biaxiálního zatížení na vzorek během uniaxiálního zatěžování samotného zařízení (viz Obrázek 6). Aplikuje biaxiální zatížení na vzorek a změnou orientace vzorku umožňuje zařízení změnit napěťový stav v různých zatěžovacích případech, které jsou popsány v tabulce níže (Tabulka 1).

Pan Růžička, který se ve své disertační práci zabýval zkoušením materiálu na tomto zařízení, uvádí toto prohlášení z experimentu: „Během testování bylo však zjištěno, že naměřená data jsou značně zkreslena kvůli tření ve vedení (sloupcích)“ (2). Toto zkreslení bylo odstraněno použitím valivého vedení (viz bakalářskou práci pana Hassasroudsariho) (6).

**Tabulka 1. Stavby napětí v závislosti na úhlu vzorku (4)**

Orientace vzorku	Stav napětí
0°	Tah/tlak
30°	Tah+smyk
45°	Tah+smyk
70°	Tah+smyk
90°	Smyk
100°	Tlak+smyk
110°	Tlak+smyk



**Obrázek 10: 3D-model současného zařízení**

1. tělo rámu pro montáž ložisek
2. spodní deska
3. přídavná zarážka
4. kroužek 1
5. kroužek 2
6. matice
7. flanžové příruby
8. uchycovací deska

9. kolík
10. vzorek s testovacím tvarem motýla
11. šroub M10x50
12. hlavice vodicího pouzdra
13. uchopovací svíčka
14. prvky vodicího piliře
15. horní deska

## 2.4 Padostroje

Padostroj pracuje na principu padacího bucharu, proto bude dále vysvětlena historie vzniku bucharu.

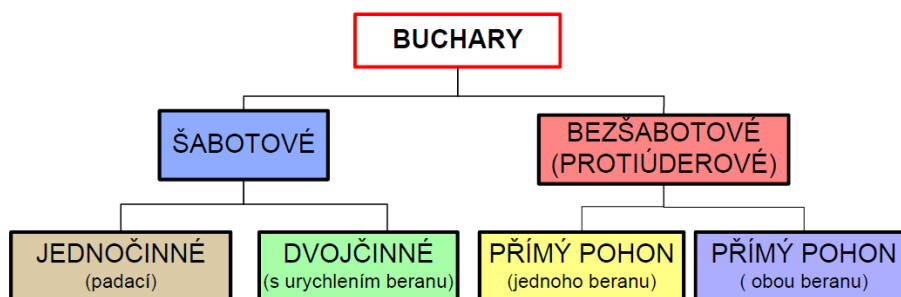
V době bronzové, kdy se lidé učili zpracovávat kovy, bylo nezbytně nutné vymyslet, jak je zpracovávat. To bylo zřejmě impulzem k vytvoření – tehdy nového oboru – kovářství. Tehdejší kovář potřeboval ke své práci dva důležité nástroje, kladivo a kovadlinu. Již tehdy si člověk uvědomoval, že kovadlina by měla být mnohokrát větší než kladivo a měla by být podložena dubovým (či bukovým) špalkem. Později se kovadliny podkládaly pískem a s vynálezem pryže se nyní podkládají pryží.

Již v sedmém století byla spoutána vodní energie a vymyšlen první vodní mlýn, ale až o sedm století později byla tato vodní energie využita pro pohon tzv. vodních hamrů. Jednalo se o jednoduché zařízení, jehož účelem bylo nadzdvihnout kladivo a nechat ho volným pádem spadnout na tvářený kov, který byl umístěn na kovadlině (7).

Princip vodního hamru, tedy využit jinou než lidskou energii ke zdvihu beranu (nahradil kladivo) a nechat jej dopadnout na tvářený materiál umístěný na šabotě (nahradila kovadlinu), je užíván dodnes ve strojních zařízeních nazývaných buchary.

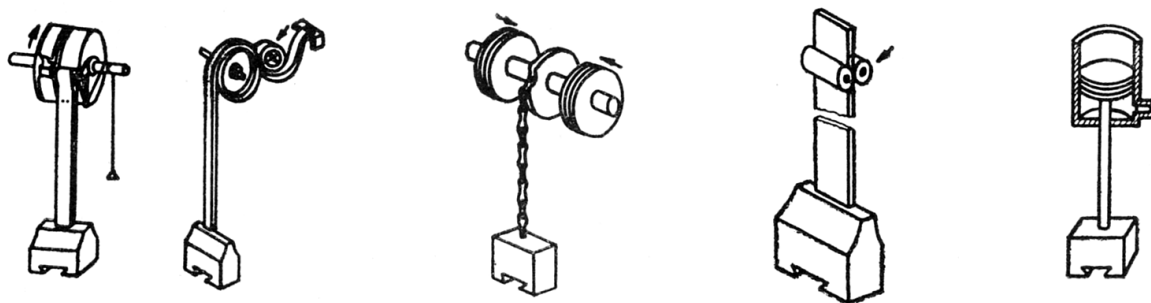
### 2.4.1 Rozdělení

Buchary lze na základě konstrukčního uspořádání rozdělit na šabotové a bezšabotové.



Obrázek 11: Základní rozdělení bucharů (7)

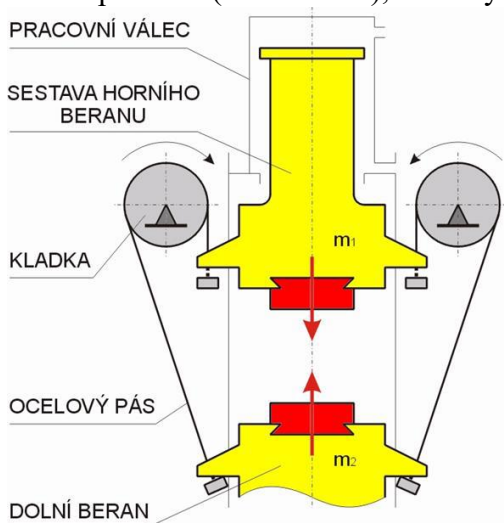
Šabotové buchary se dále dělí podle principu pohonu beranu na jednočinné a dvojčinné. Jednočinné (nebo též padací) buchary jsou takové buchary, které k urychlení beranu využívají pouze volného pádu. Ke zdvihu beranu lze využít konstrukční řešení zvedacího ústrojí uvedená na Obrázek 12. Jsou to (zleva) řemenové, lanové, řetězové, deskové (prknové) a pístové.



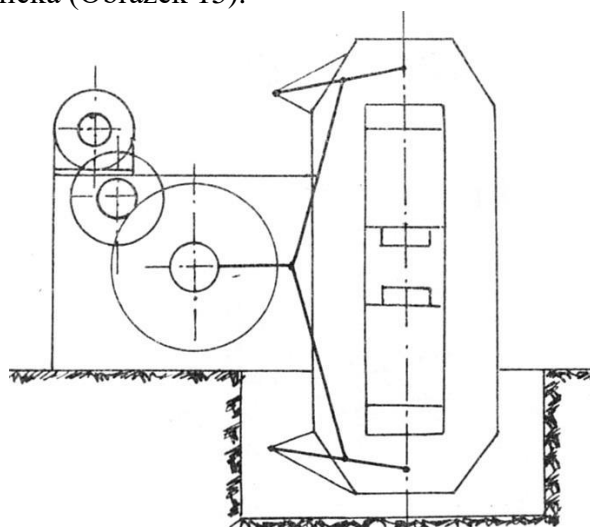
Obrázek 12: Zdvih beranu jednočinných bucharů (7)

Dvočinné buchary se od jednočinných liší v tom, že beran je urychlován při pracovním zdvihu, a padá tedy rychleji, než by padal pouze volným pádem. Tím dosáhne vyšší dopadové energie při stejné hmotnosti beranu. Z tohoto důvodu musí pohon běžet jak při zdvihu beranu, tak při jeho spouštění. Urychlení beranu lze docílit např. za pomoci pružiny, která předepne beran, a ten je při uvolnění vystřelen podobně jako šíp z kuše. Dále lze využít tlaku pracovního média, kterým mohou být např. pára, vzduch, hydraulická kapalina, případně lze využít i expanze pohonné směsi ve spalovací komoře. V neposlední řadě lze využít magnetické síly, nebo kombinaci předchozích řešení (7).

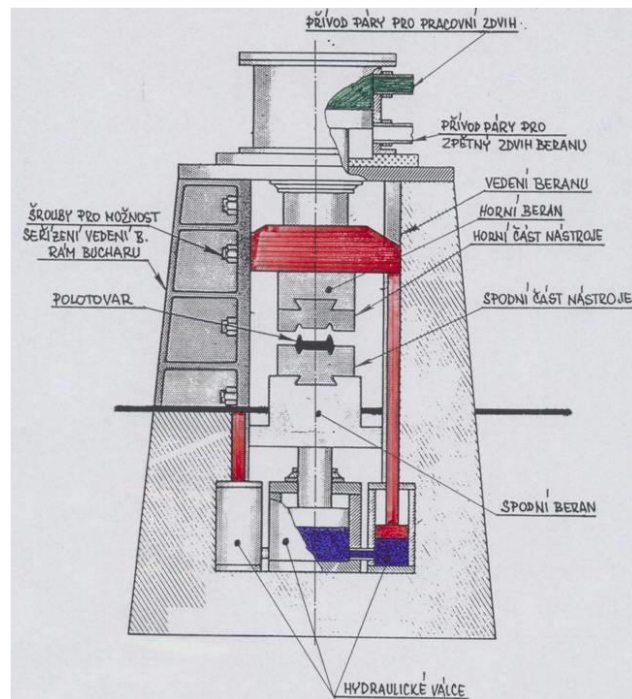
Bezšabotové buchary, jak už z názvu vyplývá, nemají šabotu. Jedná se tedy v podstatě o dva berany, které se pohybují proti sobě, a proto je v literatuře lze najít také pod názvem protiběžné buchary. Rozdělit je lze podle způsobu pohonu beranů na přímý pohon obou beranů a přímý pohon pouze jednoho beranu, jehož pohyb je nějakým způsobem svázán s druhým beranem. Vazba může být mechanická, kdy se využije ocelového pásu (Obrázek 13) či pákového převodu (Obrázek 14), nebo hydraulická (Obrázek 15).



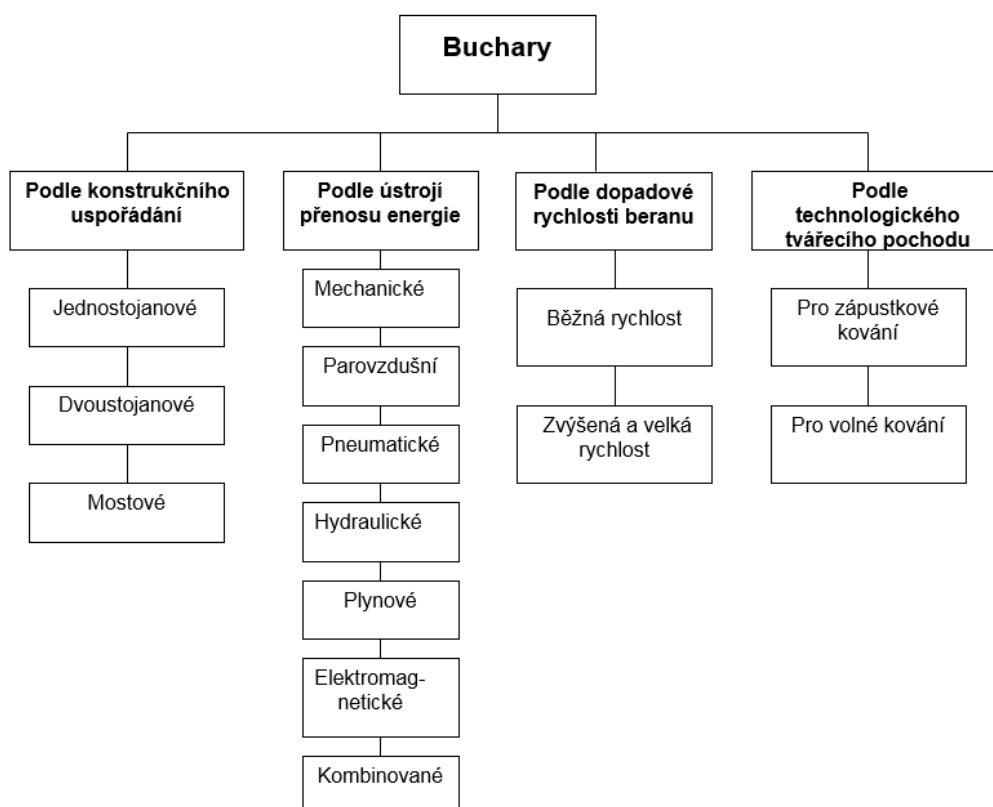
Obrázek 13: Protiběžný buchar s pásovou vazbou (7)



Obrázek 14: Protiběžný buchar s pákovou vazbou (7)

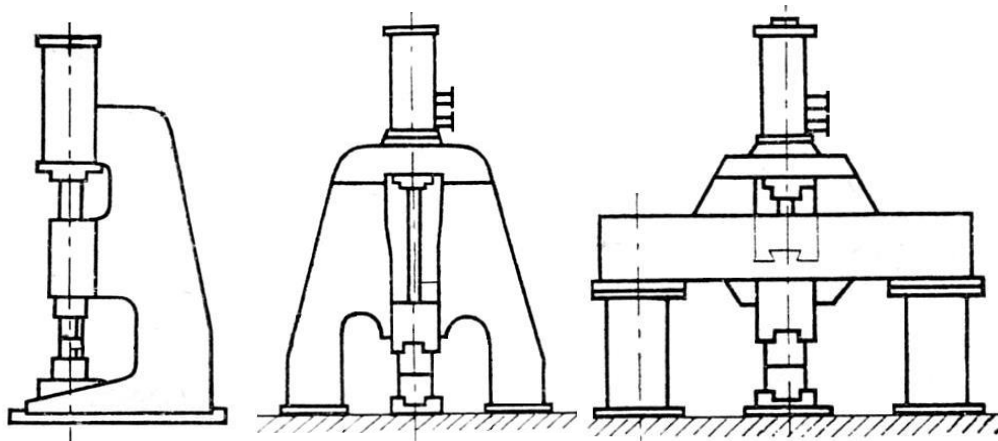


Obrázek 15: Protiběžný buchar s hydraulickou vazbou



Obrázek 16: Rozdělení bucharů

Dále lze dělit buchary podle konstrukčního uspořádání na jednostojanové, dvoustojanové a mostové, jak lze vidět na Obrázek 16. Lze si domyslet, že se budou lišit především v přístupu do pracovního prostoru.

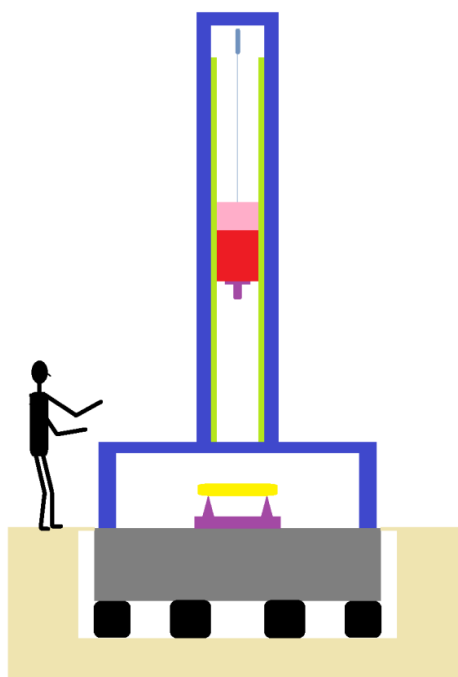


Obrázek 17: Konstrukční uspořádání bucharů – zleva jednojannové, dvoustojanové a mostové (7)

#### 2.4.2 Jednočinný šabotový univerzální padostroj pro zkušebnictví

Padostroj pro zkušebnictví má několik základních částí, jak je možné vidět na Obrázek 18. Červeně je zde znázorněn beran, který je vertikálně veden pomocí vedení (zeleně). Vedení je pevně spojeno s rámem (modře). Beran je držen uvolňovacím zařízením (růžově), které slouží k jeho uvolnění. Samotné uvolňovací zařízení je spojeno s vrchní částí rámu pomocí zdvihacího zařízení sloužícího k vytažení beranu do určité výšky.

Šedivě je znázorněna šabota, která je pevně spojena s rámem. Na šabotě je připevněn přípravek (fialově) sloužící k držení zkušební vzorku (žlutě). Do zkušební vzorku by měl udeřit nástroj (fialově) umístěný na beranu. Celý padostroj je umístěn na tlumicích patkách (černě), čímž je odizolován od vnějšího prostředí, aby se rázové vlny vyvolané dopadem beranu nešířily po okolním prostředí a nepůsobovaly otrěsy jiných strojů v blízkém okolí.



Obrázek 18: Schéma padostroje

### 2.4.3 Vyráběné padostroje

Mezi největší výrobce padostrojů patří například MTS Systems Corporation, ZwickRoell Group, INSTRON, IMATEK a další. Tyto společnosti nabízejí širokou škálu zařízení pro testování materiálů, včetně padostrojů, testovacích strojů pro tahové a tlakové zkoušky, a dalších přístrojů pro testování pevnosti a pružnosti materiálů.

## 3 Specifikace zadání

Ve firmě COMTES FHT se v současné době nachází padostroj Imatek IM10T-30HW, který disponuje následujícími parametry potřebnými pro naše zadání.

Tabulka 2. Charakteristické vlastnosti padostroje

<b>Výška dráhy beranu</b>	od 50 do 3 000 mm, stavitelná po kroku 1 mm s přesností $\pm 2$ mm
<b>Hmotnost beranu</b>	od 8 do 30 kg měnitelná po 1,0 kg s přesností $\pm 0,5$ % <i>(Hmotnost je však také závislá na raznicích, které jsou často přizpůsobeny požadavkům zákazníků, a hmotnost razníků se přičítá k hmotnosti beranu.)</i>
<b>Tlumiče nárazu:</b>	pneumatické absorbéry rázu
<b>Rychlost nárazu:</b>	od 1,0 do 7,67 m s <sup>-1</sup> (volný pád)
<b>Energie nárazu:</b>	od 2,5 do 882 J (volný pád)
<b>Vnitřní rozměry pracovního prostoru</b>	1 200 × 700 × 660 mm

Zkušební vzorek je na tomto padostroji snímán vysokorychlostní kamerou, která umožňuje detailní záznam s maximální snímkovací frekvencí 680 [Hz] a maximálním rozlišením 1 [MPx] do 7 [kHz]. Tento padostroj umožňuje vyvodit potřebnou energii, jak volným pádem beranu, tak předpružením beranu a jeho následným vystřelením. Jedná se tedy o univerzální dvojčinný šabotový zkušební buchar.

