



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU PRO ZATĚŽOVÁNÍ VZORKU
OHYBEM NA UNIVERZÁLNÍM ZKUŠEBNÍM STROJI**

CONSTRUCTION OF EQUIPMENT FOR LOADING THE SAMPLE ON A UNIVERSAL TESTING MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Ševčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Ondřej Ševčík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Návrát, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce přípravku pro zatěžování vzorku ohybem na univerzálním zkušebním stroji

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout přípravek pro zatěžování zkušebního vzorku na univerzálním zkušebním stroji. Standardní zkušební stroj umožňuje zatěžování pouze tahem, tlakem. Další typy zatěžování se musí realizovat speciálními přípravky.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršní analýza dostupných řešení.
2. Konstrukční návrh.
3. Počítačová simulace.
4. Zpracovat kompletní vykresovou dokumentaci.

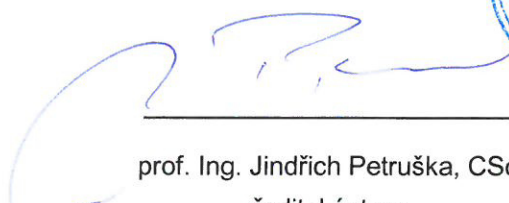
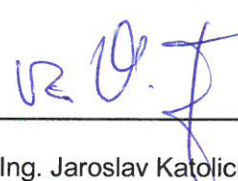
Seznam literatury:

Shigley, J. E. a kol. (2010): Konstruování strojních součástí, VUTIAM.

Dowling, N. E. (2007): Mechanical behavior of materials, Pearson Education.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 22. 11. 2015

		
_____ prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu		_____ doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan

Abstrakt

Tato práce si klade za cíl vytvořit konstrukční návrh přípravku pro zatěžování vzorku ohybem na univerzálním zkušebním stroji. Návrhy se odvíjely od poznatků získaných analýzou dostupných řešení systémů pro namáhání páteřního segmentu. Nejvhodnější návrh je následně zkonstruován s využitím softwaru SolidWorks. Přípravek je také podroben MKP analýze, kde se zkoumalo chování zatíženého přípravku spolu se zjednodušeným modelem vzorku. K tomu slouží určení celkové deformace této soustavy. Nakonec je zpracována kompletní výkresová dokumentace přípravku pro jeho výrobu.

Klíčová slova

přípravek, zkušební stroj, vzorek, páteřní segment, zatížení, síla, moment, tah, tlak, smyk, ohyb, sensor, uvolnění, neporušený, porušený, stabilizovaný, TSLP, MATLAB, SolidWorks, metoda konečných prvků, Ansys

Abstract

This thesis focuses on the construction of equipment for loading a sample onto a universal testing machine. The designs came from analysing existing designs. The best proposal was then designed using SolidWorks. The product was then subjected to a MKP analysis, which examined the behavior of the loaded product together with the procured model sample. Finally, all of the drawings were documented to prepare for production.

Keywords

Construction, testing machine, specimen, spinal segment, load, force, moment, extension, compression, bending, sensor, release, intact, impaired, stabilized, TSLP, MATLAB, SolidWorks, finite element method, Ansys

Bibliografická citace

ŠEVČÍK, O. *Konstrukce přípravku pro zatěžování vzorku ohybem na univerzálním zkušebním stroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 63 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Tomáš Návrát, Ph.D.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod odborným vedením pana doc. Ing. Tomáše Návrata, Ph.D.

V Brně,

.....
Ondřej Ševčík

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce, panu doc. Ing. Tomáši Návratovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace, které mi umožnily zpracovat tuto bakalářskou práci. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za významnou podporu při studiu.

Obsah

Úvod	15
1 REŠERŠNÍ ANALÝZA DOSTUPNÝCH ŘEŠENÍ	16
1.1 Uvedení do problematiky práce	16
1.2 Současné provedení přípravku na ÚMTMB	17
1.3 Přehled dostupných řešení.	21
1.3.1 Zatížení páteřního segmentu pomocí pohonů	21
1.3.2 Zatížení páteřního segmentu pomocí hydraulických prvků	24
1.3.3 Zatížení páteřního segmentu pomocí tzv. šestinožého systému	25
2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH	26
2.1 Návrhy přípravku	26
2.1.1 Zadání 1.....	27
2.1.3 Zadání 2.....	32
2.1.3 Zadání 3.....	40
2.2 Další varianty konstrukčního řešení přípravku	45
2.2.1 VARIANTA A	45
2.2.2 VARIANTA B	46
2.2.3 VARIANTA C	47
3 POČÍTAČOVÁ SIMULACE	51
3.1 Model geometrie	51
3.2 Kontakty.....	51
3.3 Konečnoprvková síť.....	52
3.4 Struktura zatížení přípravku.....	54
3.5 Deformace soustavy.....	54
3.6 Diskuze	55
ZÁVĚR.....	56
Seznam použitých zdrojů.....	57
Seznam použitých symbolů a zkratk	58
Seznam obrázků.....	59
Seznam grafů	60
Seznam tabulek.....	60
Seznam příloh	60

Úvod

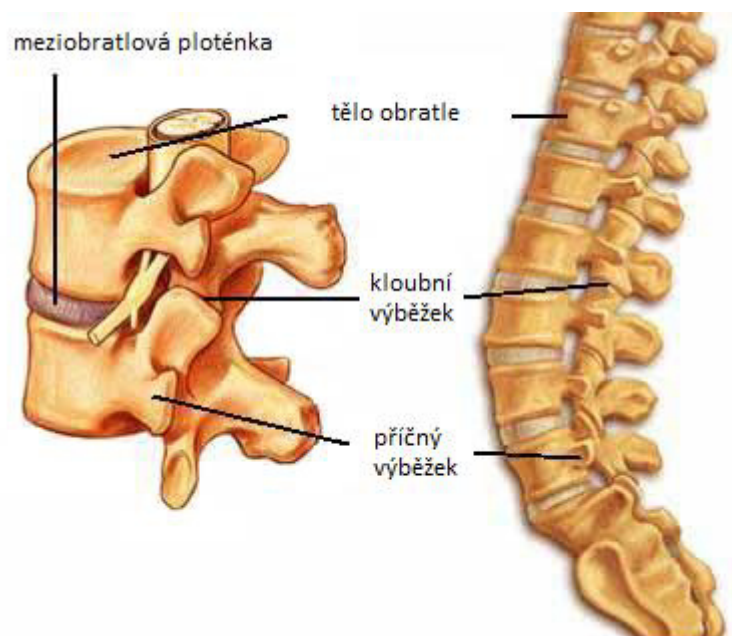
Jedním ze závažných typů poruch lidské kostry je poškození páteře. Tato část těla je základním kamenem lidského pohybu. Při různých poškozeních dochází k trvalým následkům. Část z nich lze v dnešní době řešit operačně, mnohé z nich však tímto způsobem řešit nejdou. Nové přístupy operačních zákroků jdou ruku v ruce s výzkumnými středy, která se zabývají vývojem biomedicínských prvků. Mezi nejčastější z nich patří různé implantáty pro náhradu již poškozených lidských částí. Jednou z těchto náhrad je TSLP fixátor používaný pro stabilizaci poškozeného páteřního segmentu. TSLP fixátor je univerzální systém pro stabilizaci hrudní a bederní páteře. Jeho účinnost se zkouší na vzorcích páteře prasete obecného, jehož páteřní stavba je blízká té lidské. Podobnou studii provedli i na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulty strojního inženýrství v Brně (ÚMTMB). Byly zkoumány tři stavy vzorku, neporušený, porušený a porušený fixovaný pomocí TSLP implantátu. Přípravek použitý pro zatěžování těchto stavů dosahoval zatížení tahem a ohybem, přičemž tah není vhodný.

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem přípravku, který má s využitím univerzálního zkušebního stroje zatěžovat vzorek tlakem a zejména ohybem. Je snahou omezit návrh pouze na mechanické prvky a vyhnout se tak použití pohonů a podobných podpůrných zařízení. Základní prvky přípravku budou navrženy na základě statického řešení soustavy těles vázané stykovými vazbami typu NNTN. Vhodný ověřený návrh bude následně zkonstruován s využitím softwaru SolidWorks a pro vytvoření představy chování se provede simulace pomocí MKP analýzy. Návrh přípravku bude následně zpracován výkresovou dokumentací a připraven pro výrobu.

1 REŠERŠNÍ ANALÝZA DOSTUPNÝCH ŘEŠENÍ

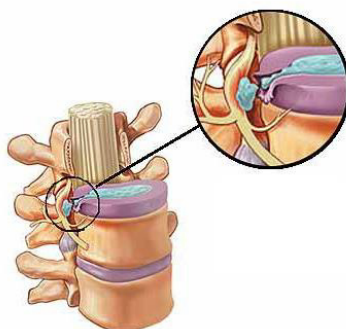
1.1 Uvedení do problematiky práce

Přípravek má sloužit k zatížení páteřního segmentu, který se skládá z obratlů a z meziobratlových plotének, viz obr. 1-1 (vlevo).