Cílem úkolu na základě zadaných vstupních dat je navrhnout zařízení pro biaxiální zkoušku při jednoosém zatížení přípravku. Konstrukce by měla být co nejméně náročná na údržbu, ale přesto splňovat požadavky pro spolehlivé testování. Výměna vzorku by měla být co nejjednodušší a personál by měl interagovat s co nejmenším počtem prvků. Všechny testy budou prováděny v laboratorních podmínkách, což znamená, že nebude vliv agresivního prostředí ani vysokých/nízkých teplot. Konstrukce by měla umožnit správnou funkci vysokorychlostní kamery, tzn. že pohled by neměl být blokován žádnými prvky konstrukce. Také bude realizován pokus o navržení vlastního systému uchycení vzorků.

Také bude zvažován návrh univerzálního biaxiálního zařízení. Bude posouzena vhodnost použití stávajícího zařízení nebo vytvoření nového obdobného zařízení.

## 4 Varianty konstrukčního návrhu

### 4.1 Koncepty konstrukce rámu

Na začátku práce bylo především nutné rozhodnout o obecné koncepci konstrukce a vytvořit schéma pro její objektivní a kvalitativní hodnocení. Vzhledem k tomu, že konstrukce bude použita do padostroje pro dynamické testování, je zřejmé, že bude obsahovat prvek pro ráz beranu, pevnou část a pohyblivou část. Pro diplomovou práci by bylo užitečné se podrobněji zaměřit na konstrukci a navržené řešení, včetně jeho výhod i nevýhod, a zhodnotit jeho efektivitu v praxi.

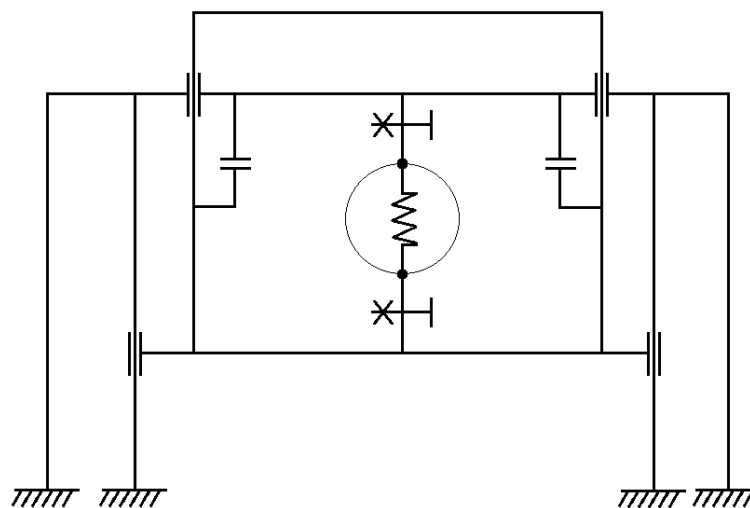
Během úvah a diskusí s vedoucím práce jsme dospěli ke dvěma hlavním typům konstrukce, které jsou zobrazeny níže. V každé z těchto variant se na různých úrovních projevila pohyblivá a statická část konstrukce.

#### 4.1.1 Varianta 1

První varianta je charakteristická tím, že má nepohyblivý rám a pohyblivou desku. K nepohyblivé a pohyblivé části je připevněno zařízení. Pohyblivá deska je řízena vodicími prvky. Rzník přenáší energii z bucharu na dolní pohyblivou desku.

Pro zachycení nadbytečného nárazu a hluku byly použity jednoduché gumové tlumiče, které mohou také prodloužit životnost zařízení.

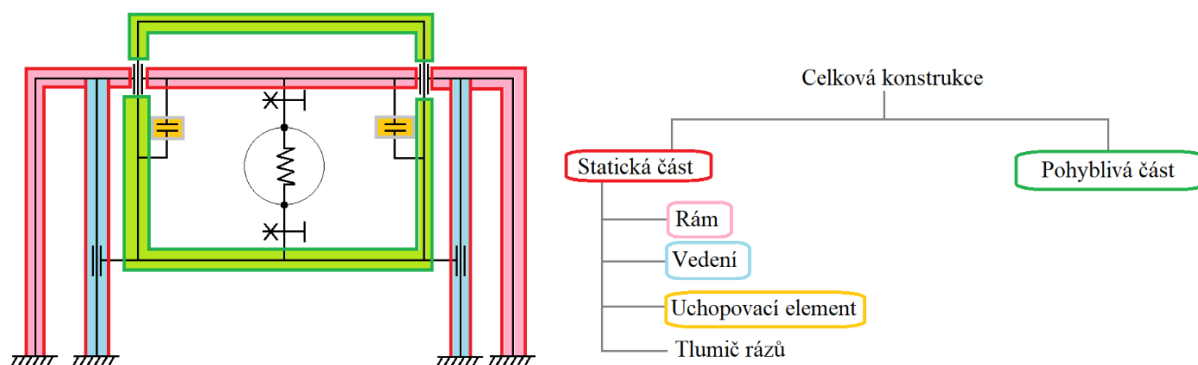
Pro jednoduchou výměnu vzorku byly vytvořeny uchopovací prvky, které budou držet dolní desku v počáteční poloze, ale budou držet pouze váhu desky, aby neměly velký vliv na výsledky experimentů.



Obrázek 19: Schéma koncepce č. 1

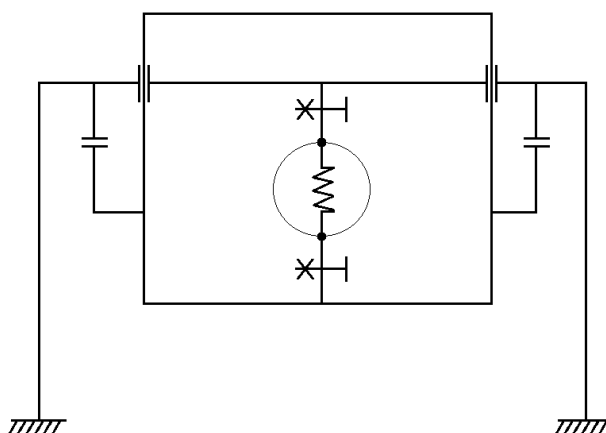


Dole na obrázku jsou zvýrazněny klíčové prvky předpokládané konstrukce.



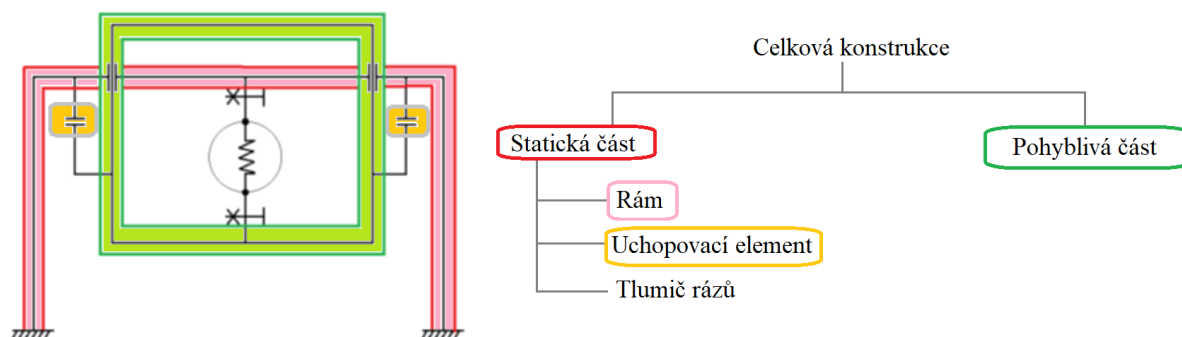
Obrázek 20: Konstrukční struktura č. 1 s vyznačením na schématu

#### 4.1.2 Varianta 2



Obrázek 21: Schéma koncepce č. 2

Druhá varianta je charakteristická tím, že má odlišný vzhled schématu. Jak je vidět ze schématu, chybí zde vodící prvky. Rzník a držák dolní části zařízení jsou jednou konstrukcí.



Obrázek 22: Konstrukční struktura č. 2 s vyznačením na schématu

## 4.2 Koncepty provedení biaxiálního zařízení

Při řešení úkolu upevnění zařízení byly identifikovány čtyři principiálně odlišné způsoby, jak lze řešení uskutečnit:

1. Použít stávající zařízení a nic neměnit.
2. Použít stávající zařízení a přidat upevňovací prvek pro snadnou výměnu vzorku.
3. Vyrobit nové zařízení se širokým výběrem úhlů pro upevnění vzorku.
4. Vyrobit nové zařízení s jedním úhlem pro upevnění vzorku.

Prozkoumáme všechny možnosti a zhodnotíme jejich konstrukční výhodnost.

## 5 Popis konstrukčních elementů

Na základě koncepčních schémat představených v předchozí kapitole lze určit hlavní uzly a prvky, které budou použity v konečné konstrukci. K tomu se pokusíme prozkoumat celou řadu možností, jež můžeme aplikovat a které jsou k dispozici na trhu.

### 5.1 Vedení

Firma T. E. A. TECHNIK s. r. o. se specializuje na dodávky technických komponentů pro lineární vedení, pohony a převody. Disponuje širokým výběrem produktů a velkou knihovnou CAD, kterou můžeme využít.

#### 5.1.1 Vodicí rolny

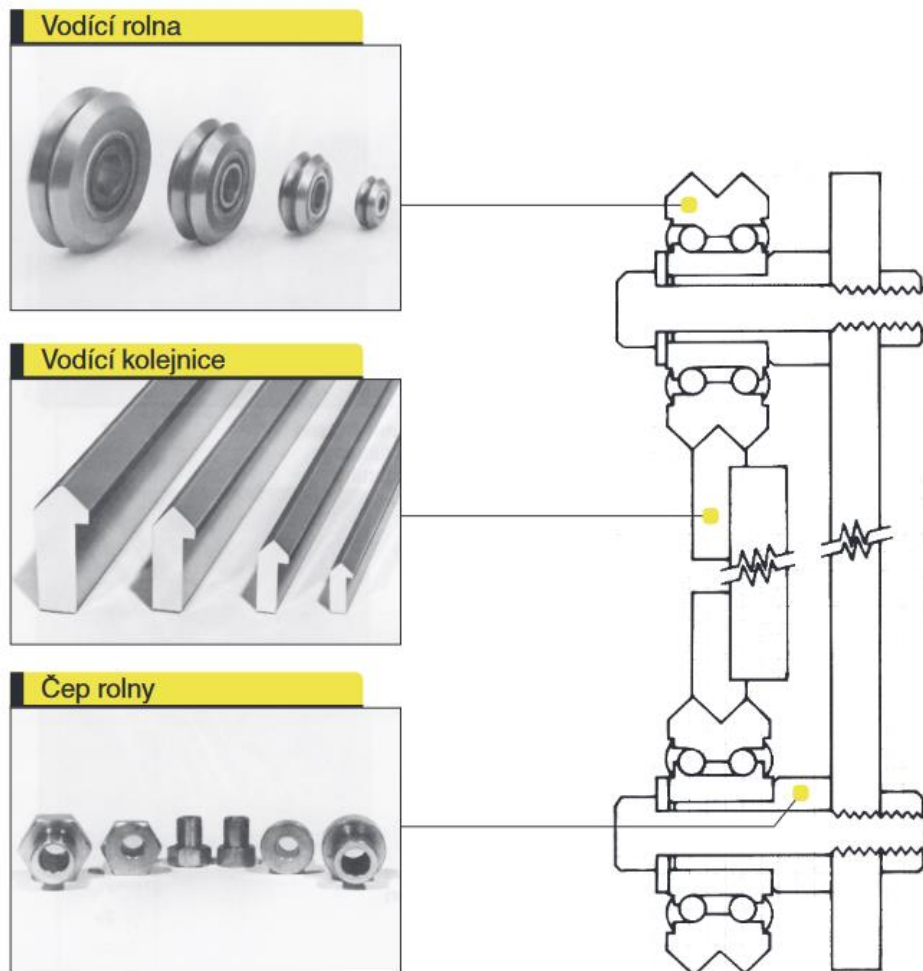
V prvním koncepčním schématu je vedení, které udržuje dolní desku a napravuje přímočarým směrem. To lze provést pomocí lineárního vedení, kde jedním z hlavních prvků jsou rolny.

Rolny ve své konstrukci zahrnují kuličková ložiska. Pro vyšší zatížení jsou kuličková ložiska nahrazena kuželíkovými. Rolny lze rozdělit do tří základních skupin: na podpůrné, přírubové a vodicí rolny. Ty lze ještě pro vyšší variabilitu konstrukce zakoupit přímo s integrovanými čepy, či bez nich. Dále je zde možnost zakoupit excentrické rolny, jejichž pomocí lze vymezit vůli mezi rolnou a kolejnicí, o kterou se rolna opírá. Plochy, které mají kontakt s kolejnicemi, jsou povrchově kaleny.



Obrázek 23: Rolny s čepem – zleva podpůrná, přírubová, vodicí

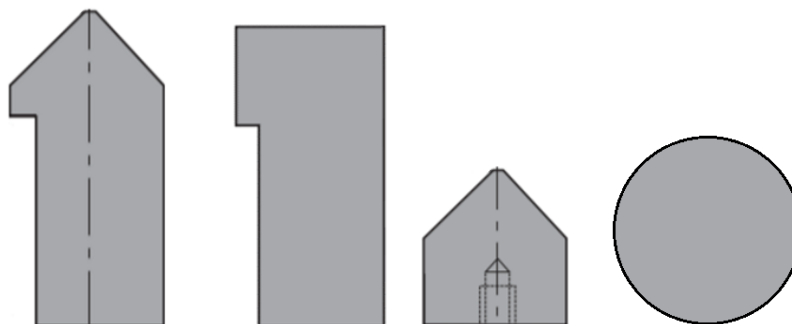
Rolny mají tu výhodu, že mohou od vodicích kolejnic odlehnout, a tak dochází k menšímu opotřebení kolejnic. Dále díky možnosti zakoupení excentrických rolen nejsou tak náchylné na přesnost výroby rámu, který drží kolejnice. Obvyčejná a excentrická rolna se vždy umísťují proti sobě, jak je možné vidět na Obrázek 24. Jejich výměna bude zřejmě snazší, protože nebude vyžadovat demontáž vodicích kolejnic.



Obrázek 24: Popis prvků z katalogu výrobce

### 5.1.2 Vodící tyče

Vodící tyče si lze vybrat celkem ze čtyř druhů, jedná se o kruhové tyče a kolejnice typu MTV, MTP a MPV. Tyto vodící tyče si lze většinou objednat v kalené či nekalené podobě. podle výrobce T. E. A. TECHNIK s. r. o. lze kolejnice vyrobit až do délky 6 400 [mm].



Obrázek 25: Různé tvary kolejnic

Kolejnice, popřípadě kruhové tyče plní svoji vodící funkci společně s vodícími prvky, kterými by mohly být pouzdra, rolny či ložiska.



Obrázek 26. Vodicí kolejnice

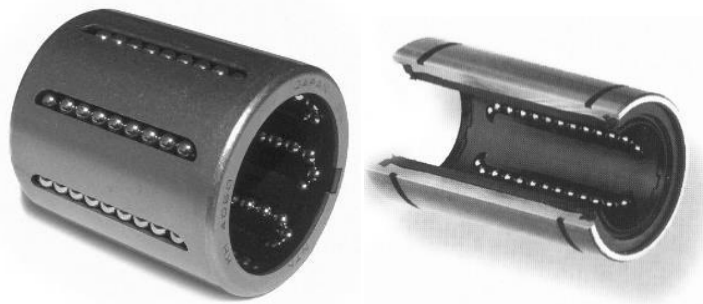
### 5.1.3 Pouzdra

V druhém koncepčním návrhu již není vedení spodní desky, proto je potřebný prvek, který by energii správně směřoval ve svislém směru. Pro tuto úlohu je vhodné pouzdro, které by řídilo pohyblivou část rámu vůči statické.

V zásadě se tato pouzdra dělí do dvou skupin:

- kuličková,
- kluzná.

Tyto dvě skupiny lze ještě dále rozdělit na pouzdra otevřená a uzavřená.



Obrázek 27: Pouzdra kuličková. Uzavřené a otevřené

Kuličková pouzdra se budou ve srovnání s kluznými méně opotřebovávat a budou klást menší odpor při pohybu, avšak kluzná budou mít vyšší únosnost. Uzavřená pouzdra, na rozdíl od otevřených, dokážou přenášet větší zatížení.



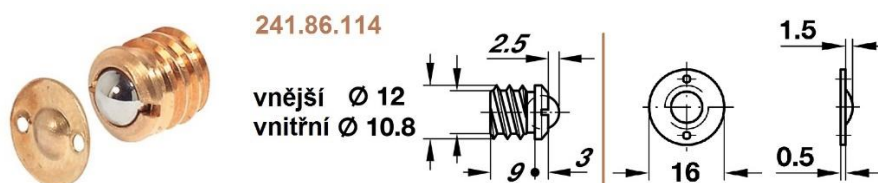
Obrázek 28: Kuličkové pouzdro typu UBM

## 5.2 Uchopovací element

Při přemýšlení a představování práce s konstrukcí vznikla myšlenka udělat výměnu vzorků co nejvíce ergonomickou a pohodlnou. K tomu by bylo nutné mít zařízení, které by udržovalo dolní desku v počáteční poloze. Také by bylo prospěšné, aby hmotnost dolní části konstrukce neměla vliv na vzorek. V případě, že má vzorek extrémně malou pevnost, může mít hmotnostní předpětí pohyblivé desky velmi silný vliv na konečný výsledek.

### 5.2.1 Kuličková západka

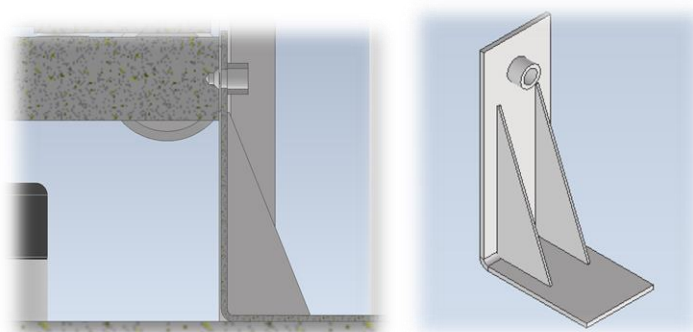
V rámci výběru vhodného uchopovacího prvku pro diplomovou práci bylo zváženo několik možností. Mezi nimi se nacházel běžně dostupný základní prvek pro různé aplikace: kuličková západka k zašroubování, vyráběná firmou Häfele, sídlící v Německu.