Obr. 1-1 Charakteristické prvky lidské páteře [1]

Meziobratlové ploténky tlumí nárazy a umožňují pohyb páteře. Případem porušení páteře je vyhręznutí meziobratlové ploténky. Na obr. 1-2 je tento problém popsán, přičemž detail znázorňuje následné stlačování vystupujícího nervového kořene. Po takovém porušení dochází k omezení pohyblivosti jedince. Přípravek má sloužit ke zkoumání míry funkčnosti stabilizátorů takto poškozené páteře.



Obr. 1-2 Vyhřeznutí meziobratlové ploténky [2]

1.2 Současné provedení přípravku na ÚMTMB

Následující kapitola vychází z [3]. Pro výzkum účinnosti implantátů vyvinutých ke stabilizaci porušené páteře byl sestrojen přípravek, pomocí kterého byl vzorek namáhán. Tato analýza se provedla na testovacím stroji ZWICK typu Z020 s rozsahem zatížení je ± 20 kN. Cílem experimentu bylo porovnat mechanické vlastnosti neporušeného, porušeného a fixovaného porušeného vzorku. Jednalo se o stabilizátory typu TSLP (Thoracolumbar Spine Locking Plate) zkoumaných na páteřním segmentu prasete obecného.



Obr. 1-3 Testovací stroj ZWICK Z020

Postupu při experimentu:

- a) Příprava vzorků
- b) Zatížení vzorků
- c) Závěr

ad a) Příprava vzorků

K experimentu bylo použito celkem 8 páteří z 16týdenních prasat domácích, které byly naděleny do segmentů o dvou obratlích a jedné meziobratlové ploténce i s vazy a výběžky, viz obr 1-1 (vlevo). Oba konce vzorku byly zality do forem látkou duracryl¹. Takto upravené zakončení vzorku se přišroubovalo k přípravku, viz obr. 1-5. Poškození vzorku bylo simulováno proříznutím meziobratlové ploténky skalpelem. Po provedení výzkumu na neporušeném a porušeném vzorku se vzorky zajistili fixátory přišroubovaným k tělům obratlů. Systém využívá 4,5 mm vysokého profilu o délce od 40 do 109 mm a pro uchycení ke vzorku je opatřen speciálními šrouby.

¹ Duracryl je samopolymeryjící síťovaná bazální pryskyřice vyznačující se vysokou pevností v ohybu a pevným spojením [4]

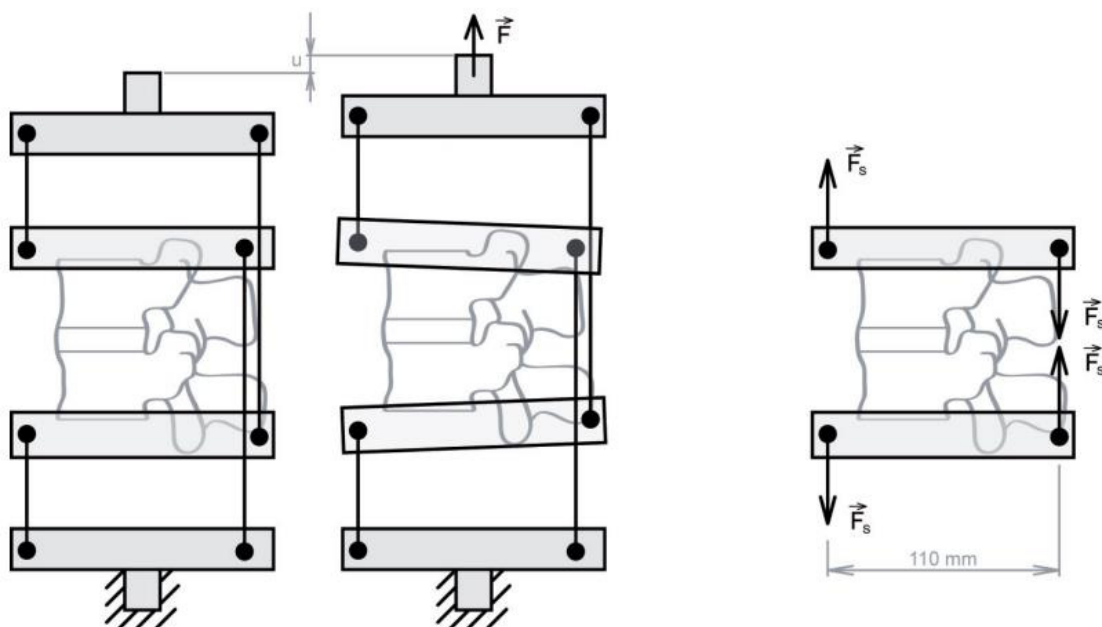
ad b) Zatížení vzorku

Návrh přípravku a jeho výroba se prováděla s ohledem na použitelnost na standardním zkušebním stroji. Při klasické tahové zkoušce je vzorek zatěžován silovými dvojicemi. Vzhledem k pozici vzorku tyto silové dvojice simulují natahování a dvouosé ohýbání vzorku. Uchycení vzorku znázorňuje obrázek 1-4. Při zatížení přípravku vnější silou F ($F = 200 \text{ N}$) dochází u horní i dolní desky přípravku k zatížení dvěma silami. Síla $F_s = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$ tvoří silovou dvojici $M = F_s \cdot d = 100 \cdot 0,11 = 11 \text{ Nm}$. Toto zatížení simuluje namáhání vzorku tahem a ohybem. Modely stavu vzorku popisuje obr. 1-5.

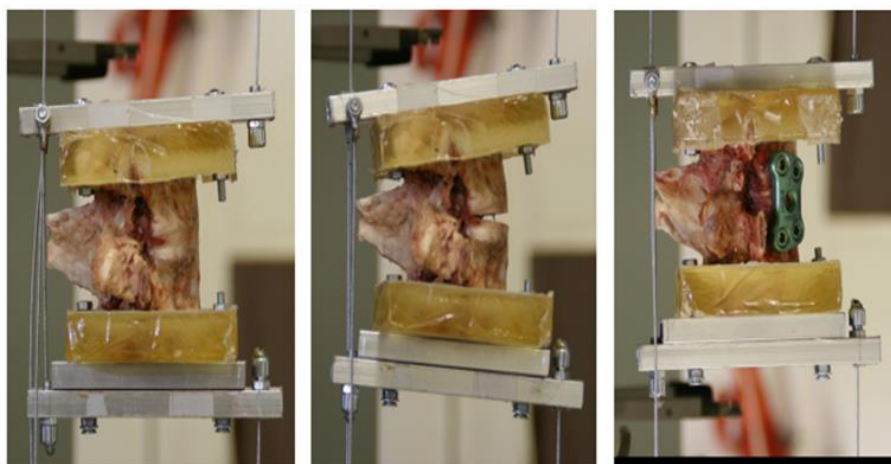
Průběh zkoušky:

- Upevnění neporušeného vzorku v přípravku a zatížení tahovou silou $F = 200 \text{ N}$.
- Odečtení posuvu testovacího stroje “ u “, viz obr. 1-4.
- Zatížení porušeného vzorku posuvem odpovídající posuvu “ u “ při zatížení neporušeného vzorku.
- Namáhání porušeného zafixovaného vzorku měrou odpovídající posuvu “ u “ pro neporušený vzorek.
- Zatížení silou $F = 200 \text{ N}$.

Naměřené hodnoty síly a parametry namáhání sedmi vzorků, pro každý z testovacích stavů, jsou vyhodnoceny v tab. 1-1. Síly F byly převedeny na hodnoty odpovídající silovým dvojicím a dále se využili pro statistické zhodnocení v tab. 1-1. Hodnoty momentů, jež jsou uvedeny v tab. 1-1, byly rozděleny do tří skupin odpovídajících uvedeným stavům vzorku, jsou uvedeny v grafu 1-1.