Obrázek 29: Vzhled a rozměry kuličkové západky

Materiál západky je mosazný, protikus je z oceli a kulička z chromové oceli. Protiplech je povrchově upraven mosazí, ostatní díly jsou neupravené. Západka se šroubuje do otvoru.

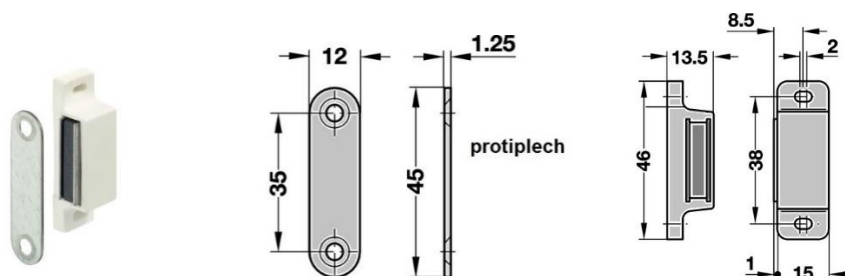
Pro tento prvek lze vymyslet malý detail z plechu a na protilehlé straně desky vyvrtat malý otvor, do kterého bude zapadat kulička.



Obrázek 30: Předpokládaná konstrukce pro západku

### 5.2.2 Uchopovací element. Nábytkový magnet

Jako uchopovací prvek byl zvažován také magnet, konkrétně magnetický uzávěr nábytkový s tahovou silou mezi 3–4 kg, který byl navržen pro přišroubování, a jeho výrobcem je renomovaná firma Häfele se sídlem v Německu. Tento nábytkový magnet nabízel atraktivní vlastnosti, které by byly vhodné pro účely diplomové práce.



Obrázek 31: Uchopovací magnet

Nicméně po pečlivém zvážení a po důkladném posouzení možností padla konečná volba na kuličkovou západku jako optimální uchopovací prvek. Tento prvek byl vyhodnocen jako nejvhodnější pro potřeby diplomové práce, jelikož poskytuje dostatečnou stabilitu a spolehlivost pro požadované uchopení.

### 5.3 Tlumení rázu

Tlumič rázů byl vymyšlen jako sekundární prvek pro zvýšení životnosti, snížení hluku a dalších nežádoucích efektů. K tomuto účelu mohou být použity tlumiče rázů, které zachytí nadbytečnou energii a zastaví pád.

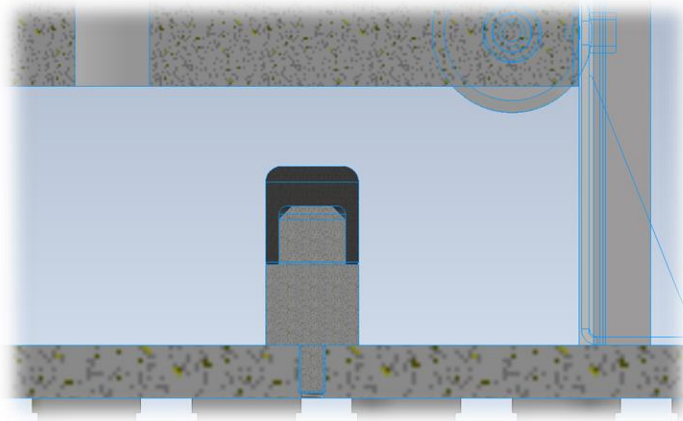
Je nutné zabránit tvrdému dopadu desky do rámu (zamezit tvrdému rázu). Proto by bylo lepší je umístit pod deskou přímo na rám. Tlumiče rázů by měly být rovnoměrně rozloženy vzhledem k těžišti beranu, aby nevznikla žádná excentrická síla.

Je možné použít hotový výrobek, jako je na obrázku níže. Výhodou bude možnost regulace výšky.



Obrázek 32: Tlumič Weforma Mega-Line

Lze také vyrobit tento prvek sám, což bude poměrně snadné na údržbu a výměnu. Bude se skládat ze dvou jednoduchých součástí: gumové podložky a soustruženého kolíku se závitem. Sestavu je možné vidět na snímku obrazovky níže.



Obrázek 33: Snímek modelu tlumiče

## 5.4 Měření zatížení

Jedním z přání zadavatele bylo získání záznamu síly v čase, což je klíčová informace pro zhodnocení chování konstrukce v průběhu provozu. Měření zatížení umožní získat data o skutečných silových účincích a porovnat je s vypočtenými hodnotami. Bude tak možné posoudit přesnost výpočtů. Měření také poskytne cenné informace pro případné budoucí úpravy nebo optimalizace konstrukce.

### 5.4.1 Měření průběhu napětí

Pomocí experimentálních metod pružnosti se vyšetřují velikosti poměrných deformací napětí, posuvů a s těmito veličinami související zatížení, tedy síly, tlaky, točivémomenty atd.

Alespoň stručně budeme charakterizovat každou skupinu metod experimentální pružnosti.

Podle fyzikálního principu máme (8):

#### 1. Elektrické metody

Mezi jejich hlavní přednosti lze počítat vysokou přesnost, citlivost a rychlost měření, a to i při vysokém počtu vyšetřovaných míst. Výstupní signál může být v analogové nebo digitální formě. Za nevýhody počítáme vyšší kvalifikační požadavky na obsluhu a vyšší investiční náklady na měřicí aparaturu. Nejrozšířenější elektrickou metodou je odporová tenzometrie, které bude věnována jedna z následujících sekcí.

#### 2. Optické metody

Jejich aplikace je podmíněna viditelností vyšetřované plochy povrchu. Za jejich největší výhodu lze považovat bezkontaktnost, která však u klasických metod bývá vykoupena náročností vyhodnocení. Moderní optické metody jsou variabilní, použitelné při měření v provozu a umožňují poměrně rychlé vyhodnocení průběhu deformace či napětí na povrchu zkoumaných těles. Vzhledem k velkému uplatnění je i těmto metodám věnována vlastní sekce.

#### 3. Křehké laky

Některé pryskyřice mají nízkou tažnost, proto při aplikaci na povrch po zatížení praskají. Vznikají tak trhliny, kolmé na směr největšího hlavního tahového napětí. Tato metoda je vhodná pro nalezení kritických míst a směrů hlavních napětí na povrchu těles.

#### 4. Ultrazvukové metody

Kromě defektoskopie se tyto metody používají ke stanovení velikosti aplikovaných i zbytkových napětí, ale také k určení elastických konstant materiálu či měření tloušťky.

#### 5. Rentgenografie

Tato metoda je založena na difrakci RTG-paprsků v polykrystalických materiálech. Můžeme jí určit změnu vzdálenosti atomových rovin v důsledku pružných deformací. Používá se zejména ke stanovení zbytkových napětí.

#### 6. Termální emise

Využívá se zde přeměny deformační energie v tepelnou při cyklickém namáhání. Teplotní změny v důsledku napjatosti jsou v tisícinách až setinách stupně Kelvina. Citlivost metody je pro oceli až 1 MPa.

## 7. Hybridní metody

Jedna z nejvýznamnějších skupin metod experimentální pružnosti (elektronické metody) bude podrobněji rozebrána níže. V naší práci bude použito zařízení pracující na tomto principu k pozorování změn napětí během experimentů.

### 5.4.1.1 Základy odporové tenzometrie

Tenzometrické metody jsou založeny na měření změny vzdálenosti dvou bodů tělesa v důsledku změny jeho zatížení (9). Čidla, která umožňují tato měření, se nazývají tenzometry. Podle fyzikálního principu měření a dalšího zpracování naměřené veličiny lze základní typy tenzometrů rozčlenit na tenzometry:

- mechanické,
- mechanicko-optické,
- strunové,
- pneumatické,
- fotoelasticimetrické,
- elektrické aj.

Největší uplatnění mají v dnešní době elektrické tenzometry, které lze dále rozdělit na:

- indukční,
- kapacitní,
- odporové.

Z nich se nejvíce používají elektrické odporové tenzometry.

### 5.4.1.2 Elektrické odporové tenzometry

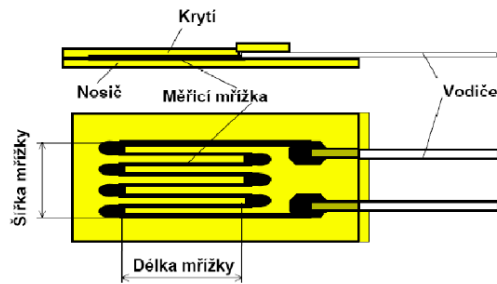
Princip měření pomocí elektrických odporových tenzometrů je založen na závislosti změny elektrického odporu vodiče na jeho mechanické deformaci.

Podle druhu odporového materiálu lze tyto tenzometry rozdělit na:

- uhlíkové,
- polovodičové,
- kovové,
- drátkové,
- fóliové.

Nejpoužívanější jsou fóliové tenzometry. Ty jsou zhotoveny fotochemickým způsobem podobně jako plošné spoje z konstantanové anebo chromniklové fólie tloušťky 5 až 15  $\mu\text{m}$ . K jejich výhodám oproti drátkovým tenzometrům se řadí snadnější výroba tvarově složitějších snímačů, lepší odvod tepla, což umožňuje zvýšené proudové zatížení tenzometrů, a tím i zvýšení jejich citlivosti a menší příčná citlivost. Příklad fóliového tenzometru je uveden na obrázku.





Obrázek 34: Fóliový tenzometr

#### 5.4.1.3 Princip měření elektrickými odporovými tenzometry

Ohmický odpor vodiče  $R$  v závislosti na jeho délce  $l$ , ploše průřezu  $S$  a měrném odporu

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Uvažujeme-li všechny tyto veličiny během deformace jako proměnné, pak pro totální diferenciál funkce platí

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS$$

Z těchto rovnic plyne vztah

$$dR = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

Pro určitou konečnou změnu odporu  $R$  a po dílčích úpravách můžeme rovnici přepsat na tvar

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon,$$

kde  $\varepsilon$  je poměrné prodloužení, veličina  $k$  se nazývá deformační součinitel (příp.  $k$ -faktor) a je jí nutno určit experimentálně cejchovním měřením. Pro většinu běžně dostupných tenzometrů bývá  $k \sim 2$  a pro jejich výrobu se používají materiály, pro něž je tento  $k$ -faktor konstantní ve velkém rozsahu deformací.

#### 5.4.1.4 Představení tenzometrů na trhu

Na výrobu tenzometrů a dalších prvků pro zkušební stroje se zaměřují různé firmy. Zde jsou uvedeny nejvýznamnější společnosti, které se specializují na výrobu tenzometrických snímačů na trhu.

- **HBM.** Německá společnost HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) byla založena v roce 1950 a od té doby se stala jedním z předních výrobců snímačů a měřicích systémů na světě. HBM nabízí širokou škálu snímačů, včetně tenzometrických, které se používají pro měření deformace a napětí. Tyto snímače jsou obvykle používány v průmyslových aplikacích, jako jsou například testování materiálů, testování pevnosti konstrukcí nebo výroba vozidel.
- **Vishay Precision Group.** Americká společnost Vishay Precision Group vyrábí širokou škálu vysokopřesných snímačů, včetně tenzometrických. Tyto snímače se používají především v průmyslových a vědeckých aplikacích, jako jsou například laboratorní testování, měření tahu a napětí nebo testování materiálů.

- **Flintec.** Britská společnost Flintec se specializuje na výrobu váhových snímačů a měřicích systémů, včetně tenzometrických snímačů. Tyto snímače se používají především v průmyslových aplikacích, jako jsou například váhy pro dopravníky, křídlové váhy pro vozidla nebo váhy pro přesné dávkování.
- **Minebea Intec.** Německá společnost Minebea Intec nabízí širokou škálu váhových snímačů a měřicích systémů, včetně tenzometrických snímačů. Tyto snímače se používají především v průmyslových aplikacích, jako jsou například váhy pro potravinářský průmysl, zdravotnictví, výrobu energie nebo chemický průmysl.
- **Zemic.** Čínská společnost Zemic je největším výrobcem váhových snímačů a měřicích systémů v Číně, včetně tenzometrických snímačů. Tyto snímače se používají především v průmyslových aplikacích, jako jsou například váhy pro výrobu potravin, váhy pro dopravníky nebo váhy pro stavebnictví.

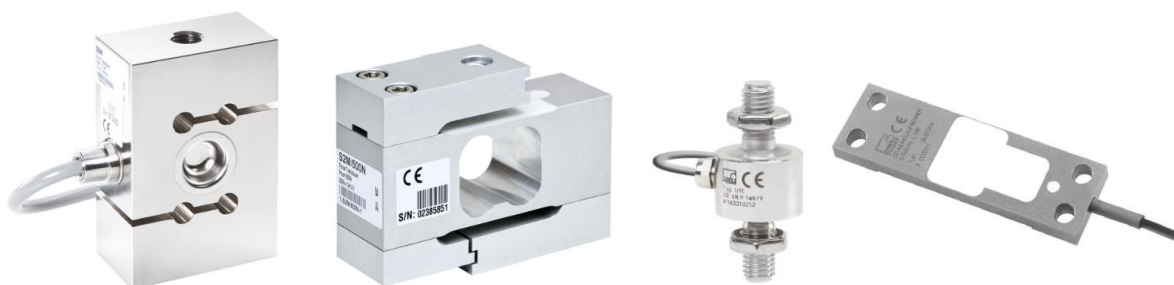
Pro svou diplomovou práci jsem si zvolil výrobce tenzometrů HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), protože nabízí širokou škálu produktů s různými rozsahy zatížení, rozmanitý výběr CAD-modelů a také různé konstrukční provedení (formy) tenzometrů. Toto rozmanité konstrukční provedení umožňuje výběr optimálního tenzometru pro různé aplikace, což je pro mou diplomovou práci velmi vhodné.

Forma tenzometru (S-tvar nebo válcový tvar) závisí na konkrétním využití a podmínkách provozu.

Válcové tenzometry se obvykle používají v případech, kdy je třeba měřit sílu pouze v jednom směru a kdy je požadována vysoká přesnost měření. Často se také používají pro měření tlaku, stlačení a napnutí v materiálech s vysokou pevností.

S-tvarové tenzometry jsou na druhé straně určeny pro měření síly v obou směrech (např. stlačení a napnutí), což je užitečné pro měření sil v reálných podmínkách, kde se síla může působit v libovolném směru. To také zajišťuje širší rozsah měření a větší flexibilitu v konstrukci a použití.

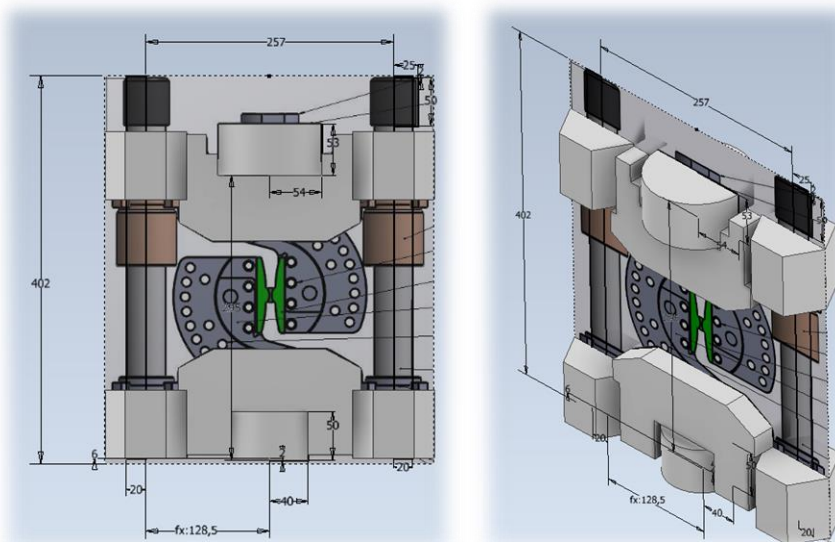
V obou případech je výběr formy tenzometru závislý na konkrétních požadavcích a podmínkách provozu přístroje. Také musíme vzít v úvahu, že válcové tenzometry jsou odolnější vůči bočním odchýlkám než tenzometry ve tvaru S.



Obrázek 35: Různé varianty provedení tenzometrů od společnosti HBM

## 6 Hodnocení konstrukčních návrhů rámu

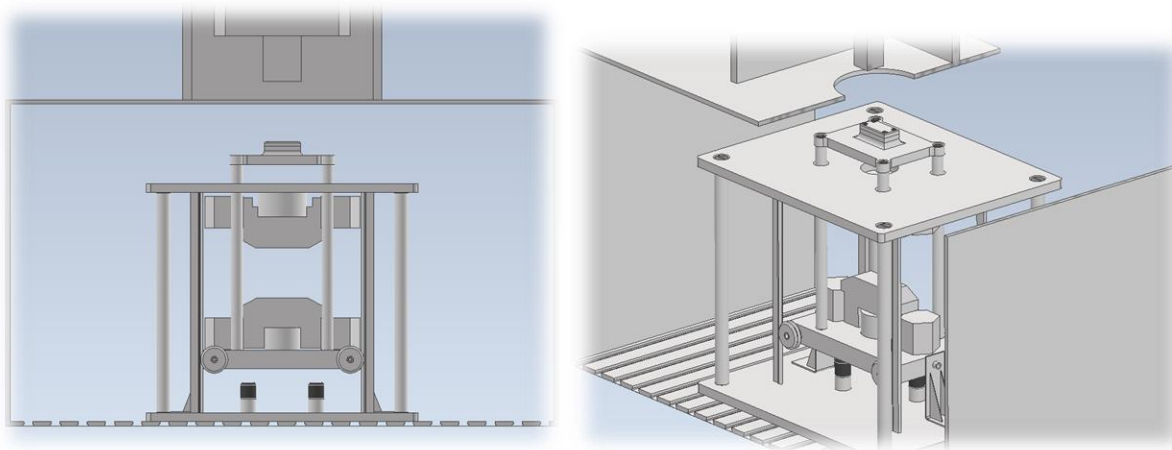
V rámci projektu bylo vytvořeno v CAD speciální pracoviště pro správnou analýzu rozměrů a porozumění proporcím biaxiálního zařízení. Toto pracoviště bylo nezbytné pro přesné měření a získání potřebných dat. Pro návrh zařízení byl využit náčrt s přesnými rozměry, který byl následně importován do programu Autodesk Inventor. Tato metoda umožnila přesnou a rychlou tvorbu modelu zařízení, což bylo nezbytné pro úspěšnou realizaci projektu.



Obrázek 36: Model zařízení s použitím náčrtu

### 6.1 Varianta 1

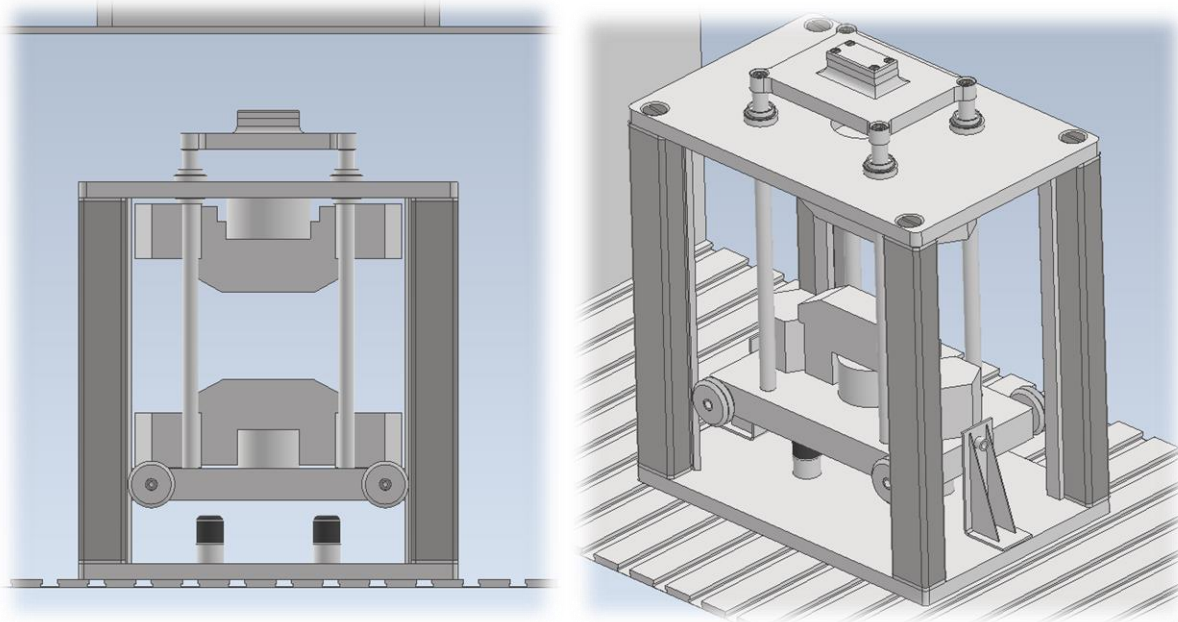
Na základě koncepčního návrhu a výběru prvků z katalogů byla vytvořena předběžná verze prvního modelu konstrukce. Tento model umožňuje vizuální hodnocení ergonomie a estetických vlastností.



Obrázek 37: 3D-model varianty 1 – pohled zepředu a izometrie

### 6.1.1 Varianta 1. Revize 1

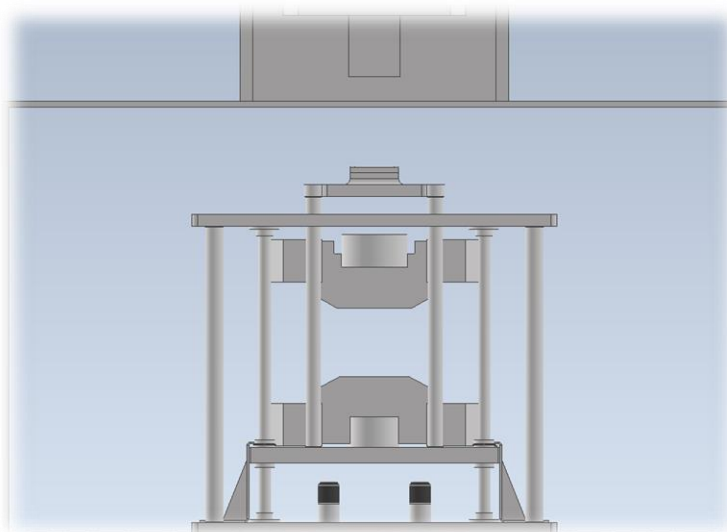
Po pečlivé analýze konstrukce bylo rozhodnuto o jejím zjednodušení. K tomu bylo rozhodnuto spojit nosné sloupce a vedení. To umožní snížit počet dílů a zjednodušit proces výroby, a také snížit náklady na výrobu. Výsledkem byla modifikovaná konstrukce, která splňuje všechny požadavky kvality a bezpečnosti.



Obrázek 38: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 1

### 6.2 Varianta 2

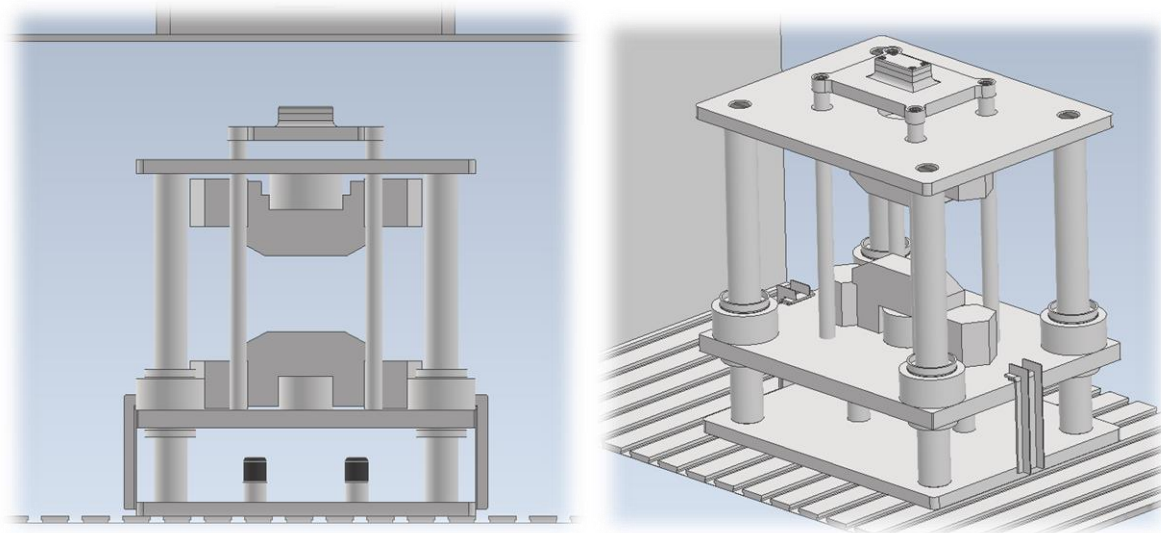
Druhá varianta má stejnou konstrukci jako předchozí verze. Byly použity jiné prvky konstrukce. Hlavním rozdílem jsou elementy vedení a uchopovací prvky, které byly – stejně jako dříve – vybrány z řady domácích výrobků. Toto řešení může zajistit její dostupnost na trhu a nízkou cenu díky hromadné výrobě. Model konstrukce byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a je zobrazen níže. Tento model také umožňuje vizuálně zhodnotit ergonomii a estetiku konstrukce.



Obrázek 39: 3D-model varianty 2 – pohled zepředu

### 6.2.1 Varianta 2. Revize 1

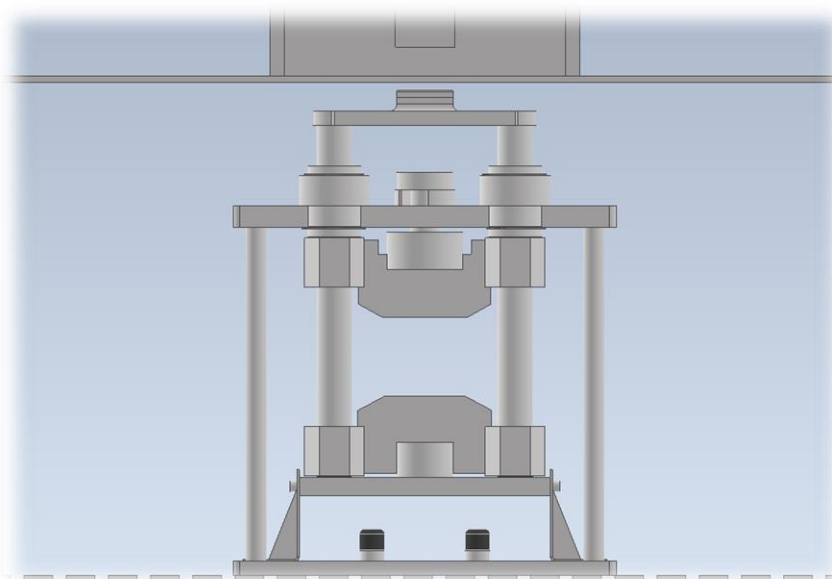
Po analogii s předchozí variantou a po důkladné analýze konstrukce bylo rozhodnuto o zjednodušení konstrukce. K tomu byly spojeny nosné sloupce a vodící prvky. Toto rozhodnutí umožnilo snížit počet součástí. Výsledkem byla modifikovaná konstrukce, která je zobrazena níže.



Obrázek 40: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 2

### 6.3 Varianta 3

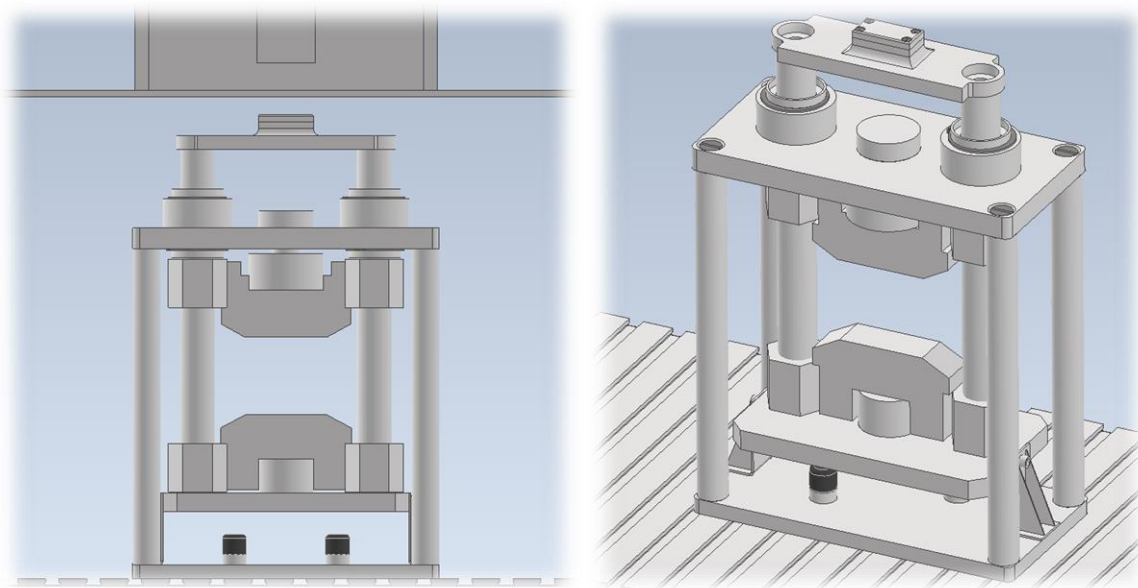
Pro třetí variantu byla použita druhá koncepční varianta jako základ. Jak bylo již zmíněno, klíčovým prvkem je to, že nárazník a vedení pohyblivé desky jsou jednou konstrukcí. Na základě CAD-modelů z katalogů byl vytvořen předběžný model, který je znázorněn níže. Tento krok umožnil vizuální posouzení ergonomie a estetických vlastností, stejně jako přesné zmapování všech součástí a jejich umístění v rámci celé konstrukce.



Obrázek 41: 3D-model varianty 3 – pohled zepředu

### 6.3.1 Varianta 3. Revize 1

V této variantě byly provedeny pouze úpravy rozměrů, které vedly k redukci a optimalizaci velikosti konstrukce. Nebyly provedeny žádné zásadní konstrukční změny.



Obrázek 42: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 3

## 6.4 Porovnání konstrukčních řešení rámu

Pro výběr varianty návrhu určíme kritéria, na jejichž základě by bylo možné její objektivní posouzení.

- Tuhost. Je to fyzikální veličina charakteristická pro každé pružné těleso či statickou soustavu. Udává míru změny jeho délky (či jiného daného charakteristického rozměru ve směru působící síly) vzhledem k velikosti působící vnější síly při pružné deformaci.
- Jednoduchost konstrukce. Složité technické systémy během provozu podléhají deterministickým a stochastickým vnějším vlivům, což vede k různým typům poškození prvků a spojů: opotřebení, ucpání, zlomení atd.
- Hmotnost. Hmotnost konstrukce je kritickým faktorem při výběru návrhu rámu, zejména v případech, kdy je potřeba minimalizovat celkovou hmotnost zařízení. Na druhé straně však může být požadována vyšší hmotnost, aby se zvýšila stabilita nebo aby se snížilo riziko vibrací či kmitání konstrukce.
- Ergonomická a estetická kritéria. Samozřejmě aby bylo zařízení krásné, musí být především co nejvíce splněn cíl, který si člověk při jeho výrobě klade. Kromě toho návrh objektu a jeho účel by měly být provedeny v optimální formě.
- Údržba. Údržba je soubor činností, které mají zajistit, že se zachová jejich provozuschopný stav, nebo při poruše bude tento stav rychle obnoven. Je to tím obtížnější, čím složitější je naše zařízení a počet kritických uzlů.

### 6.4.1 Bodové ohodnocení variant

Tabulka 3: Hodnocení kritérií a konečný součet

	Tuhost	Jednoduchost konstrukce	Hmotnost	Ergonomická a estetická kritéria	Údržba	$\Sigma$
<b>Varianta 1</b>	$6 \times (10) = 60$	$5 \times (9) = 45$	$6 \times (6) = 36$	$5 \times (4) = 20$	$5 \times (8) = 40$	201
<b>Varianta 2</b>	$6 \times (10) = 60$	$6 \times (9) = 54$	$5 \times (6) = 30$	$6 \times (4) = 24$	$7 \times (8) = 56$	224
<b>Varianta 3</b>	$9 \times (10) = 90$	$7 \times (9) = 63$	$7 \times (6) = 42$	$8 \times (4) = 32$	$8 \times (8) = 64$	291

### 6.5 Závěr

Při hodnocení konstrukce byla nejlépe hodnocena poslední varianta (č. 3), která je následně rozpracována do konstrukčního řešení. Konečný výběr výrazně ovlivnila i jednoduchost konstrukce, která úzce souvisí s údržbou. Dále byl oceněn i faktor „Ergonomie“ na základě vizuálního hodnocení předběžného modelu, protože menší množství dílů poskytuje lepší pracovní podmínky pro operátora a vysokorychlostní kamery, ubude tak překážek pro měření deformace.

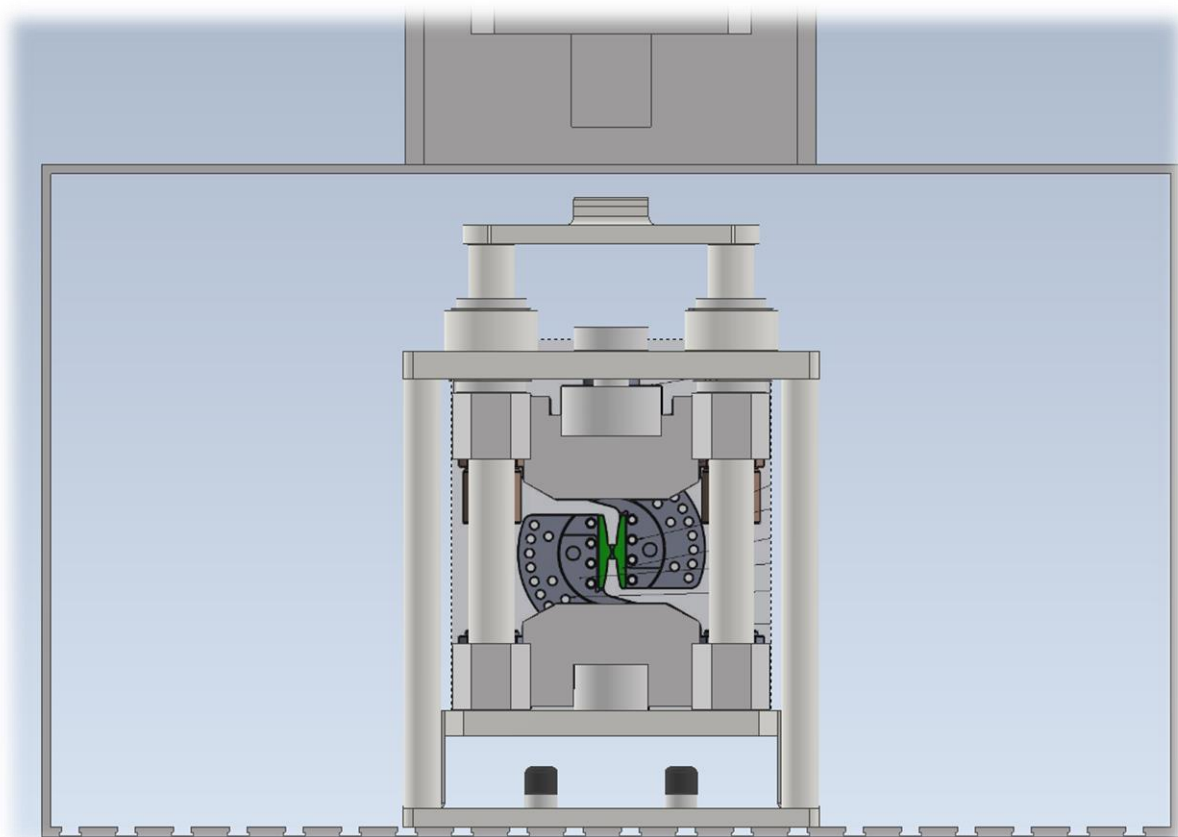
## 7 Hodnocení konstrukčních návrhů biaxiálního zařízení

V této části práce budou popsány a zhodnoceny různé možnosti provedení biaxiálního zkušebního zařízení. Bude posouzena optimálnost použití již existujícího zařízení nebo vytvoření nového řešení.