Obr. 1-4 Schéma přípravku se zatíženým / nezatíženým vzorkem [3]

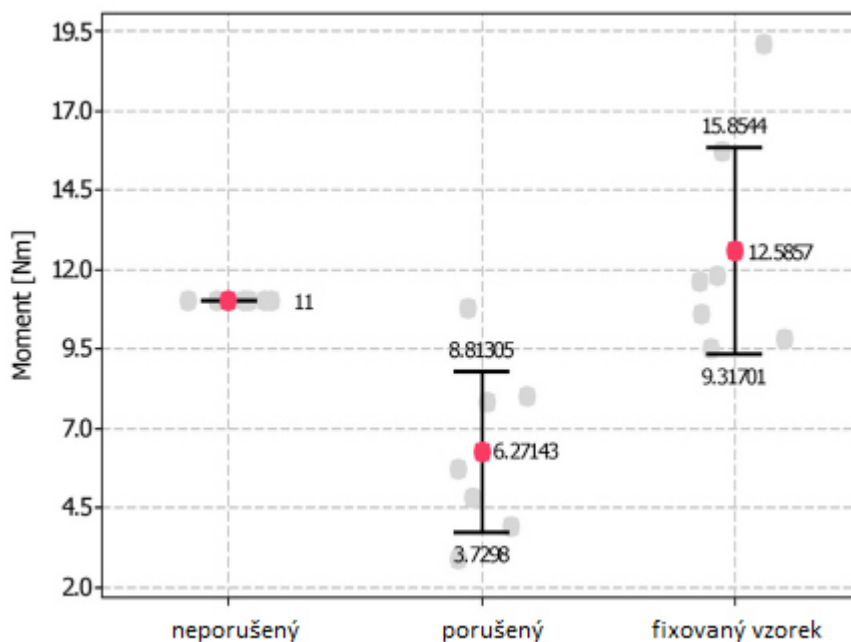


Obr. 1-5 Neporušený, porušený a porušený fixovaný vzorek [3]

Tab. 1-1 Naměřené hodnoty experimentu [3]

Vzorek	Hodnota	Stav vzorku			
		Neporušený	Porušený	Fixovaný	
1	síla [N]	200	103	215	200
	posunutí [mm]	4,9	4,9	4,9	3,5
	moment [Nm]	11	5,7	11,8	11
2	síla [N]	200	146	348	200
	posunutí [mm]	7,8	7,8	7,8	4,4
	moment [Nm]	11	8	19,1	11
3	síla [N]	200	53	173	200
	posunutí [mm]	5,1	5,1	5,1	5,6
	moment [Nm]	11	2,9	9,5	11
4	síla [N]	200	142	285	200
	posunutí [mm]	6,1	6,1	6,1	4,2
	moment [Nm]	11	7,8	15,7	11
5	síla [N]	200	197	210	200
	posunutí [mm]	7,5	7,5	7,5	6
	moment [Nm]	11	10,8	11,6	11
6	síla [N]	200	70	178	200
	posunutí [mm]	6,6	6,6	6,6	5,1
	moment [Nm]	11	3,9	9,8	11
7	síla [N]	200	87	193	200
	posunutí [mm]	6	6	6	5,5
	moment [Nm]	11	4,8	10,6	11

V tabulce síla, posunutí a moment odpovídají vnější síle F , vertikálnímu posunutí stroje “ u ” a momentu zatěžující vzorek.



Graf 1-1 Interval rozptylu hodnot s pravděpodobností 95 %;
Červené body – střední hodnota, šedé body – naměřené hodnoty (dle stavu vzorku)
[3]

Tab. 1-2 Výhody a nevýhody stávajícího přípravku

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá konstrukce	Nízká tuhost soustavy
Nízké výrobní náklady	Nízká životnost táhel - drátů
Zatížení vzorku ohybem	Zatížení vzorku tahem

Závěr

Cílem této studie bylo porovnat mechanické vlastnosti neporušeného, porušeného segmentu páteře a segmentu páteře stabilizovaného TSLP Synthes implantátem. Úlohy byly řešeny experimentálně za použití testovacího stroje ZWICK, který simuloval zatížení pro několik stavů páteřního segmentu. Přípravek pro simulaci zatěžování vzorku ohybem a tahem byl navržen tak, aby byl použitelný na standartním zkušebním stroji. Navzdory omezení počtu podobných vzorků a trvání přípravy vzorků pro experiment, byly demonstrovány příznivé mechanické vlastnosti TSLP Synthes fixátoru. Výsledky se využijí pro následující počítačové modelování segmentu páteře ve všech experimentálně řešených stavech. Pro zpracování dat se využil software MINITAB 15.

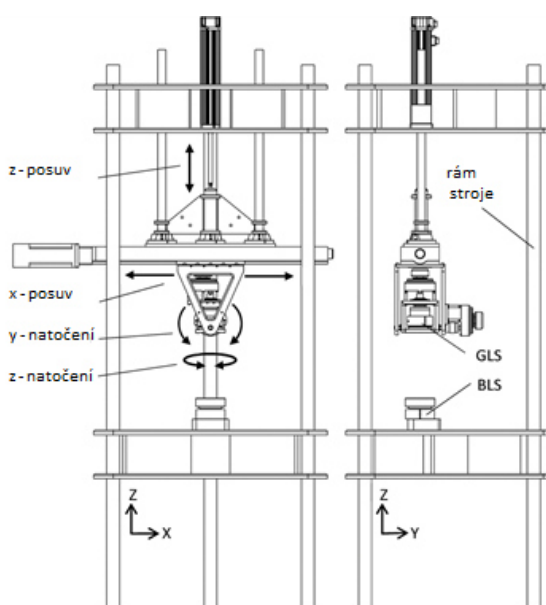
1.3 Přehled dostupných řešení.

1.3.1 Zatížení páteřního segmentu pomocí pohonů

Studie pojednává o zatěžování obratlového segmentu pomocí počítačem řízeného mechanismu měnícího trajektorii působíště síly zatěžující vzorek. Přípravek se skládá ze stacionárních a nestacionárních prvků. Vycházíme z [5].

Cíle práce:

- Vyhodnocení jednoduchého testu páteřního segmentu.
- Vývoj algoritmu zatěžování vzorku silou, jejíž trajektorie se mění v závislosti na čase.
- Vytvořit aplikaci Pilot Test, která by umožnila zatěžovat vzorek pouze momentem.



Obr. 1-6 Schéma programovatelného mechanismu [5]

Mechanismus – použité prvky

Samotný přípravek tvoří trojúhelníkový rám, upnutí vzorku a čep mezi rámem a tímto upnutím. Dále je přípravek opatřen kloubovým snímačem zatížení (GLS). Ke zkušebnímu stroji a přípravku jsou přidána zařízení umožňující další složené pohyby vzorku. Těmito zařízeními jsou:

- Převodový servomotor Kollmorgen 9FG - natočení kolem osy y
- Lineární pohon Parker 406XR – kuličkový šroub - posuv ve směru osy x
- Lineární pohon Exlar GSX-30 – válečkový šroub - posuv ve směru osy z

Součástí zkušebního stroje je příslušenství umožňující rotaci kolem osy z, čili krut vzorku. Při zatížení vzorku lze tedy využívat až 4 stupně volnosti soustavy.

Senzory

Na obr. 1-6 jsou senzory GLS a BLS. GLS senzor byl nainstalován do horního upnutí vzorku, BLS zase do dolního upnutí.

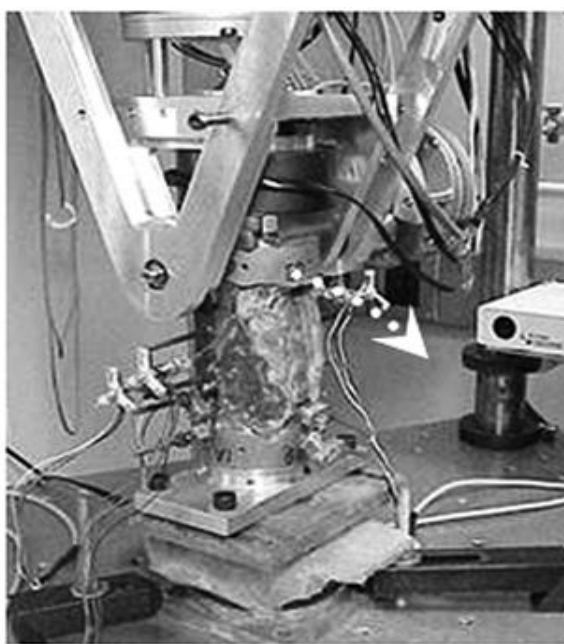
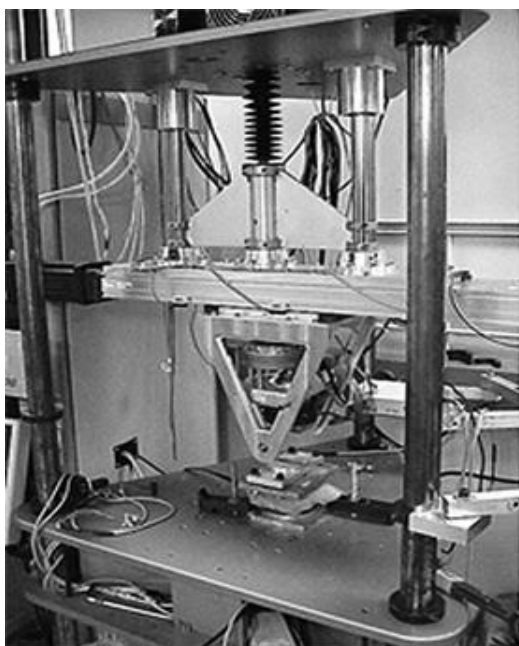
GLS – senzor zkoumající natáčení horního upnutí vzorku kolem čepu rámu.