Důvodem pro zvážení jiné varianty provedení zařízení je to, že současná konstrukce je poměrně složitá na uchycení vzorku a manipulaci s ním. Její hmotnost činí přibližně 10–12 kg. Proto se zvažuje vhodnost použití jiných konstrukčních variant pro usnadnění údržby a uchycení.

### 7.1 Použití stávajícího zařízení

První možnost zahrnuje použití existujícího zařízení bez jakýchkoliv změn. Jeho vnější vzhled bude zcela odpovídat variantě 3 navržené konstrukce a bude mít následující podobu:



Obrázek 43: Pohled na současně zařízení ve vybrané konstrukci

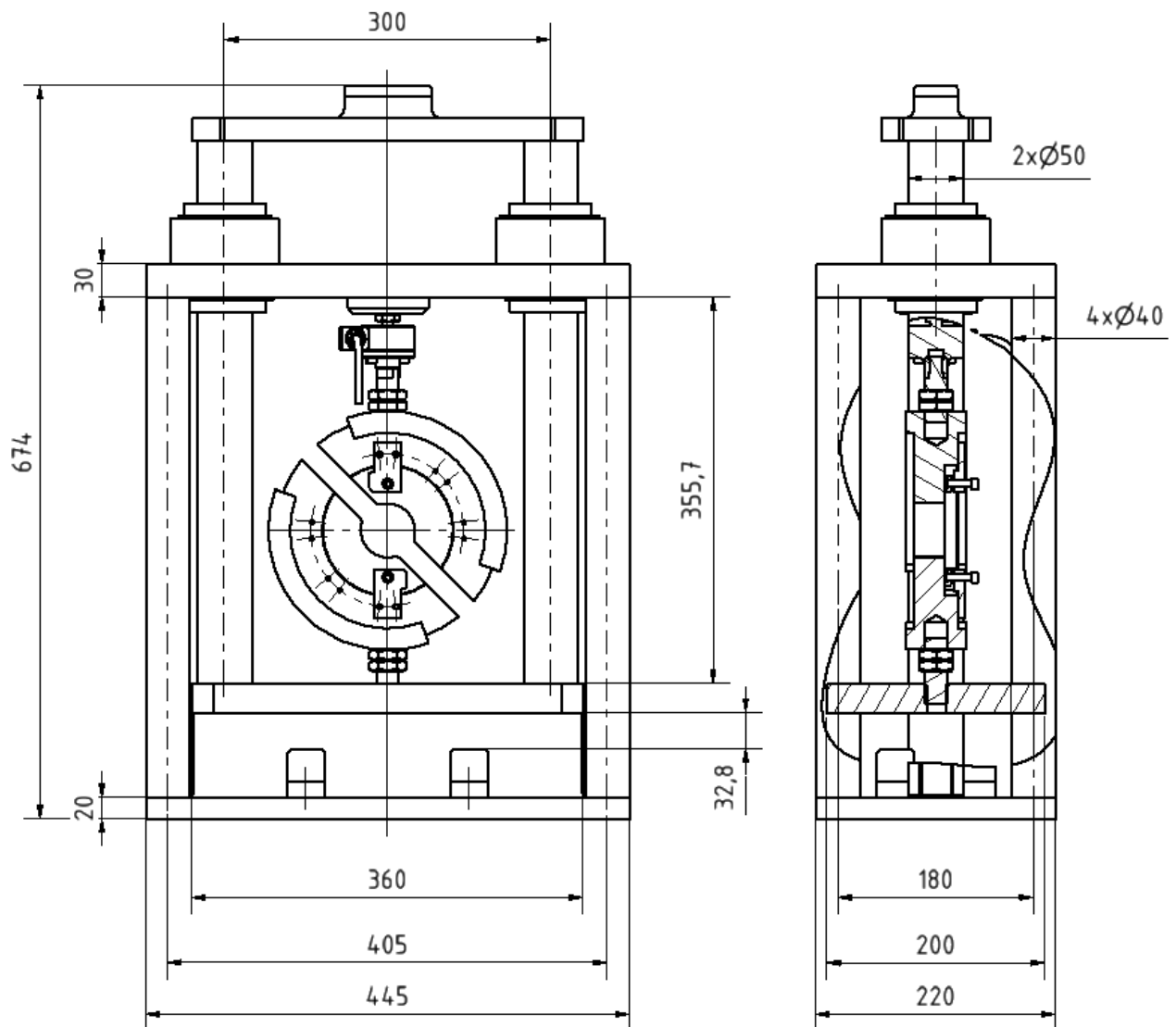
Jak již bylo dříve zmíněno, nevýhody tohoto provedení zařízení představují složitost jeho upevnění a hmotnost. Vzhledem k umístění pracovní komory (na zemi) bude manipulace pro operátora obtížná.



## 7.2 Výroba nového biaxiálního zařízení se širokým výběrem úhlů pro upevnění

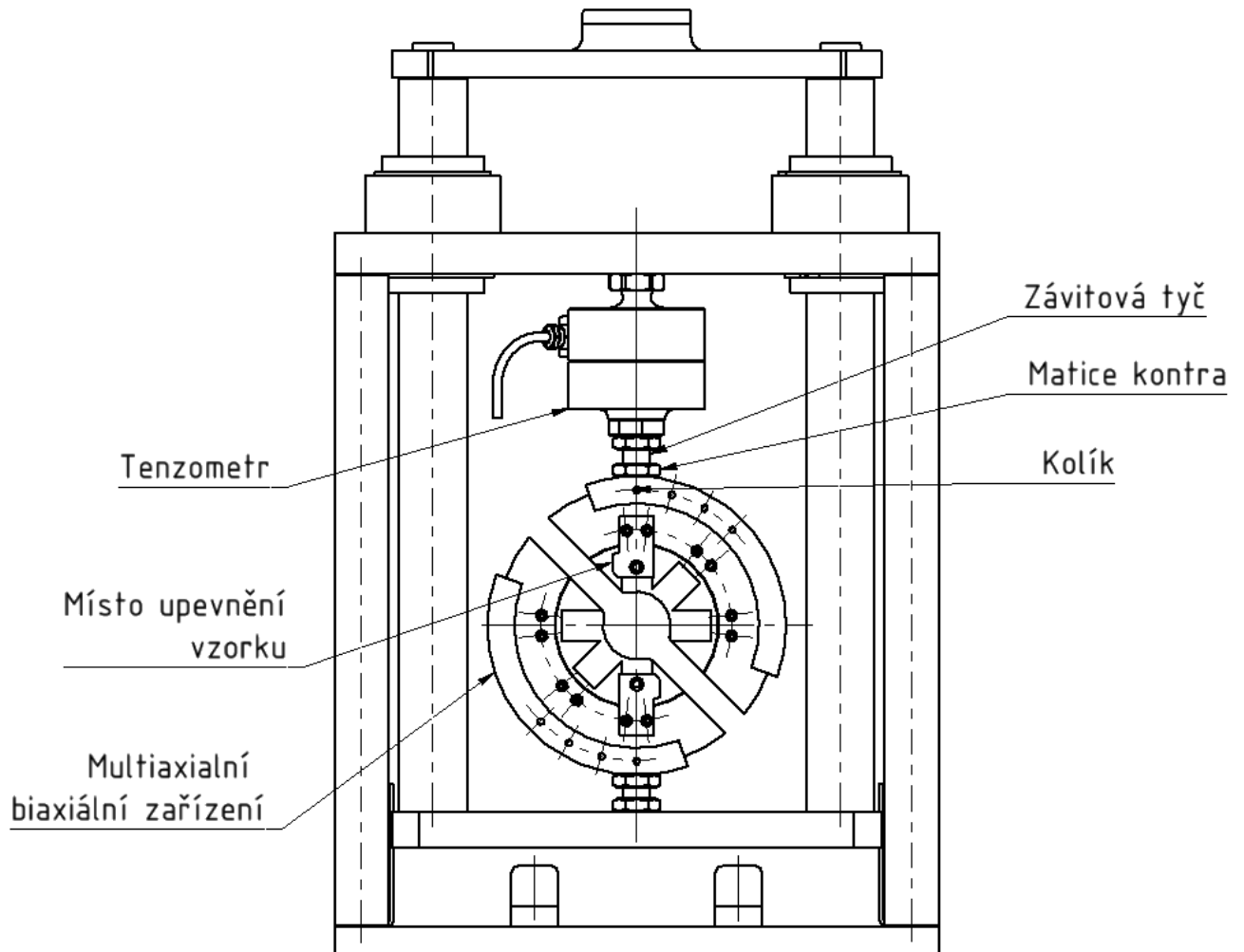
Tento návrh konstrukce předpokládá výrobu samostatného biaxiálního zařízení.

Konstrukce zahrnuje čtyři stupně pro upevnění biaxiálního zařízení na desce v hodnotách natočení  $0^\circ$ – $15^\circ$ – $30^\circ$ – $45^\circ$ . Vzorek má samostatné upevnění, což je v možné v hodnotách natočení  $0^\circ$ – $45^\circ$ – $90^\circ$ . Pomocí daných kombinací úhlů natočení můžeme simulovat testování při nejrůznějších natočeních, a tím pokrýt celou škálu požadovaných zatížení vzorku.



Obrázek 44: Hlavní rozměry konstrukce rámu

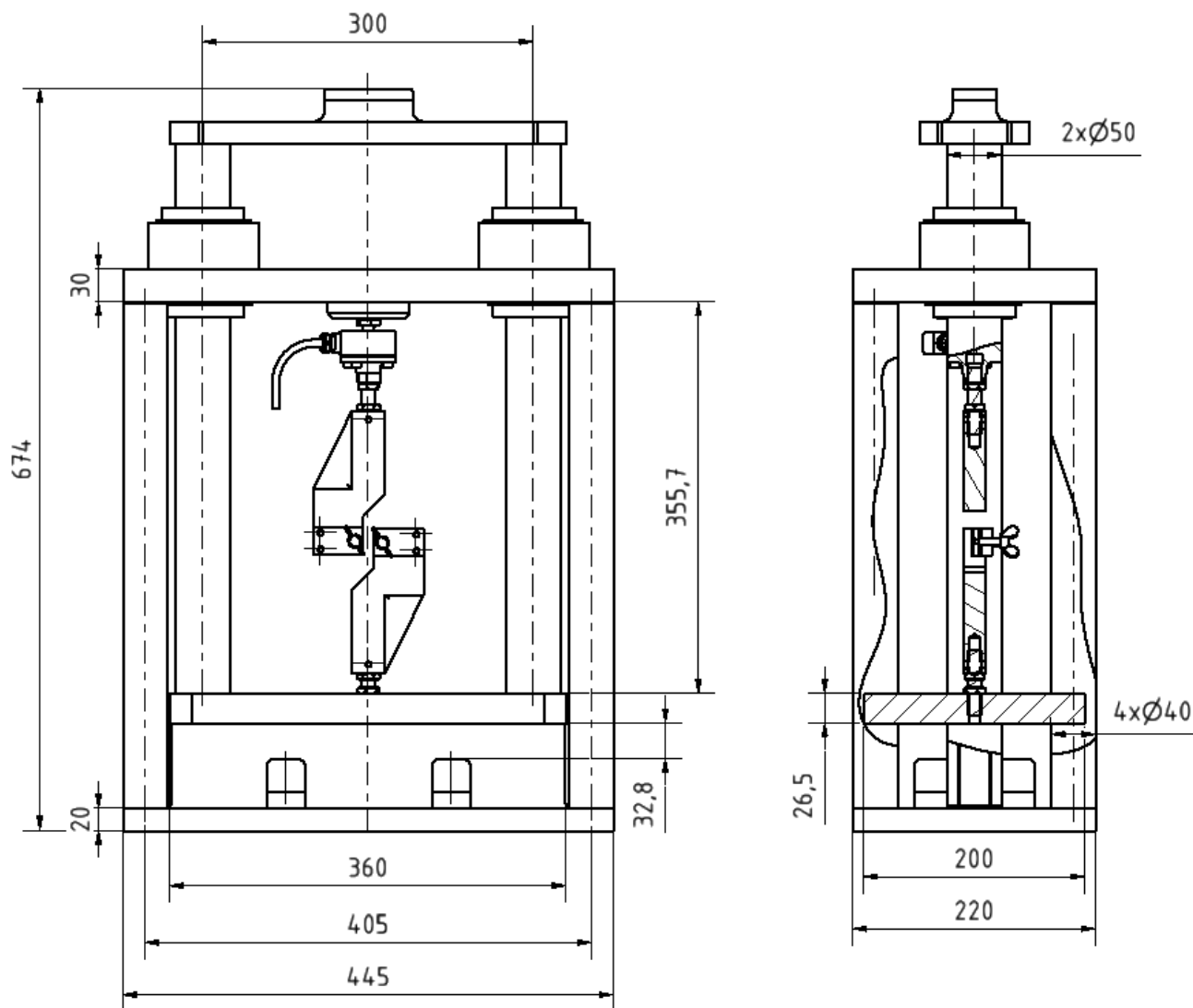
Zakotvení zařízení: v zařízení jsou otvory pro závitovou tyč. Při nasazení zařízení na tyč je pozice upevněna kolíkem. Pro upevnění zařízení a odstranění vůlí se utahuje kontramatice.



Obrázek 45: Hlavní prvky na schématu rámu

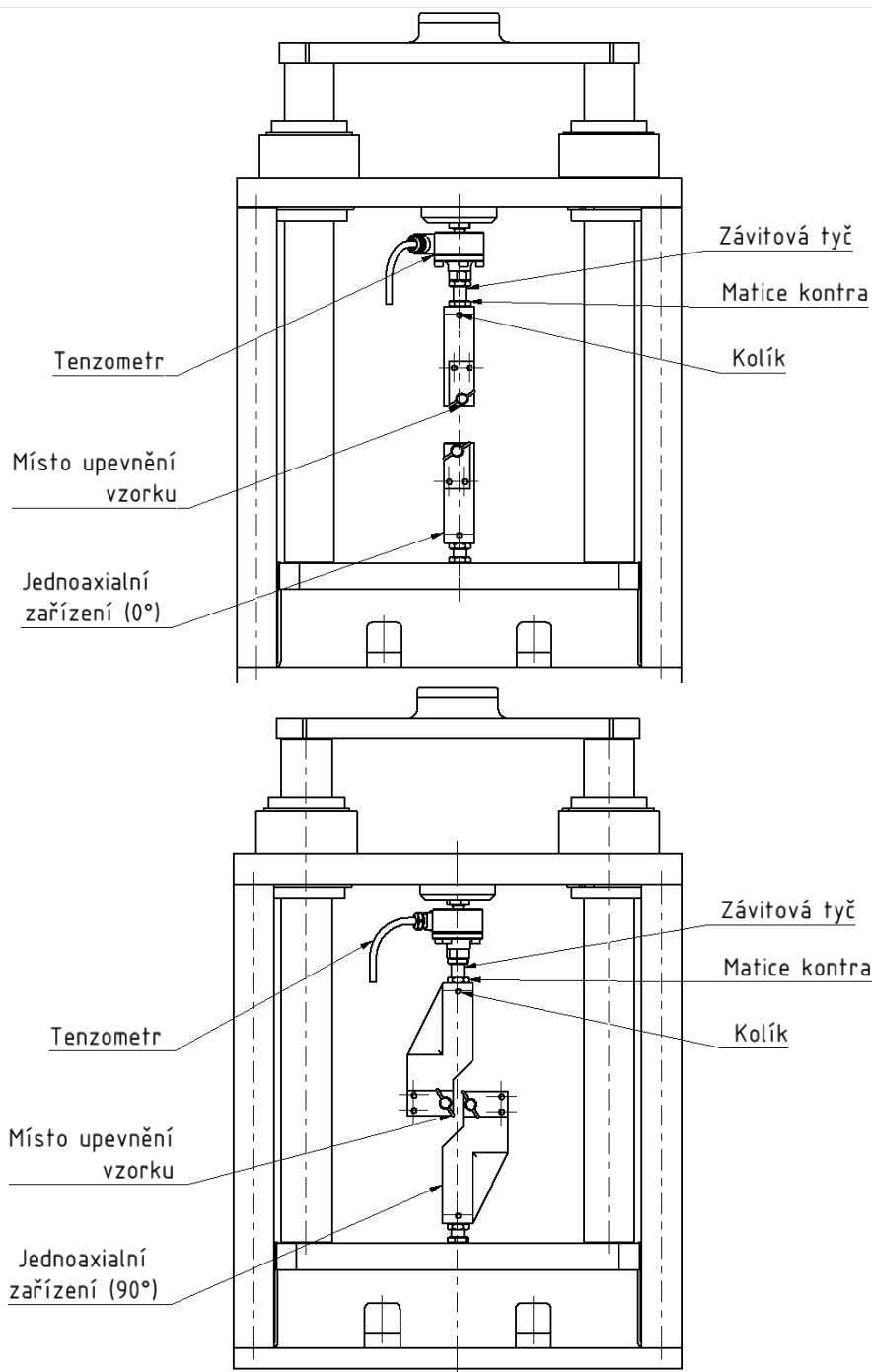
### 7.3 Výroba nového biaxiálního zařízení s jedním úhlem pro upevnění

Druhá varianta samostatně vyráběného zařízení je navržena pro dvě krajní polohy: 90 stupňů a 0 stupňů. Výhoda této konstrukce spočívá v jednoduchosti samotné konstrukce a její montáže/demontáže, ale bude omezena schopností nastavit jakýkoli potřebný úhel, pro každý úhel budou jedinečné konstrukce.



Obrázek 46: Hlavní rozměry konstrukce rámu v provedení 90°

Princip upevnění zařízení je stejný jako u multiaxiálního zařízení. Při nasazení zařízení na tyč je pozice upevněna kolíkem. Pro upevnění zařízení a odstranění vůlí se utahuje kontramatice.



Obrázek 47: Hlavní prvky na schématu rámu ve dvou provedení

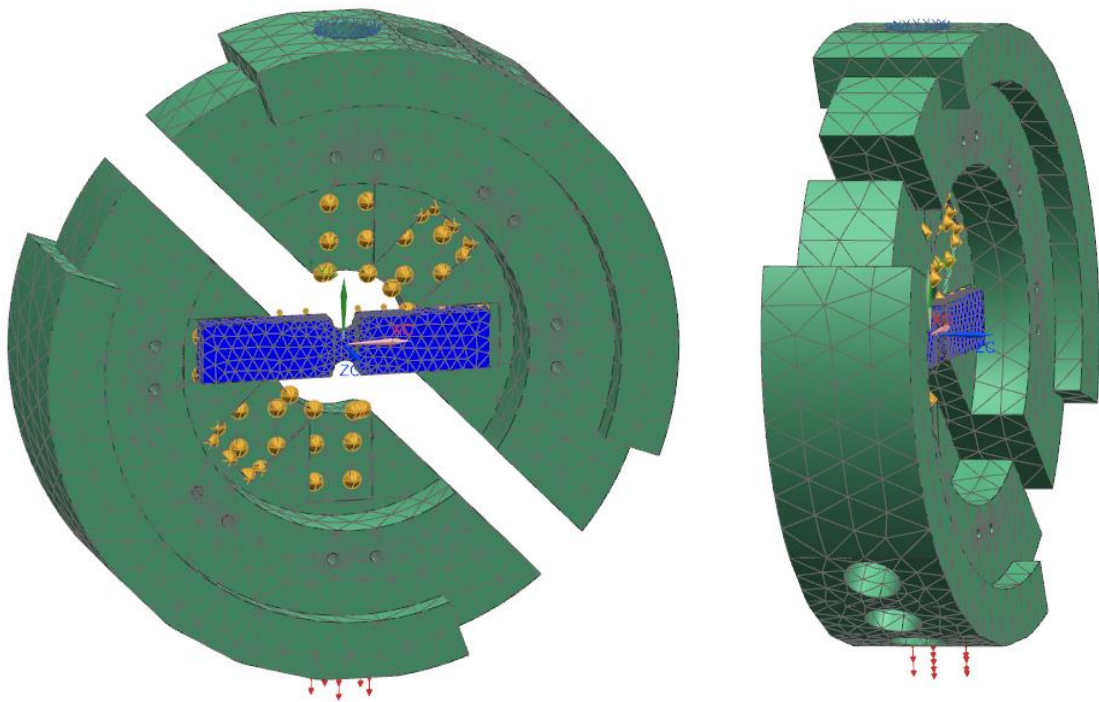
## 7.4 Porovnání konstrukčních řešení zařízení

Pro srovnání optimálnosti konstrukcí bylo zvoleno tuhostní kritérium. Simulace byla provedena v programu Siemens NX. Vzhledem k tomu, že simulace v programu probíhá v oblasti Hookova zákona, bylo zvoleno zatížení podle meze kluzu materiálu vzorku. Představme si, že byl vzorek ze slitiny titanu (jeden z nejpevnějších materiálů). S ohledem na to, že velikost krčku vzorku je přibližně  $4 \times 10$  mm, zatížení bude odpovídat síle 24 000 N.

### 7.4.1 Multiaxiální zařízení

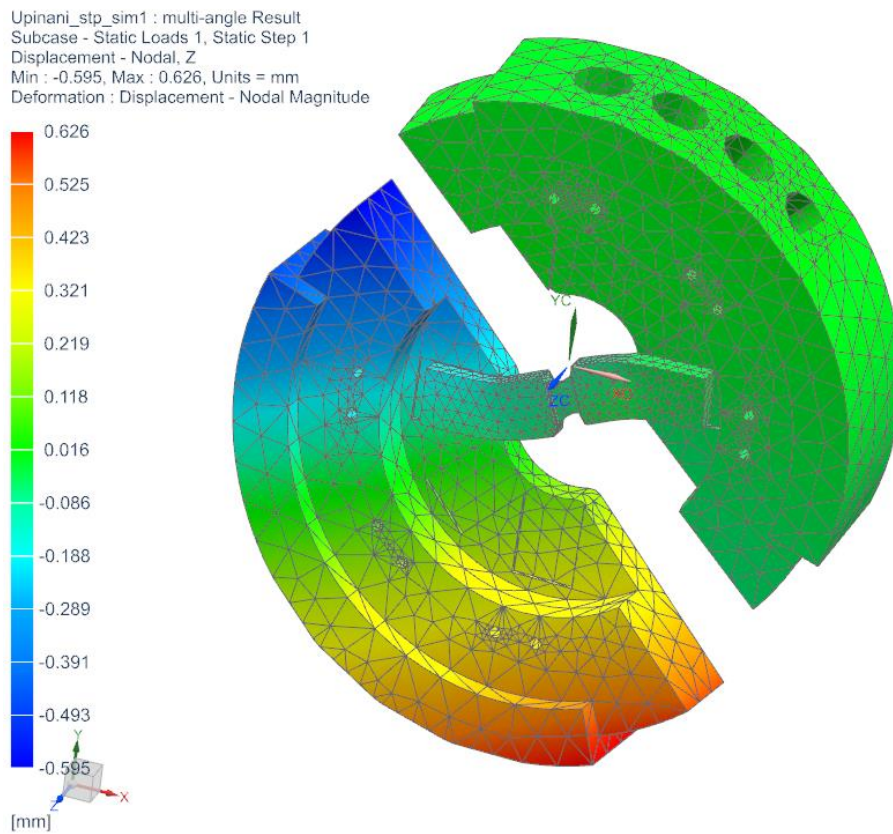
Vzhledem k tomu, že osa zatížení prochází středem krku vzorku, budeme zkoumat „extrémní“ případ pro zatížení, tedy čistý smyk.

V případě multiaxiálního zařízení byla první část (horní) fixována ve všech šesti stupních volnosti v horním otvoru. Zatížení 24 000 N bylo aplikováno na dolní otvor druhé části. Pro všechny díly byla použita 3D tetraedrická síť s velikostí 14 mm pro zařízení (materiál – ocel) a síť v 5 mm pro vzorek (materiál – titan). Vzorek byl pevně spojen se zařízením pomocí funkce „Surface-to-Surface Gluing“, kterým bylo simulováno svěrné spojení.

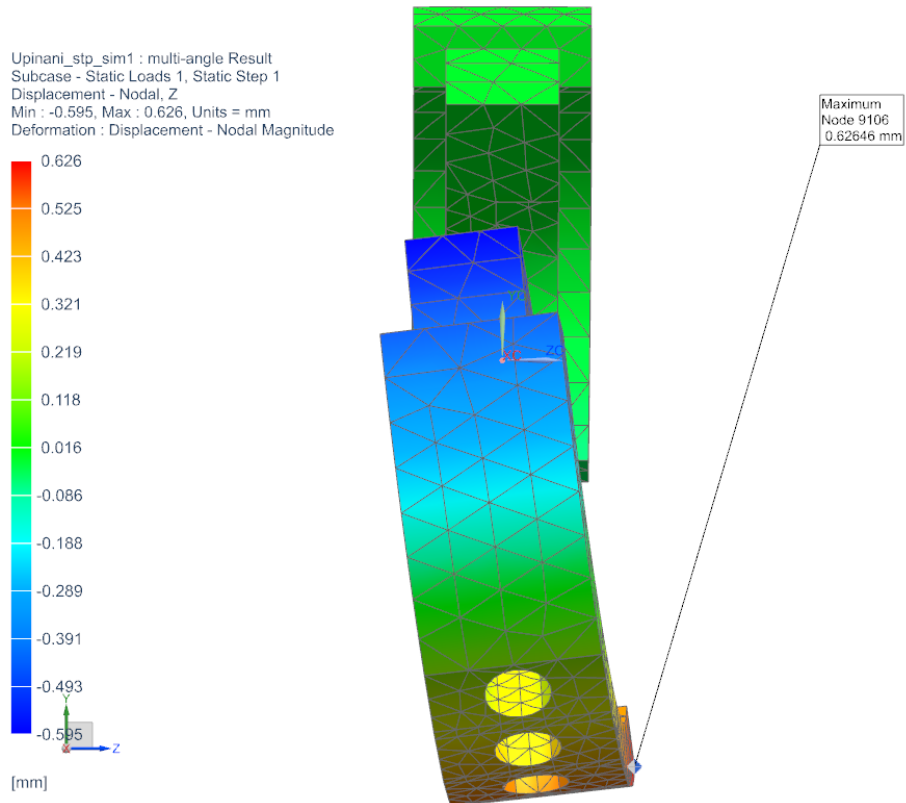


Obrázek 48: FEM-modelování multiaxiálního zařízení

V rámci výsledků simulace budou vyhodnoceny odchylky konstrukce podél osy Z. Odchylky v ose X nebudou komentovány, protože jsou mnohonásobně menší.



Obrázek 49: Výsledky simulace

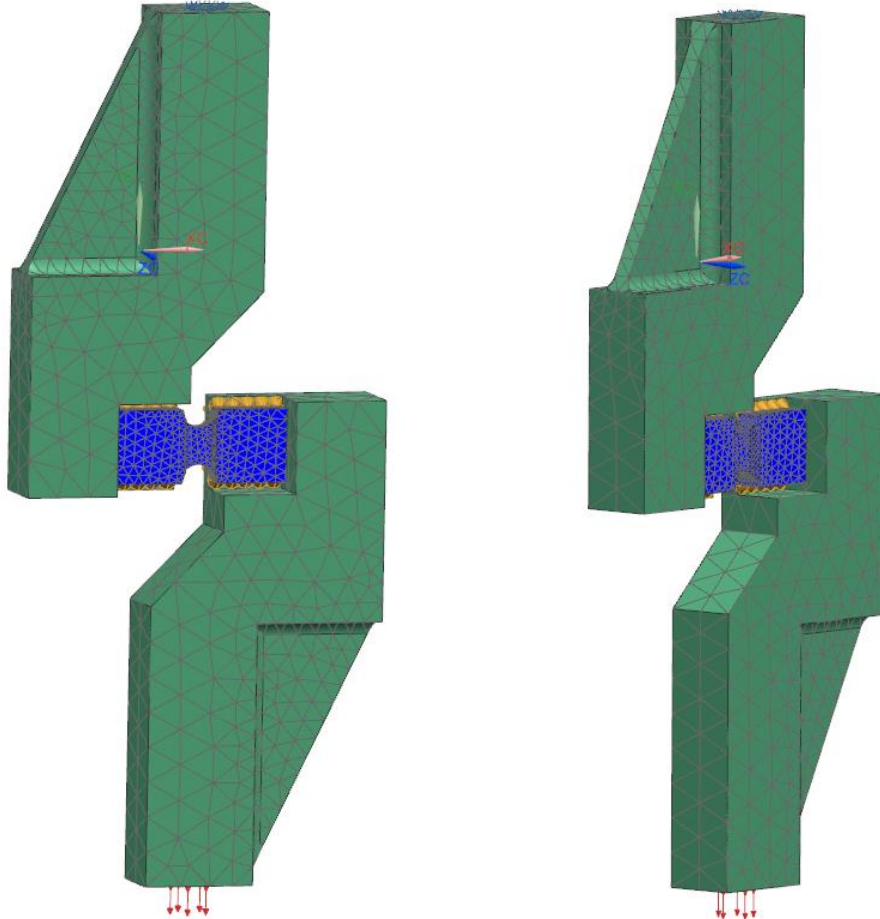


Obrázek 50: Výsledky simulace. Pohled ze strany

### 7.4.2 Jednoaxiální zařízení

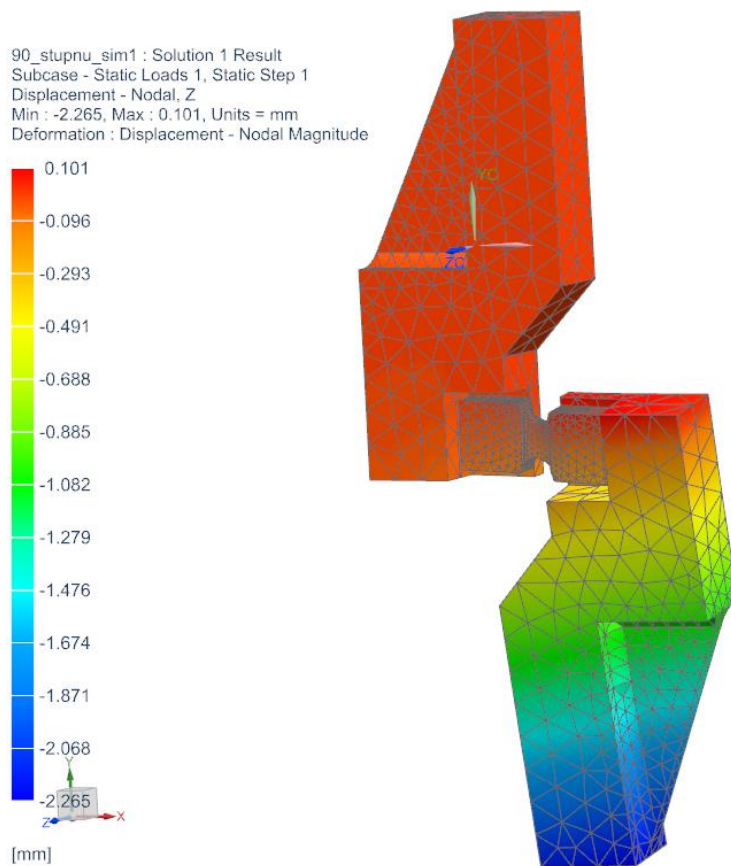
V tomto případě bude opět zvažována krajní varianta, tedy čistý smyk. Budeme se zabývat pouze konstrukcí pro 90 stupňů.

Pro všechny díly byla použita 3D tetraedrická síť s velikostí 10 mm pro zařízení (materiál – ocel) a síť v 3 mm pro vzorek (materiál – titan). Vzorek byl pevně spojen se zařízením pomocí funkce „Surface-to-Surface Gluing“.

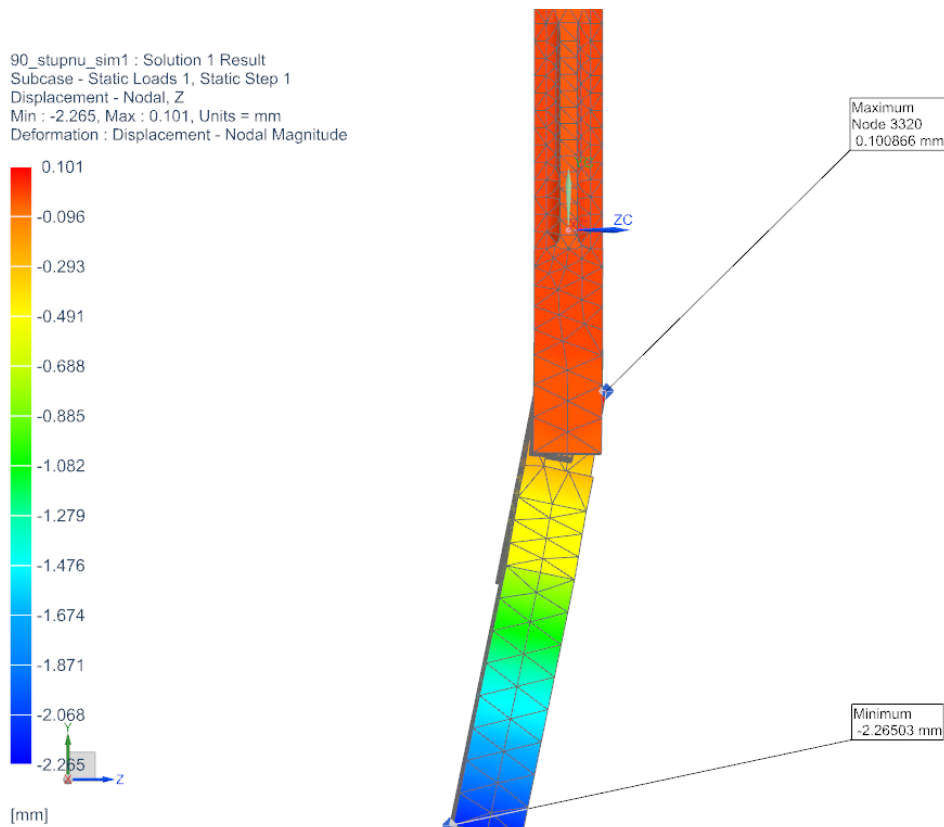


Obrázek 51: FEM-modelování jednoaxiálního zařízení

Stejně se podíváme na odchylku konstrukce podél osy Z.



Obrázek 52: Výsledky simulace



Obrázek 53: Výsledky simulace. Pohled ze strany



### 7.4.3 Závěr

Takto lze dospět k závěru, že biaxiální zařízení v multiaxiálním provedení má tužší konstrukci a méně deformuje než při jednoosovém provedení. Navíc výhodou multiaxiálního provedení je široká škála úhlů pro nastavení a zkoušení vzorků. Po dohodě se zadavatelem bylo vybráno multiaxiální provedení.

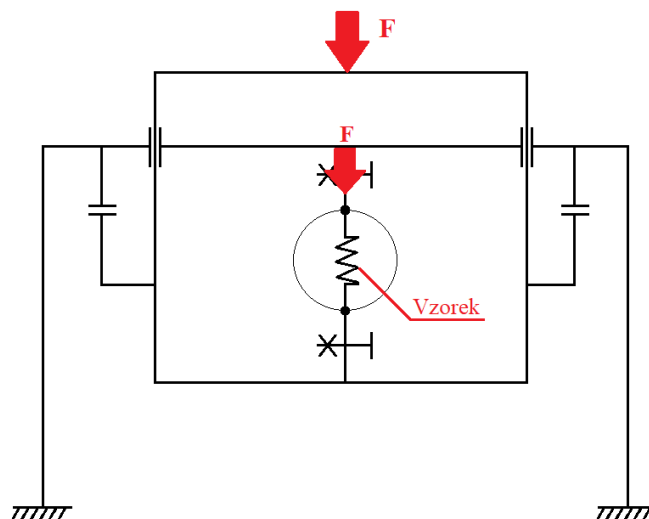
## 8 Pevnostní analýza zařízení

### 8.1 Analytické silové výpočty

Analytické výpočty provedeme na základě analýzy schématu.

Buchar padá na razník uprostřed a energii přenáší přes vzorek na nepohyblivý rám. Představme si, že konstrukce může být použita na jakémkoliv padostroji. Proto jediným úzkým místem je vzorek. Cílem návrhu je, jaký průměr by měly mít sloupy rámu, pokud budeme testovat jeden z nejpevnějších materiálů.

Vezmeme si například titan s krkem o šířce  $b = 10$  mm a tloušťce  $t = 4$  mm.