BLS – senzor zkoumající zatížení části vzorku upnutého k pevné části stroje.

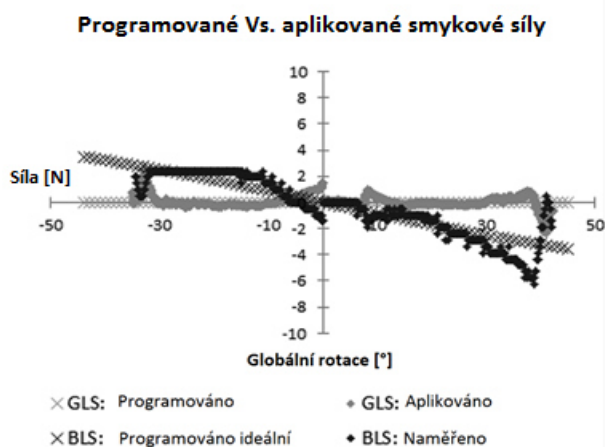
Zatížení vzorku

Lineární válečkový pohon je spojen s horní pevnou deskou testovacího stroje a k jeho pohyblivému konci je nepřímě spjat kuličkový pohon. Přípravek je uchycen ke kuličkovému pohonu. K přípravku je upevněn servomotor.

Zakončení testované součásti jsou ustavena v upínkách. Horní část vzorku je čepem spojena s přípravkem. Spodní část vzorku je připevněna ke stolu stroje pomocí upínek.



Obr. 1-7 Testovací zařízení bez a s upnutým vzorkem, šipka vpravo ilustruje směr ohybu vzorku [5]

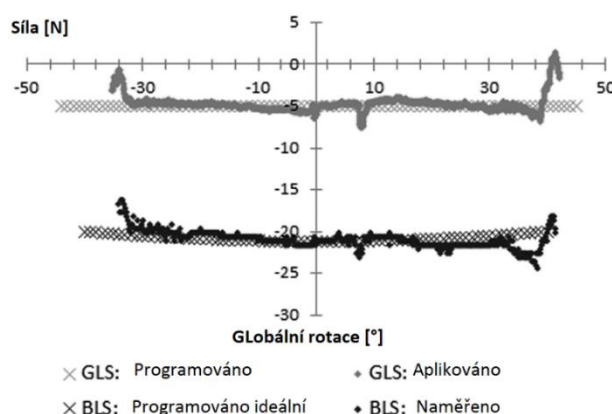


Graf 1-2 Závislost smykové síly vzorku na úhlu natočení [5]

Tab. 1-3 Zatížení vzorku smykem [5]

Aplikované	Síla [N]	Globální rotace [°]
min.	-3	- 35
max.	2,5	38
Rozsah	5,5	73
Naměřené		
min.	-6,8	-34
max.	3	38
Rozsah	9,8	72

Programované Vs. aplikované tlakové síly

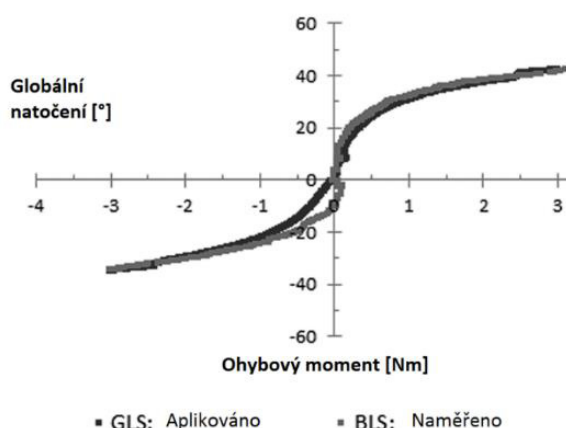


Graf 1-3 Závislost tlakové síly vzorku na úhlu natočení [5]

Tab. 1-4 Zatížení vzorku tlakem [5]

Aplikované	Síla [N]	Globální rotace [°]
min.	-7	- 36
max.	3	43
Rozsah	10	79
Naměřené		
min.	-25	-33
max.	-14	42
Rozsah	11	75

Globální ohýbání vzorku



Graf 1-4 Závislost momentu vzorku na úhlu natočení [5]

Tab. 1- 5 Zatížení vzorku ohybem [5]

Aplikované	Moment [Nm]	Globální rotace [°]
min.	-3,1	- 35
max.	3,1	45
Rozsah	6,2	80
Naměřené		
min.	-25	-46
max.	-14	36
Rozsah	11	82

Na vzorek působí zároveň smyk, tlak i ohyb. Hodnoty naprogramovaného a reálného zatížení se liší, viz graf 1-2, 3, 4. Chyba mezi nastavenými a naměřenými hodnotami zatížení ukazuje v tab. 1-3,4,5. Maximální hodnota momentu zatěžující vzorek je cca 3 Nm.

Tab. 1-6 Výhody a nevýhody testovacího zařízení

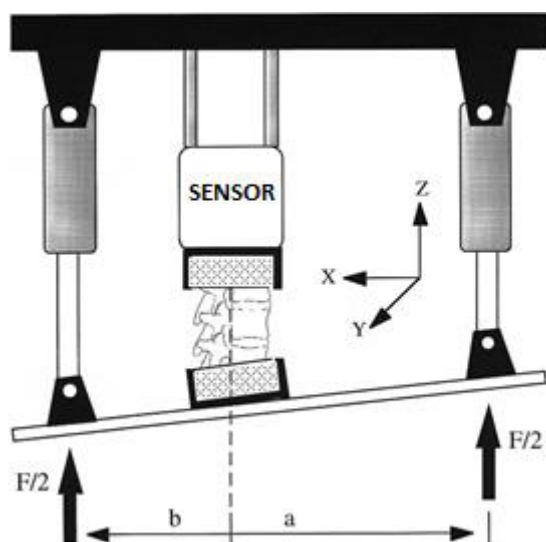
Výhody	Nevýhody
Velká tuhost mechanismu	Náročnost provedení mechanismu
Dosažení libovolné trajektorie pohybu	Vysoké náklady na přídatná zařízení
Omezení délky vzorku pouze konstrukcí testovacího stroje	Zatížení přípravku smykem

Závěr

Na testovacím zařízení se podařilo naměřit zatížení vzorku pomocí několika senzorů snímajících jeho chování. Výsledky budou využity pro následující vývoj aplikace Pilot Test. Mezi hlavní zkoumané parametry testu patří hodnoty tlakové síly a ohybového momentu vzorku. V této studii se však dopouštějí chyby, jelikož v praxi je páteř zatěžována pouze tlakem a ohybem, nikoliv smykem.

1.3.2 Zatížení páteřního segmentu pomocí hydraulických prvků

Systém zkoumá vlivu metastáze na stabilitu páteře. Zejména se využívá pro simulaci fraktury páteřního segmentu. Vycházíme z [6].



Skládá se ze zkušebního stroje, dvou pístnic, desky a upínek vzorku. Je také opatřen snímačem zaznamenávajícím zatížení vzorku, viz obr. 1-8. Toto zařízení snímá posunutí ve třech směrech a natočení kolem tří os. Spodní upínka vzorku je upevněna s určitým natočením kolem osy y. Osa rotace je umístěna podél hranice zadní části páteřního segmentu, na obrázku je ohraničena přerušovanou čarou. Zatížení vznikají stlačováním pístnic upevněných k desce. Každá pístnice vyvolává sílu působící na různých ramenech. Systém využívá kombinaci ohýbání a stlačování páteřního segmentu.

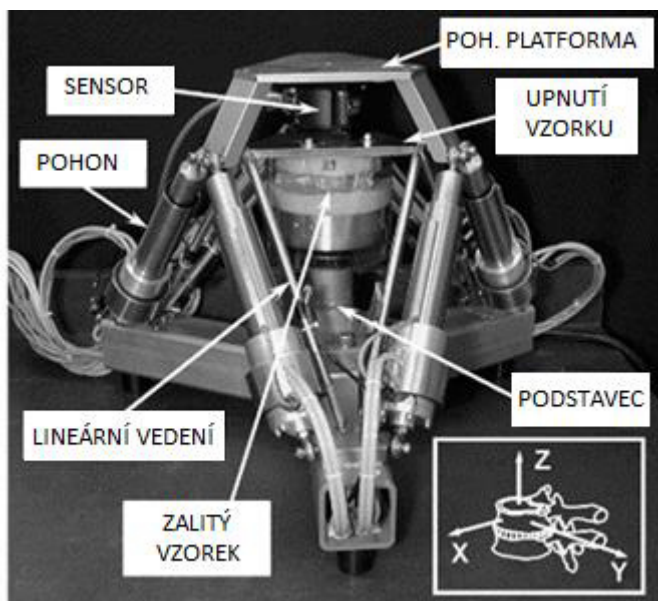
Obr. 1-8 Hydraulické testovací zařízení [6]

Tab. 1-7 Výhody a nevýhody hydraulického testovacího zařízení

Výhody	Nevýhody
Velká tuhost mechanismu	Náklady na hydraulické prvky
Vzorek je ohýbán a stlačován	Nastavení zatížení vzorku
Omezení délky vzorku pouze konstrukcí testovacího stroje	

1.3.3 Zatížení páteřního segmentu pomocí tzv. šestinohého systému.

System byl využit pro simulaci zatížení páteře a vývoj páteřních implantátů. System dovede zatížit vzorek posuvy ve třech osách a natočením kolem tří os. Vycházíme ze [7].



Prvky systému popisuje obr. 1-9, kde je vyobrazen celý mechanismus. Součástí pohonu je šest pístnic, jejichž pohybem dochází k namáhání vzorku. Nastavení zatížení vzorku řídí počítač [8].

Obr. 1-9 Tzv. šestinohé testovací zařízení [7]

Tab. 1-8 Výhody a nevýhody tzv. šestinohého testovacího zařízení

Výhody	Nevýhody
Přesnost pohybu mechanismu	Pořizovací náklady na zařízení.
Univerzálnost zatížení vzorku	Poměrně složité nastavení zatížení vzorku.
Omezení délky vzorku pouze konstrukcí testovacího stroje	

2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Tato kapitola pojednává o problematice vzniklé při vývoji přípravku, který by vyhovoval několika předpokladům.

Předpoklady:

- 1) Vzorek má být stlačován a zároveň ohýbán.
- 2) Tuhost soustavy.
- 3) Omezení pouze na mechanické prvky, žádná přídavná zařízení konající pohyb (pohony).
- 4) Omezené ohýbání horního upnutí přípravku ke stroji.
- 5) Rychlá montáž vzorku na přípravek i jeho následná demontáž.
- 6) Univerzálnost přípravku pro různé velikosti vzorku (dle parametrů UZS).
- 7) Velikost zatěžující síly působící na vzorek se odvíjí od reálného zatížení.
- 8) Dosažení velikosti ohybového momentu o hodnotě 3 Nm a více.
- 9) Pro krut vzorku se využívá otočná horní čelist.

2.1 Návrhy přípravku

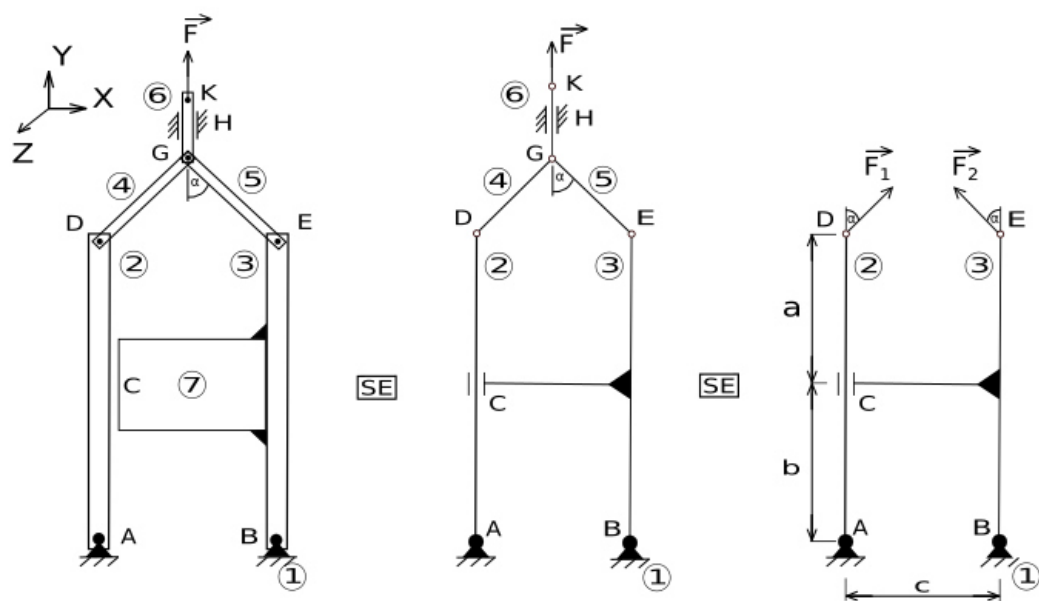
K návrhům přípravku bylo přistupováno jako ke statickému řešení soustavy těles vázané stykovými vazbami typu NNTN². Vycházíme z [9].

Algoritmus výpočtu:

- 1) Rozbor zadání
- 2) Uvolnění těles soustavy
- 3) Statický rozbor
- 4) Sestavení podmínek statické rovnováhy a jejich řešení
- 5) Rozbor výsledků řešení
- 6) Nastavení zatížení vzorku

² Vazba NNTN je styková vazba, jejíž styk je charakterizován: N – neprostupností, N – neproměnností, T – tlakovostí, N – neutrálností. Vazba NNTN je vazbou s nejjednodušším modelem styku, jestliže prostupnost, deformace, spojení těles, hranice klidové stability a ztrátová energie ve styku u skutečného styku jsou natolik malé, že jsou z hlediska řešeného problému nepodstatné.[9]

2.1.1 Zadání 1



Obr. 2-1 Schéma zadání 1

Soustava těles podle obrázku má být nepohyblivá a staticky určitá. Cílem bylo zkontrolovat podmínky zadání a výpočtem určit stykovou sílu a moment ve vazbě C. Těleso 7 představuje vzorek. Mezi tělesy 3 a 7 je pevná vazba. Tělesa 3 a 7 vytváří jedno těleso označeno jako 3.

Zadané hodnoty:

$$F = 200 \text{ N}$$

$$\alpha = 50^\circ$$

$$a = 0,1 \text{ m}$$

$$b = 0,1 \text{ m}$$

$$c = 0,1 \text{ m}$$

³ Hodnota úhlu $\alpha = 50^\circ$ je uvažována pro vzorek o délce 0,1 metru. Zvětší-li se vzorek, bude větší i úhel α .

ad 1) Rozbor zadání:

- a) Z hlediska úplnosti a správnosti.
Geometrie soustavy, vazby a silový prvek F je zadán úplně a správně.
- b) Z hlediska prostorového uspořádání soustavy.
Úloha je zadána jako rovinná.
- c) Volba označení – viz obr. 2-1
- d) Klasifikace členů
2 – ternární zatížený člen
3 – ternární zatížený člen
Soustava neobsahuje degenerovaný člen.
- e) Klasifikace vazeb
A, B – rotační kinematické dvojice – $\xi_i = 2$
C – posuvná kinematická dvojice – $\xi_i = 2$
- f) Určení pohyblivosti soustavy
Počet členů soustavy $n = 3$,
předpokládaný počet omezených deformačních parametrů $\eta = 0$.

Body d), e), f) tvoří kinematický rozbor.

$$i = (n - 1) \cdot i_v - \left(\sum \xi_i - \eta \right)$$

i – počet stupňů volnosti soustavy
 η – počet omezených deformačních parametrů
 i_v – počet stupňů volnosti volného tělesa
 $\sum \xi_i$ – počet stupňů volnosti odebraných vazbami
 $(n - 1)$ – počet těles bez základního tělesa

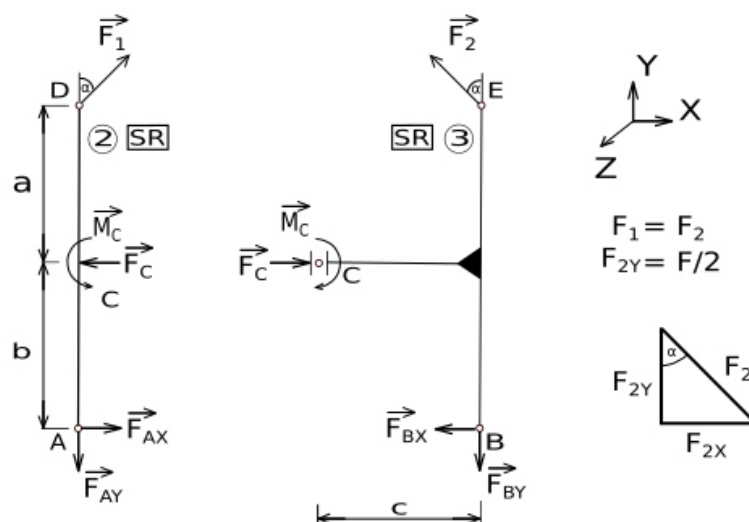
$$i = (3 - 1) \cdot 3 - (2 + 2 + 2 - 0) = 6 - 6 = 0^\circ V$$

$$\eta = 0$$

Soustava těles je uložena nepohyblivě bez omezení deformačních parametrů.

ad 2) Uvolnění těles soustavy

Členy jsou úplně uvolněny (ÚU) s respektováním principu akce a reakce, platí pro všechny následující uvolnění.