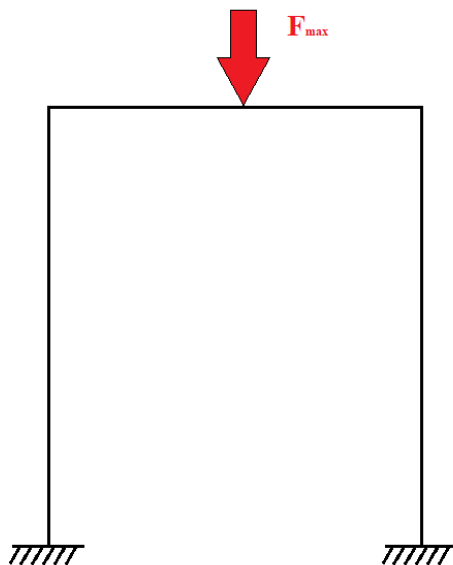


Obrázek 54: Umístění sil na koncepčním návrhu

Titan a jeho slitiny mají mez pevnosti okolo  $R_m = 1\,380$  MPa. Vezměme si tuto hodnotu s přídatkem. Předpokládejme, že maximální napětí, které vydrží vzorek, je 2 000 MPa, a podívejme se na to, jak se bude zatěžovat nepohyblivý rám.

$$\sigma = \frac{F}{S} \rightarrow F_{max} = \sigma_m * S = \sigma_m * a * b = 80\,000\,N$$

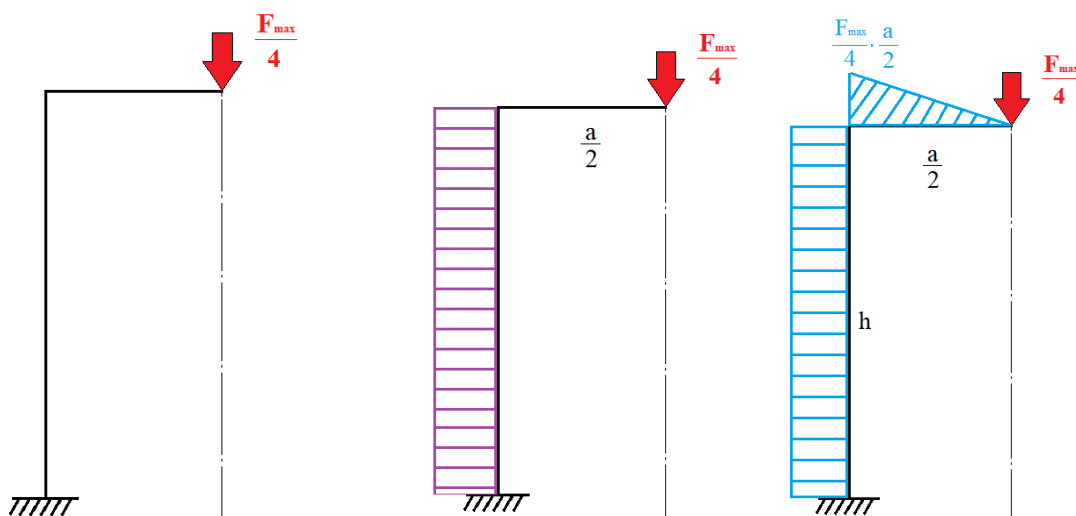
Můžeme toto schéma přibližně zobrazit jako otevřený symetrický rám.



Obrázek 55: Zjednodušené schéma rámu

Jedná se o statickou neurčitou úlohu, ale lze ji zjednodušit díky symetrii. Rozdělíme ji na polovinu, včetně síly.

Protože zatížení se přenáší na dva sloupy, rozdělíme to ještě jednou na polovinu a odhadneme, jaké bude zatížení na jednom sloupu.



Obrázek 56: Průběh sil a momentů

Nejvíce zatížené místo je v horní části sloupu. Proto zkontrolujeme napětí tam. Průměr sloupu předběžně navrženého v CAD je  $D = 40 \text{ mm}$ . Plocha průřezu:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 1\,256,6 \text{ mm}^2$$

Modul průřezu v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi D^3}{32} = 6\,283,2 \text{ mm}^3$$

Napětí v tlaku:

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{4 * S} = 15.9 \text{ MPa}$$

Napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{F_{max} * a}{4 * 2 * W_o} = 644.6 \text{ MPa}$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sigma_o + \sigma_t = 660.5 \text{ MPa}$$

Dokonce i kdybychom zvolili pevnou konstrukční ocel S355 ( $R_m = 355 \text{ MPa}$ ), stále nedosáhneme standardní bezpečnost. Proto bude nutné zvětšit průměr sloupu.

V tomto případě budeme zvyšovat průměr sloupů a optimalizovat konstrukci pro standardní nelegovanou ocel běžné jakosti pro konstrukci podle normy ČSN 11373. Při opakovaném výpočtu s průměrem sloupu  $D = 56 \text{ mm}$  bude snížené napětí činit  $243 \text{ MPa}$ , což odpovídá minimální mezi kluzu  $R_e$  u tepelně nezpracovaného provedení a činí min.  $250 \text{ MPa}$ .

## 8.2 Analytické výpočty vzpěru

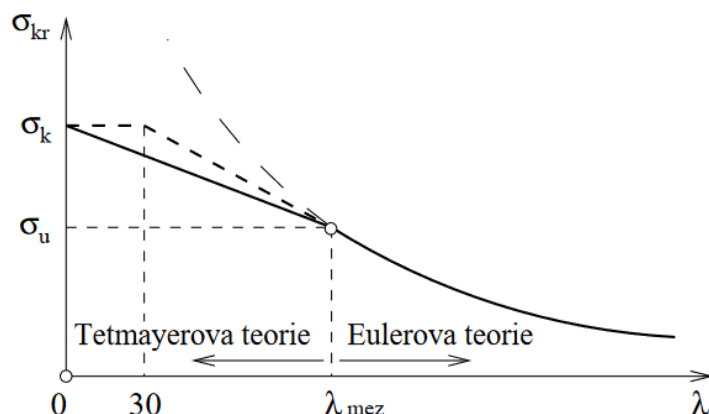
Ještě provedeme ověření skrze nalezení kritické síly pro vzpěr přímého prutu. Ověření přímých prutů (vzpěr) je důležité pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti stavební konstrukce. Pokud prut není stabilní, může dojít k jeho prasknutí nebo deformaci, což může mít za následek selhání celé konstrukce. Proto je důležité provádět analýzy stability prutů a provádět výpočty, aby se zajistila jejich spolehlivost a bezpečnost.

Ověřování správného umístění, počtu a pevnosti vzpěr je tedy klíčové pro zajištění spolehlivosti a bezpečnosti konstrukce.

Nebudeme kontrolovat štíhlostní poměr prutu, protože se pohybujeme v pružné oblasti. To znamená, že potřebujeme jenom Eulerovu teorii vzpěru, která je omezena platností Hookova zákona, a je proto vázána podmínkou

$$\sigma_{kr} \leq \sigma_u,$$

tj. že kritické napětí nepřesáhne mez úměrnosti materiálu.



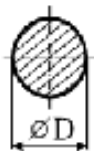
Obrázek 57: Průběh kritického napětí podle Tetmayerovy a Eulerovy teorie vzpěru (10)

V naší situaci určíme úlohu jako 4. případ, ( $n=4$ ), ve kterém je třeba určit kritickou sílu  $F_{kr}$  pro tyč kruhového průřezu o průměru  $D = 40$  mm a délce  $l = 490$  mm, která je zatížena osovou silou  $F = 20\,000$  N.



$$J_{min} = \frac{\pi * D^4}{64} = 1,257 * 10^5 \text{ mm}^4$$

$$F_{kr} = n \frac{\pi * E * J_{min}}{l^2} = 1315.4 \text{ kN}$$

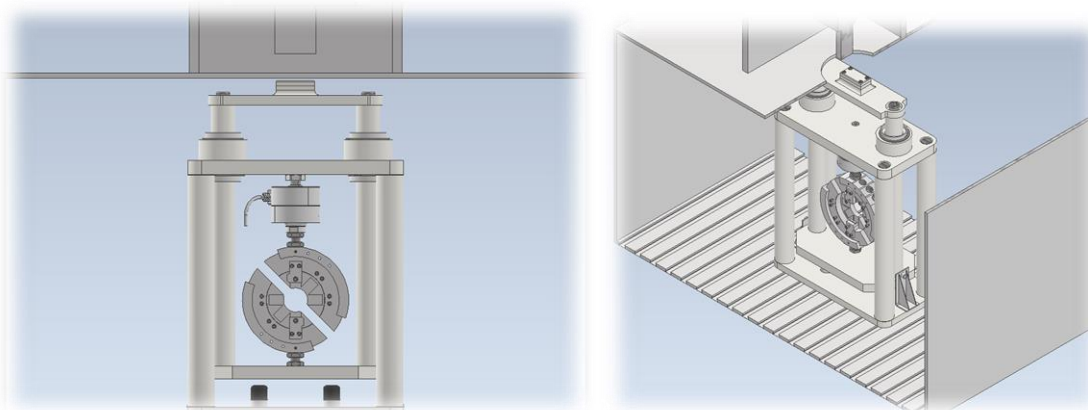


Po provedeném hodnocení vzpěru bylo zjištěno, že konstrukce splňuje stanovené požadavky. Kritická síla vypočítaná pro danou konstrukci činí 1 315 kN, což je více než požadovaných 20 kN. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že konstrukce je dostatečně dimenzována a odolává působícím silám.

Obrázek 58: Čtvrtý případ vzpěru

## 9 Konečný model a jeho analýza

V důsledku analýzy a provedených výpočtů bylo rozhodnuto vytvořit model v Autodesk Inventoru a provést výpočet vlastních frekvencí v programu Siemens NX. To umožní ověřit, zda konstrukce splňuje požadavky a nebude mít příliš vysoké vlastní frekvence, což by mohlo vést k nežádoucím vibracím. Tento krok umožní ověřit správnost přijatého rozhodnutí a odstranit možné chyby, které by mohly v průběhu práce vzniknout.



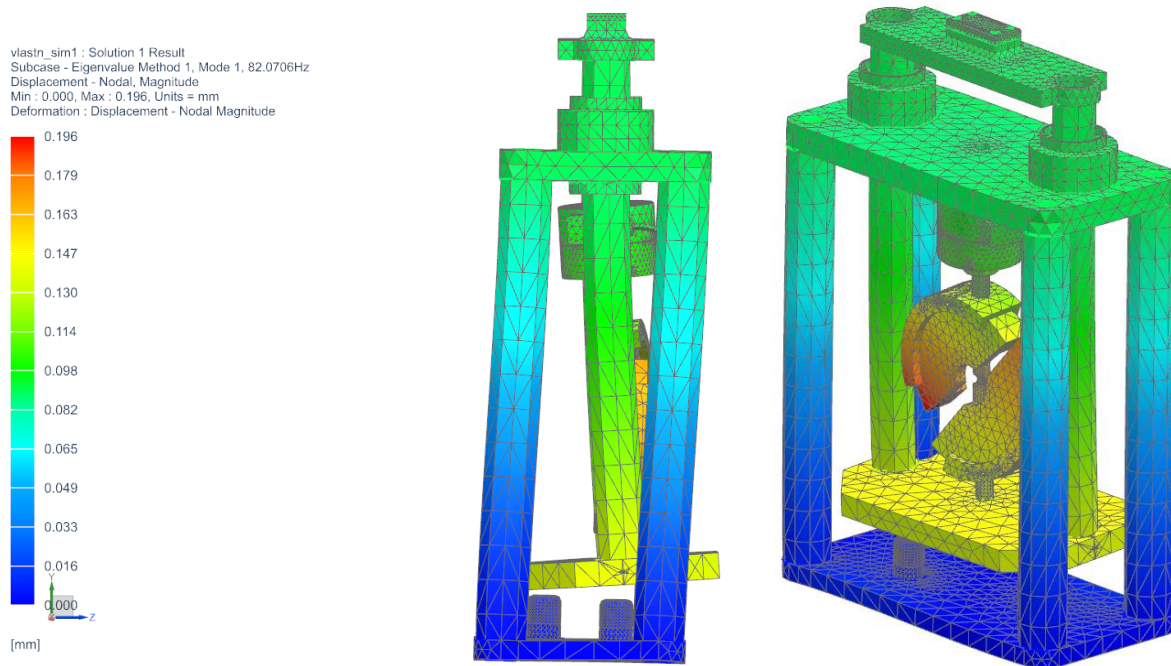
Obrázek 59: Konečný model přípravku

SOL 103 Real Eigenvalues je jedna z metod řešení lineárních statických a dynamických úloh metodou konečných prvků v programu Siemens NX. Tato metoda se používá k nalezení vlastních hodnot a vlastních vektorů (nebo módů) sítě konečných prvků, které odpovídají jejím přirozeným frekvencím a formám kmitání.

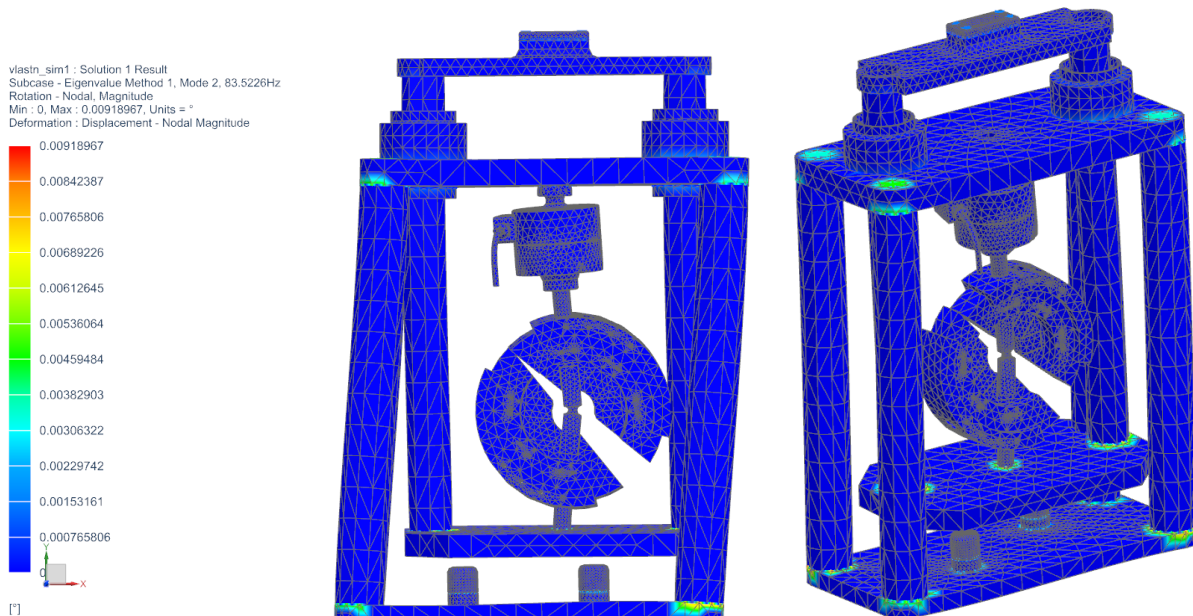
Tyto hodnoty a vektory mohou být použity k analýze dynamického chování systému a jeho reakce na vnější vlivy, jako jsou vibrace, nárazy a další dynamické zatížení.

V důsledku provedení analýzy SOL 103 Real Eigenvalues v NX vzniká tabulka výsledků, která obsahuje hodnoty vlastních frekvencí a tvarů kmitání (vlastních vektorů) pro síť konečných prvků. Tyto údaje lze použít k optimalizaci konstrukce a prevenci možných dynamických problémů, jako jsou rezonance a deformace.

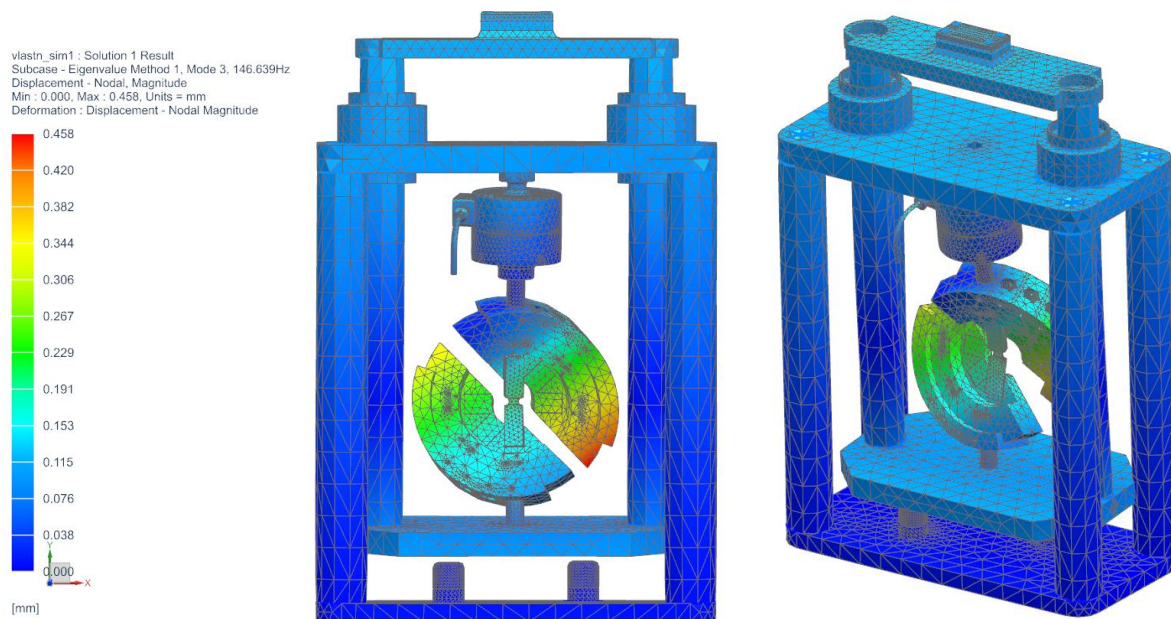
SOL 103 Real Eigenvalues tedy pomáhá inženýrům lépe porozumět chování konstrukce a použít tyto informace k vylepšení její výkonnosti a spolehlivosti.