Obr. 2-2 ÚU zadání 1

ad 3) Statický rozbor

I. Určení π , π_R a NP, kde:

- π – soustava úplně zadaných silových prvků
- π_R – soustava neúplně určených silových prvků
- NP – množina neznámých nezávislých parametrů

$$\pi = \{ \vec{F}_1, \vec{F}_2 \} \quad \pi_R = \{ \vec{F}_A, \vec{F}_B, \vec{F}_C, \vec{M}_C \}$$

$$NP = \{ F_{AX}, F_{AY}, F_{BX}, F_{BY}, F_C, M_C \}$$

$$\mu_F = 5, \mu_M = 1, \mu = 6$$

II. Určení počtu použitelných podmínek statické rovnováhy

Na těleso 2 a 3 působí obecná rovinná soustava sil $\gg v_i = 3$.

$$v = \sum v_i = 6; \quad v_F = 4; \quad v_M = 2$$

III. Ověření nutné podmínky statické určitosti:

$$\mu = v \wedge \mu_r + \mu_M \leq v_M$$

$$6 = 6 \wedge 0 + 1 < 2$$

Nutná podmínka statické určitosti je splněna, má smysl pokračovat ve statickém řešení.

ad 4) Sestavení podmínek statické rovnováhy a jejich řešení

TĚLESO 2

$$F_X : F_1 \cdot \sin \alpha + F_{AX} - F_C = 0$$

$$F_Y : F_1 \cdot \cos \alpha - F_{AY} = 0$$

$$M_{ZA} : F_C \cdot b + M_C - F_1 \cdot \sin \alpha \cdot (a + b) = 0$$

TĚLESO 3

$$F_X : F_C - F_2 \cdot \sin \alpha - F_{BX} = 0$$

$$F_Y : F_2 \cdot \cos \alpha - F_{BY} = 0$$

$$M_{ZB} : F_2 \cdot \sin \alpha \cdot (a + b) - F_C \cdot b - M_C = 0$$

Maticový zápis soustavy rovnic:

$$A \cdot x = B$$

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_C \\ M_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ F_{1X} \cdot (a + b) \\ F_{2X} \\ F_{2Y} \\ F_{2X} \cdot (a + b) \end{vmatrix}$$

Vyjádření známých veličin B:

$$F = 200 \text{ N}, \alpha = 50^\circ$$

$$F_1 = F_2 = \frac{F}{2 \cdot \cos \alpha} = 156 \text{ N}$$

$$F_{1X} = F_{2X} = 0,5 \cdot F \cdot \tan \alpha = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{1Y} = F_{2Y} = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$$

Vyjádření neznámých veličin x:

Tato soustava rovnic nemá řešení, protože matice A je singulární.

Z toho důvodu k ní nelze vytvořit matici inverzní, a tak zjistit neznámé veličiny.

Bylo třeba přehodnotit pohyblivost soustavy a statický rozbor.

Momentové rovnice rovnováhy k bodu A a B jsou totožné, protože $F_{1X} = F_{2X}$. Proto tvoří pouze jednu rovnici. V tomto důsledku bude podmínka statické určitosti vypadat takto:

$$\mu = \nu \wedge \mu_r + \mu_M \leq \nu_M$$

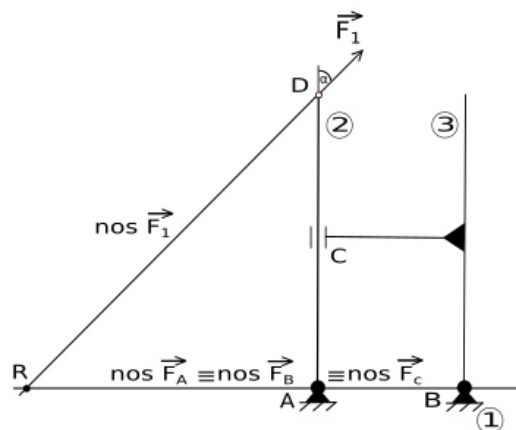
$$6 \neq 5 \wedge 0 + 1 = 1$$

Jedná se tedy o úlohu staticky **neurčitou**.

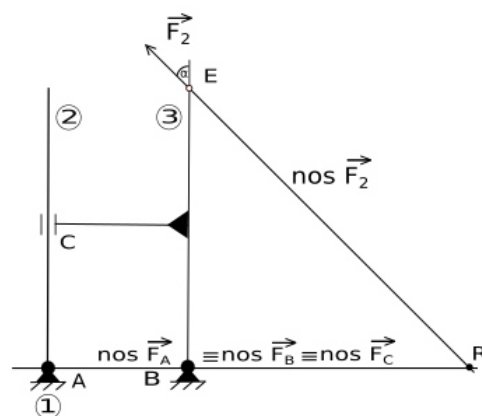
ad 5) Rozbor výsledků řešení

Pro určení pohyblivosti soustavy a statické (ne)určitosti byla použita grafika s využitím věty o superpozici.

A + B viz obr. 2-1 (vpravo)



Obr. 2-3 Superpozice – část A



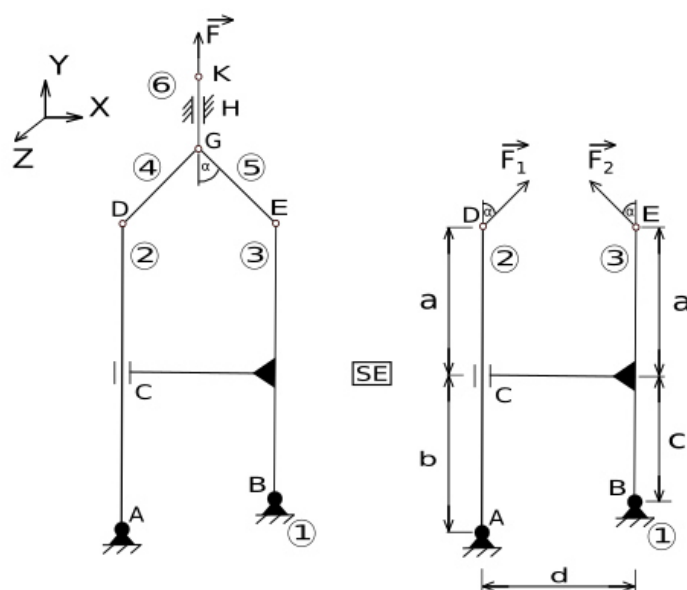
Obr. 2-4 Superpozice – část B

Graficky bylo zjištěno, že nositelky síly F_A , F_B , F_C jsou totožné. Tělesa 2 a 3 tedy nemohou nikdy být v rovnováze. Takto zadanou úlohu nelze na úrovni statického výpočtu řešit.

ad 6) Nastavení zatížení vzorku

Vzhledem k neřešitelnosti úlohy na úrovni statiky není možno nastavit zatížení vzorku.

2.1.3 Zadání 2



Obr. 2-5 Schéma zadání 2

ad 1) Rozbor zadání:

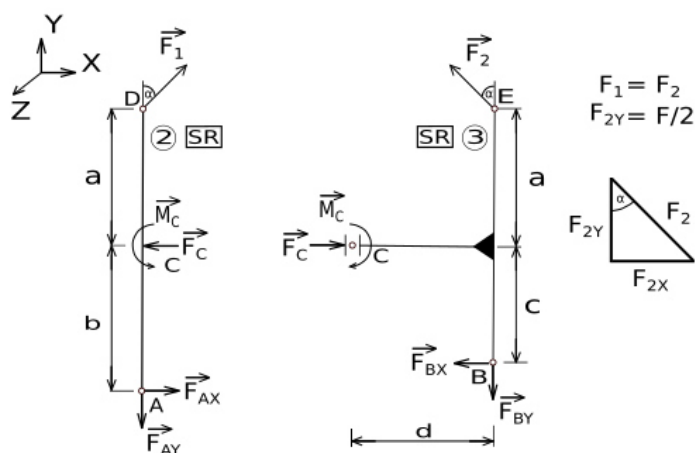
Obdobně jako u zadání 1 je nejprve uvažováno nepohyblivé uložení soustavy těles bez omezení deformačních parametrů.

Počet stupňů volnosti soustavy: $i = 0^\circ V$

Počet omezených deformačních parametrů: $\eta = 0$

Soustava těles je uložena nepohyblivě bez omezení deformačních parametrů.

ad 2) Uvolnění těles soustavy



Zadané hodnoty:

$$\begin{aligned} F &= 200 \text{ N} \\ \alpha &= 50^\circ \\ a &= 0,1 \text{ m} \\ b &= 0,1 \text{ m} \\ c &= 0,08 \text{ m} \\ d &= 0,1 \text{ m} \\ \Delta &= b - c \\ &= 0,02 \text{ m} \end{aligned}$$

Obr. 2-6 ÚU zadání 2

ad 3) Statický rozbor

Uvažujeme stejný předpoklad jako pro zadání 1.

Podmínka statické určitosti:
$$\begin{aligned} \mu &= \nu \wedge \mu_r + \mu_M \leq \nu_M \\ 6 &= 6 \wedge 0 + 1 < 2 \end{aligned}$$

Podmínka splněna, uložení soustavy je staticky **určité**.

ad 4) Sestavení podmínek statické rovnováhy a jejich řešení

Maticový zápis soustavy rovnic: $A \cdot x = B$

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_C \\ M_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ F_{1X} \cdot (a + b) \\ F_{2X} \\ F_{2Y} \\ F_{2X} \cdot (a + c) \end{vmatrix}$$

Vyjádření známých veličin B:

$$F = 200 \text{ N}$$

$$F_1 = F_2 = \frac{F}{2 \cdot \cos \alpha} = 155,6 \text{ N}$$

$$F_{1X} = 0,5 \cdot F \cdot \tan \alpha = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{1Y} = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$$

$$F_{2X} = 0,5 \cdot F \cdot \tan \alpha = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{2Y} = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$$

Vyjádření neznámých veličin x:

$$F_{AX} = 0 \text{ N};$$

$$F_{AY} = 100 \text{ N}$$

$$F_{BX} = 0 \text{ N}$$

$$F_{BY} = 100 \text{ N}$$

$$F_C = 119,2 \text{ N} \dots F_C = F_{1X} = F_{2X}$$

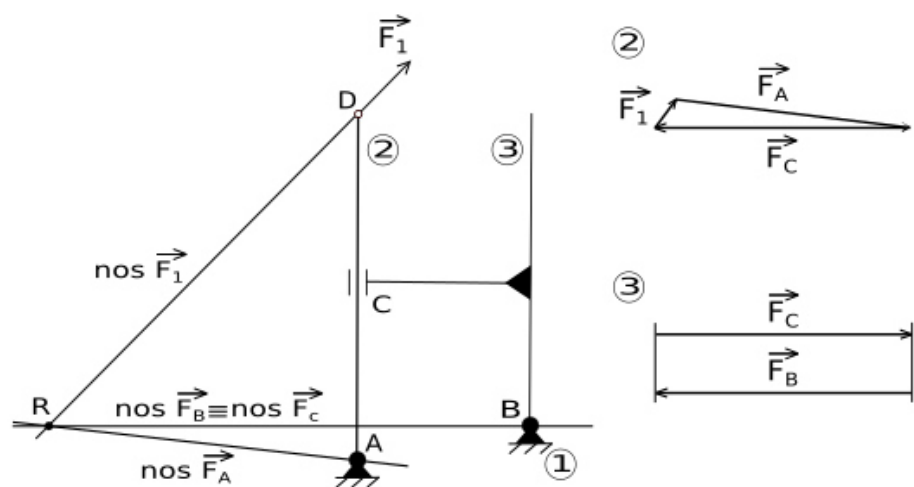
$$M_C = 12 \text{ Nm}$$

ad 5) Rozbor výsledků řešení

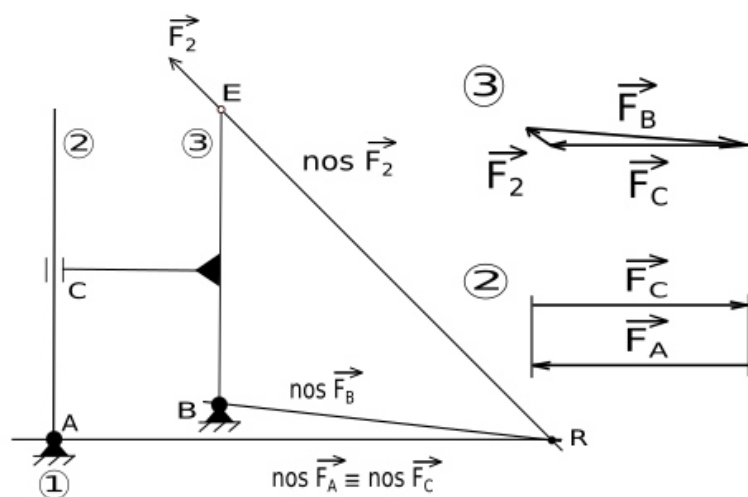
Dle výše uvedeného předpokladu má být vzorek zatížen tlakem a ohybem. Vzorek je stlačován a ohýbán, přičemž výsledná síla F_C působící na vzorek není závislá na polohování výšky osy vzorku. To umožňuje nastavit sílu a moment působící na vzorek nezávisle na sobě. Síla F_C je rovna x-ové složce síly F_1 (F_2). Předpoklad zatížení vzorku je splněn.

Zatížení vazeb A a B působí pouze ve vertikální ose jako reakce na zatěžující sílu F . Reakční síly ve směru osy x jsou tedy nulové. Byly zkoumány obě varianty $c < b$ a $c > b$, nicméně s využitím stejného rozdílu polohy vazeb A a B v z -ovém směru ($\Delta = 20 \text{ mm}$) se výsledné hodnoty sil a momentu nijak nelišili. Byla zvolena varianta $c < b$.

A + B viz obr. 2-6



Obr. 2-7 Superpozice- část A



Obr. 2-8 Superpozice- část B

Tab. 2-1 Výsledky hodnot superpozice zadání 2

	A	B	A+B
F_1 [N]	155,6	0	155,6
F_2 [N]	0	155,6	155,6
F_{AX} [N]	1 072,6	-1 072,6	0
F_{AY} [N]	100	0	100
F_{BX} [N]	1 191,8	-1 191,8	0
F_{BY} [N]	0	100	100
F_C [N]	1 191,8	-1 072,6	119,2
M_C [Nm]	-95,3	107,3	12

Působí-li na soustavu síla F_1 , pak je těleso 3 binárně nezatížené. U tohoto tělesa známe směr nositelky síly F_C a bod nositelky síly F_B . Na základě věty o dvou silách určíme, že nositelka síly F_B je totožná s nositelkou síly F_C , viz obr. 2-7. Na těleso 2 působí síla F_1 , F_A , F_C . Známe sílu F_1 úplně, dále známe nositelku síly F_C a bod nositelky síly F_A . Podle věty o třech silách se nositelky všech sil musí protínat v jednom bodě. Průsečík nositelky síly F_1 a F_C je bod R. Tímto bodem musí procházet nositelka síly F_A . Spojení bodem A a R obdržíme nositelku síly F_A . Protože známe sílu F_1 úplně a známe nositelku síly F_A a F_C , můžeme sestavit silový obrazec, viz obr. 2-7.

Při zatížení soustavy silou F_1 je vzorek stlačován, při zatížení F_2 je vzorek natahován. Síla F_C (část A) překonala sílu F_C (část B) a tím byla splněna podmínka stlačení vzorku. Kladný moment vzorku (část A) překonal záporný moment vzorku (část B) a tím se stal výsledný moment kladným.

Z těchto závěrů je patrné, že zavedení rozdílu rozměrů c a b je vhodnější, než zkrácení tělesa 5 vzhledem k tělesu 4. U tohoto přípravku se podařilo dodržet veškeré předpoklady a to v porovnání s ostatními i zamezení působení síly kolmo na horní upnutí přípravku k UZS⁴.

ad 6) Nastavení zatížení vzorku

Pro výpočet výsledného zatížení vzorku byl ze známé soustavy rovnic vytvořen program v prostředí MATLAB, viz příloha č. 1. Maticovým výpočtem bylo získáno výše uvedené řešení odpovídající zadání úlohy. To však nestačí pro případ, kdy je třeba zvolit hodnotu zatěžující síly přípravku F při požadovaném zatížení vzorku silou F_C a momentem M_C . Pro tyto účely byla sestavena inverzní úloha o soustavě rovnic, viz příloha č. 2, jejíž obecné řešení popisuje tab. 2-2.

Tab. 2-2 Inverzní řešení zadání 3

Zadané parametry:	Získané veličiny:
Úhel α – dle délky vzorku	Síla F
Síla F_C	Parametr b
Moment M_C	Parametr c
Vzdálenost a+b	
Vzdálenost a+c	

Výsledné hodnoty b a c popisují polohu osy vzorku, do které je vzorek třeba umístit. Pro tento postup potřebuje obsluha využívat výpočetní techniku, zejména program MATLAB, a úhloměr pro změření úhlu α . Výpočet je vhodný pro určení zatížení na vzorcích o různých délkách.