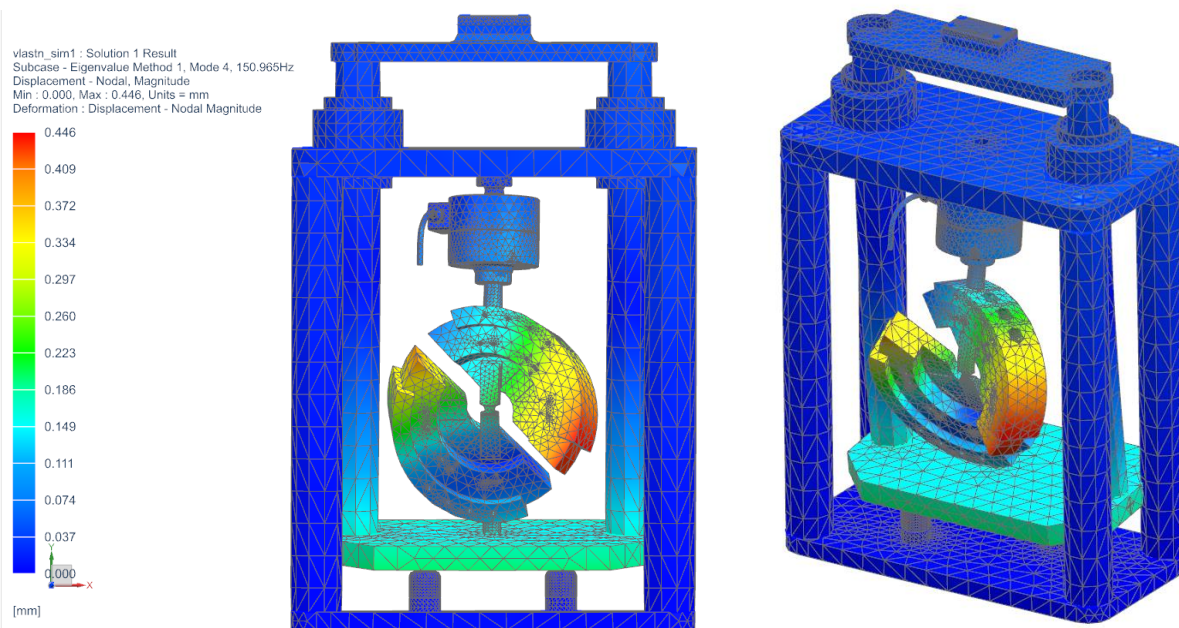
Obrázek 60: Vlastní tvar – 82.0706 Hz



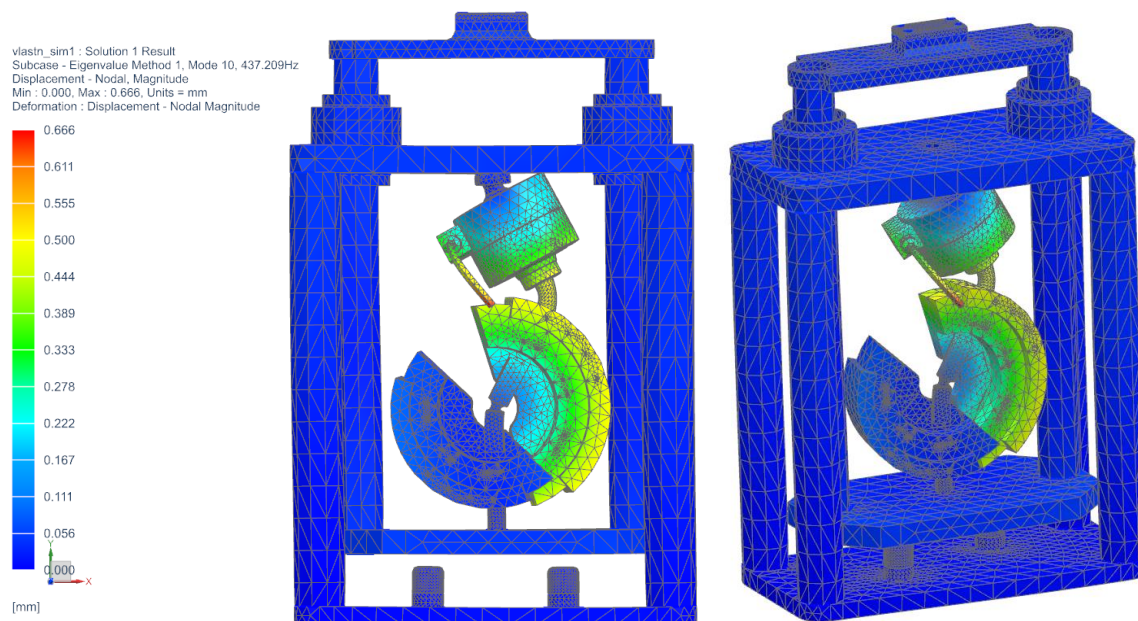
Obrázek 61: Vlastní tvar – 83.522 Hz



Obrázek 62: Vlastní tvar – 146.639 Hz



Obrázek 63: Vlastní tvar – 150.965 Hz



Obrázek 64: Vlastní tvar – 437.209 Hz

Vzhledem k dynamice procesu, který probíhá ve velmi krátkém časovém intervalu, je klíčové, aby první vlastní frekvence přesahovala 50 Hz. Analýza mé práce ukázala, že skutečná hodnota první vlastní frekvence zařízení činí 82 Hz, což plně odpovídá konstrukčním požadavkům. Frekvence získané pomocí modální analýzy neodpovídají žádným nežádoucím nebo kritickým frekvencím a výsledek modální analýzy nevyžaduje zásah do konstrukce zařízení. Tvary a velikosti deformací z vlastních kmitů jsou dostatečně malé.

## 10 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout konstrukční přípravek pro tahovou zkoušku s biaxiálním zařízením v pracovním prostoru padostroje a nalézt optimální tvar při dosažení dostatečné tuhosti zařízení.

Součástí této práce je zhodnocení současné nabídky padostrojů, řešení technických vlastností a možností použití, dále klasifikace řešeného problému a diskuse nad požadavky. Hlavní část práce představovala kompletní návrh přípravku, včetně modelování. Největší důraz byl kladen koncepční tvar rámu. Byly navrženy tři varianty řešení a pomocí rozhodovací analýzy byla vybrána varianta nejvhodnější. Přípravek byl zkontrolován pomocí MKP a analytických výpočtů.

Pro tvorbu modelů byl použit program Autodesk Inventor a pro MKP-analýzu byl využit program Siemens NX.

## 11 Bibliografie

1. **Sismilich, Vladimír.** *Dynamická tahová zkouška – určení materiálových parametrů. Bakalářská práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2008.
2. **Růžička, Jan.** *Metodika kalibrace nesvázaných modelů a stochastický přístup v problematice tvárného porušování.* Praha : České vysoké učení technické v Praze., 2015.
3. **Prantl, Antonín, Džugan, Jan a Konopík, Pavel.** *DUCTILE DAMAGE PARAMETERS IDENTIFICATION.* Plzeň : COMTES FHT a.s., 2012.
4. **Španiel, Miroslav, a další.** Calibration of fracture locus in scope of uncoupled elastic–plastic-ductile fracture material models. *Advances in Engineering Software.* 2014, stránky 95-108.
5. *Calibration of Stress-triaxiality Dependent Crack Formation Criteria.* **HENN, S. a MOHR, D.** 2007, Experimental Mechanics, Sv. 47, stránky 805-820.
6. **Hassasroudsari, Parsa.** *The equipment for biaxial examination.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
7. **Staněk, Jiří.** *Základy stavby výrobních strojů : tvářecí stroje.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2001.
8. **Halama, Radim, a další.** *Pružnost a pevnost - interaktivní studijní.* místo neznámé : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava/Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
9. **Macura, Pavel.** *Experimentální metody v pružnosti a plasticitě.* Ostrava : VŠB–TU Ostrava, 2001.
10. **Zajíček, M a Adámek, V.** Vzpěru přímých prutů. [Online] [Citace: 14. 04 2023.] <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/vzper-primych-prutu/shrnuti.pdf>.



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozsahy rychlostí deformace při mechanických zkouškách .....	11
Obrázek 2: Všeobecná 3D lomová křivka – Bai–Wierzbicki (2).....	13
Obrázek 3: Pozice simulovaných mechanických testů v ( $\eta$ , $\theta$ ) prostoru .....	13
Obrázek 4: II. generace vzorku ve tvaru motýla .....	14
Obrázek 5: Videosekvence lomu motýlovitého vzorku (nahore) / Proces místních deformací během testu (dole) (3) .....	14
Obrázek 6: Příklad způsobu zatěžování ( $0^\circ$ – $90^\circ$ – $110^\circ$ ) (4).....	15
Obrázek 7: Původní geometrie (2) .....	16
Obrázek 8: Upravený přístroj Arcan (vlevo) a jeho metoda zatížení (vpravo) (2) .....	16
Obrázek 9: Příklad UBTD a jeho způsob zatěžování (4).....	17
Obrázek 10: 3D-model současného zařízení .....	18
Obrázek 11: Základní rozdělení bucharů (7).....	19
Obrázek 12: Zdvih beranu jednočinných bucharů (7).....	20
Obrázek 13: Protiběžný buchar s pásovou vazbou (7).....	20
Obrázek 14: Protiběžný buchar s pákovou vazbou (7) .....	20
Obrázek 15: Protiběžný buchar s hydraulickou vazbou.....	21
Obrázek 16: Rozdělení bucharů .....	21
Obrázek 17: Konstrukční uspořádání bucharů – zleva jednostojanové, dvoustojanové a mostové (7) .....	22
Obrázek 18: Schéma padostroje .....	22
Obrázek 19: Schéma koncepce č. 1 .....	24
Obrázek 20: Konstrukční struktura č. 1 s vyznačením na schématu.....	25
Obrázek 21: Schéma koncepce č. 2.....	25
Obrázek 22: Konstrukční struktura č. 2 s vyznačením na schématu.....	25
Obrázek 23: Rolny s čepem – zleva podpurná, přírubová, vodící .....	26
Obrázek 24: Popis prvků z katalogu výrobce.....	27
Obrázek 25: Různé tvary kolejnic .....	27
Obrázek 26. Vodící kolejnice.....	28
Obrázek 27: Pouzdra kuličková. Uzavřené a otevřené .....	28
Obrázek 28: Kuličkové pouzdro typu UBM .....	28
Obrázek 29: Vzhled a rozměry kuličkové západky .....	29
Obrázek 30: Předpokládaná konstrukce pro západku .....	29
Obrázek 31: Uchopovací magnet .....	29
Obrázek 32: Tlumič Weforma Mega-Line.....	30

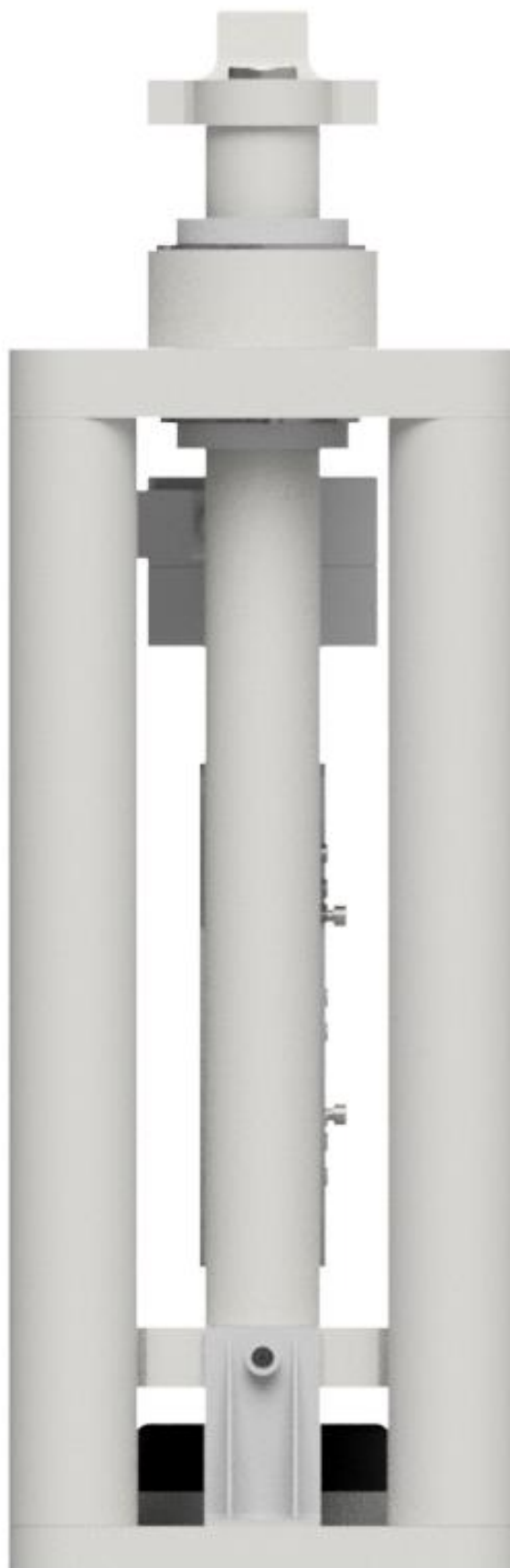
Obrázek 33: Snímek modelu tlumiče .....	30
Obrázek 34: Fóliový tenzometr .....	33
Obrázek 35: Různé varianty provedení tenzometrů od společnosti HBM.....	34
Obrázek 36: Model zařízení s použitím náčrtu .....	35
Obrázek 37: 3D-model varianty 1 – pohled zepředu a izometrie .....	35
Obrázek 38: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 1 .....	36
Obrázek 39: 3D-model varianty 2 – pohled zepředu .....	36
Obrázek 40: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 2 .....	37
Obrázek 41: 3D-model varianty 3 – pohled zepředu .....	37
Obrázek 42: Snímek zjednodušeného modelu – varianta 3 .....	38
Obrázek 43: Pohled na současné zařízení ve vybrané konstrukci.....	40
Obrázek 44: Hlavní rozměry konstrukce rámu .....	41
Obrázek 45: Hlavní prvky na schématu rámu .....	42
Obrázek 46: Hlavní rozměry konstrukce rámu v provedení 90° .....	43
Obrázek 47: Hlavní prvky na schématu rámu ve dvou provedení .....	44
Obrázek 48: FEM-modelování multiaxiálního zařízení.....	45
Obrázek 49: Výsledky simulace.....	46
Obrázek 50: Výsledky simulace. Pohled ze strany .....	46
Obrázek 51: FEM-modelování jednoaxiálního zařízení .....	47
Obrázek 52: Výsledky simulace.....	48
Obrázek 53: Výsledky simulace. Pohled ze strany .....	48
Obrázek 54: Umístění sil na koncepčním návrhu .....	49
Obrázek 55: Zjednodušené schéma rámu.....	50
Obrázek 56: Průběh sil a momentů .....	50
Obrázek 57: Průběh kritického napětí podle Tetmayerovy a Eulerovy teorie vzpěru (10).....	51
Obrázek 58: Čtvrtý případ vzpěru.....	52
Obrázek 59: Konečný model přípravku .....	52
Obrázek 60: Vlastní tvar – 82.0706 Hz.....	53
Obrázek 61: Vlastní tvar – 83.522 Hz.....	53
Obrázek 62: Vlastní tvar – 146.639 Hz.....	54
Obrázek 63: Vlastní tvar – 150.965 Hz.....	54
Obrázek 64: Vlastní tvar – 437.209 Hz.....	55

## **PŘÍLOHA č. 1**

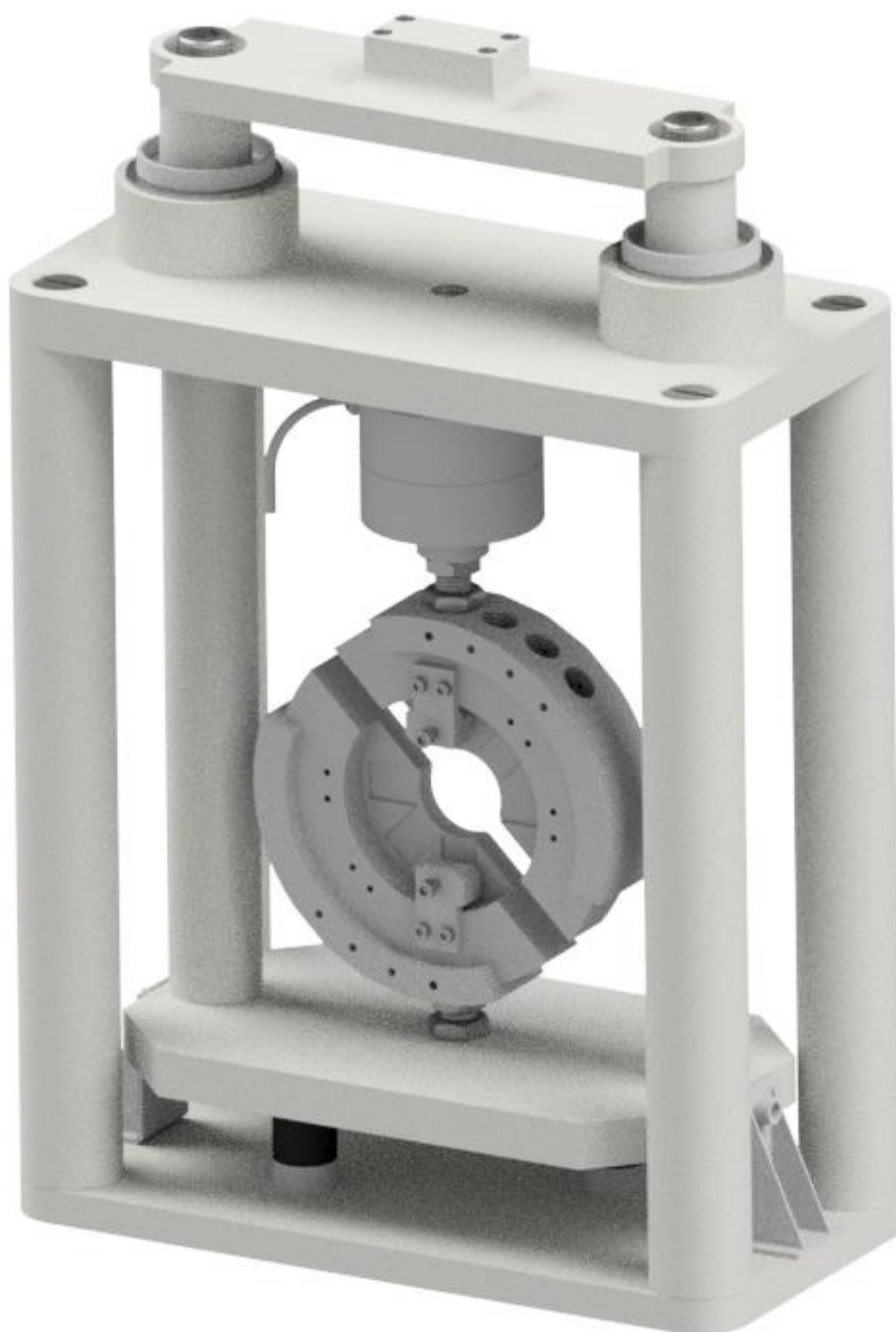
### **CAD-modely navrženého přípravku**



**PŘÍLOHA-Obrázek 1**



**PŘÍLOHA-Obrázek 2**



**PŘÍLOHA-Obrázek 3**