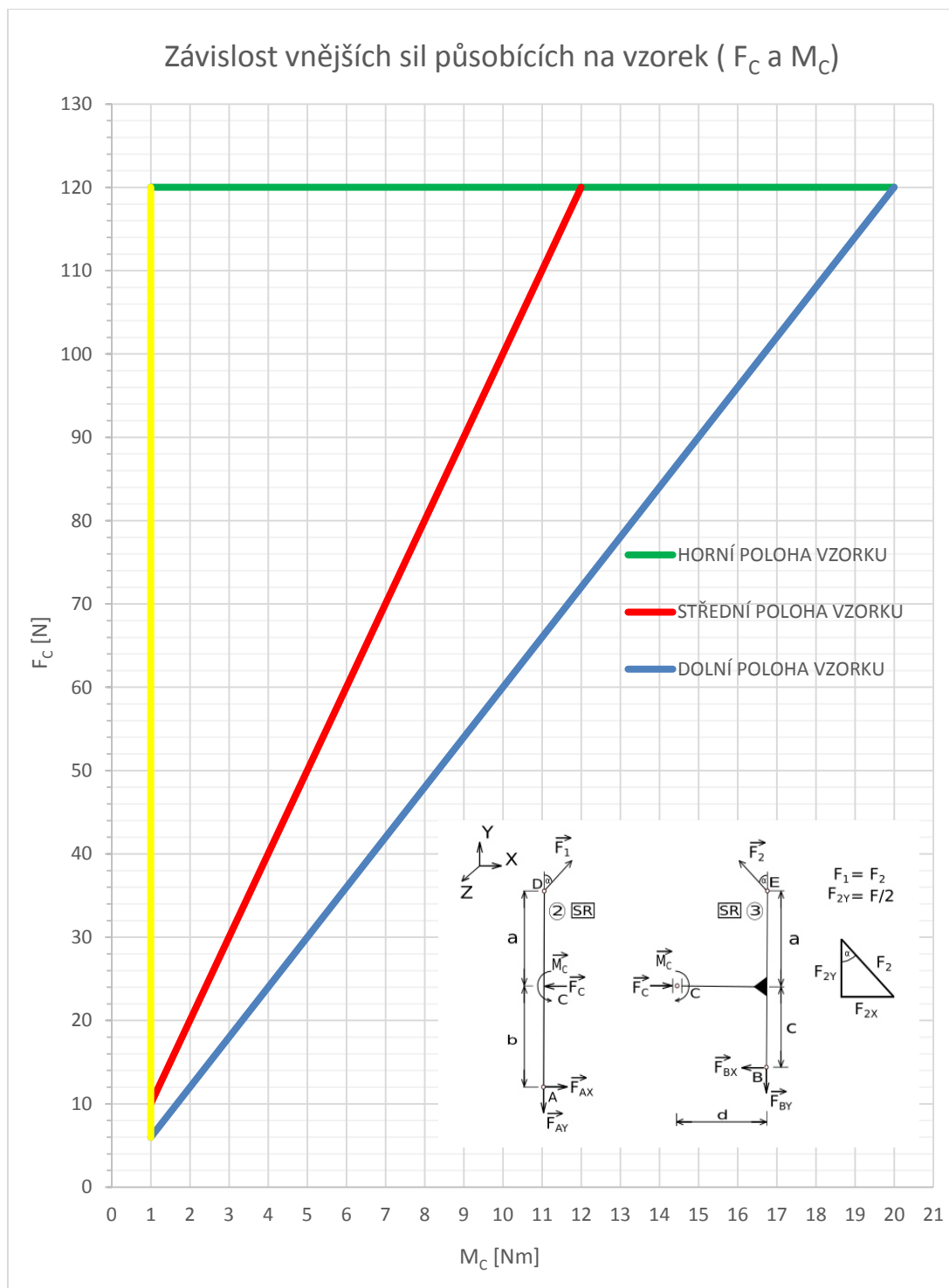
Pro zatěžování jednoho vzorku o určité délce je vhodnější sestavit grafy, ve kterých obsluha stroje vyčte potřebné údaje pro nastavení zvoleného zatížení vzorku. Pro vytvoření těchto grafů je nezbytné určení poměru mezi F_C a M_C pro dané polohy osy vzorku. Tento poměr získáme při výpočtu inverzního řešení vzájemnými změnami hodnot mezi těmito dvěma veličinami. Výpočet byl ukončen při dosažení výsledných hodnot b a c, odpovídajících horní, střední a dolní poloze osy vzorku, viz příloha č. 2. Výsledky shrnuje tab. 2-3.

⁴ UZS – Univerzální zkušební stroj.

Tab. 2-3 Pracovní oblast přípravku pro zatěžování vzorku

Poloha osy vzorku	Poměr $F_C : M_C$	Rozsahy hodnot rozměrů		
		a [m]	b [m]	c [m]
Horní	120:1	0,0088	0,1917	0,1717
Střední	10:1	0,1	0,1	0,08
Dolní	6:1	0,1667	0,0333	0,01333

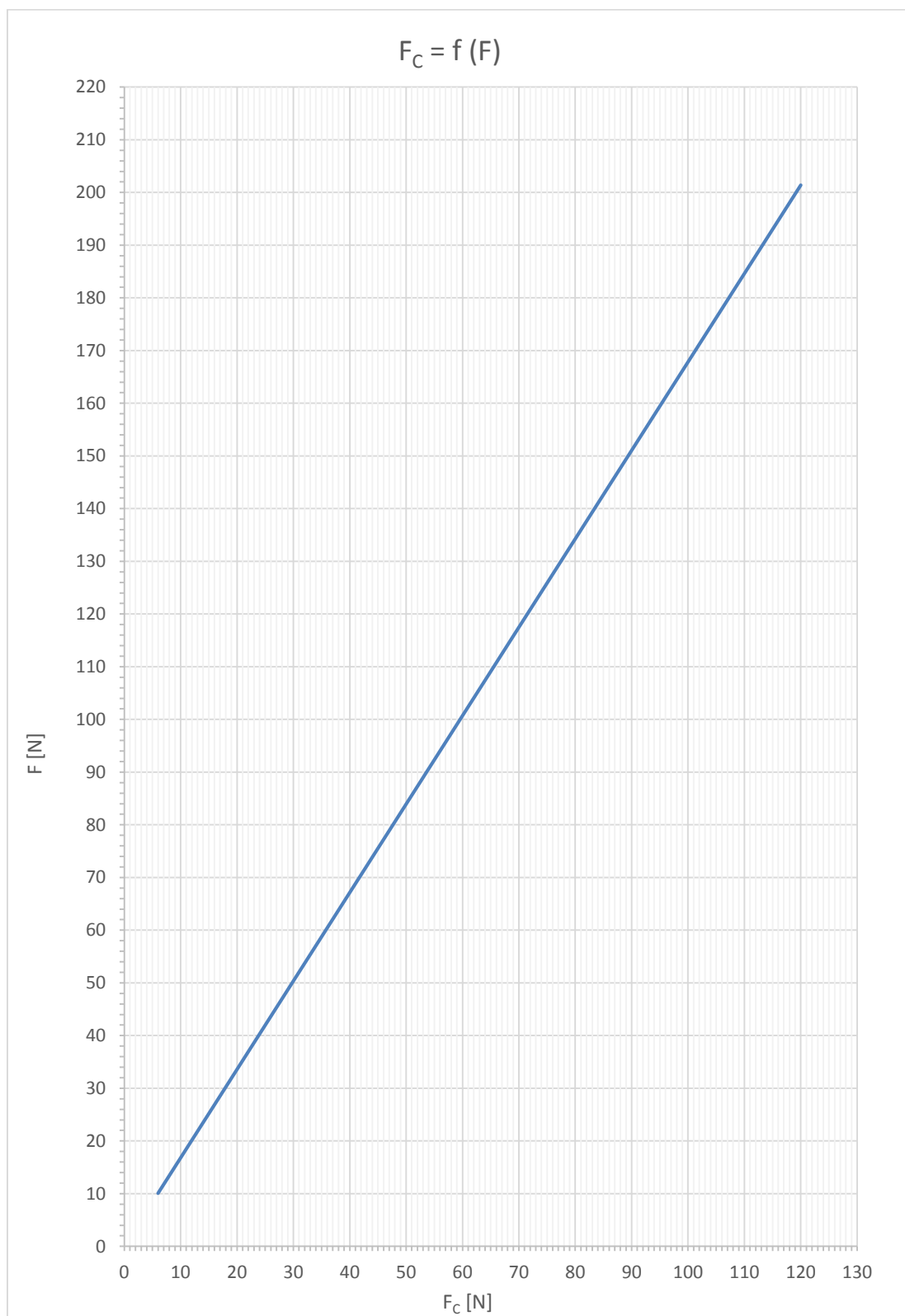
Z této tabulky vychází graf 2-1. Rozsahy hodnot rozměrů z tab. 2-3 se však pro horní a dolní polohu osy vzorku neshodují s předpokládanými hodnotami veličin a, b a c z původního zadání. Horní poloha osy vzorku je omezena proto, že při výpočtu zatížení pro požadované hodnoty $a = 0$ m, $b = 0,22$ m a $c = 0,18$ m, dle původního zadání bylo mezi F_C a M_C dosaženo poměru 119200 : 1, což je pro grafické znázornění nevhodné. Poměr zatížení je v dolní poloze osy vzorku 5,556:1 při požadovaných rozměrech $a = 0$ m, $b = 0,22$ m a $c = 0,18$ m. Kvůli zjednodušení odečítání hodnot z grafu bylo zvoleno poměru 6:1.



Graf 2-1 Pracovní oblasti přípravku

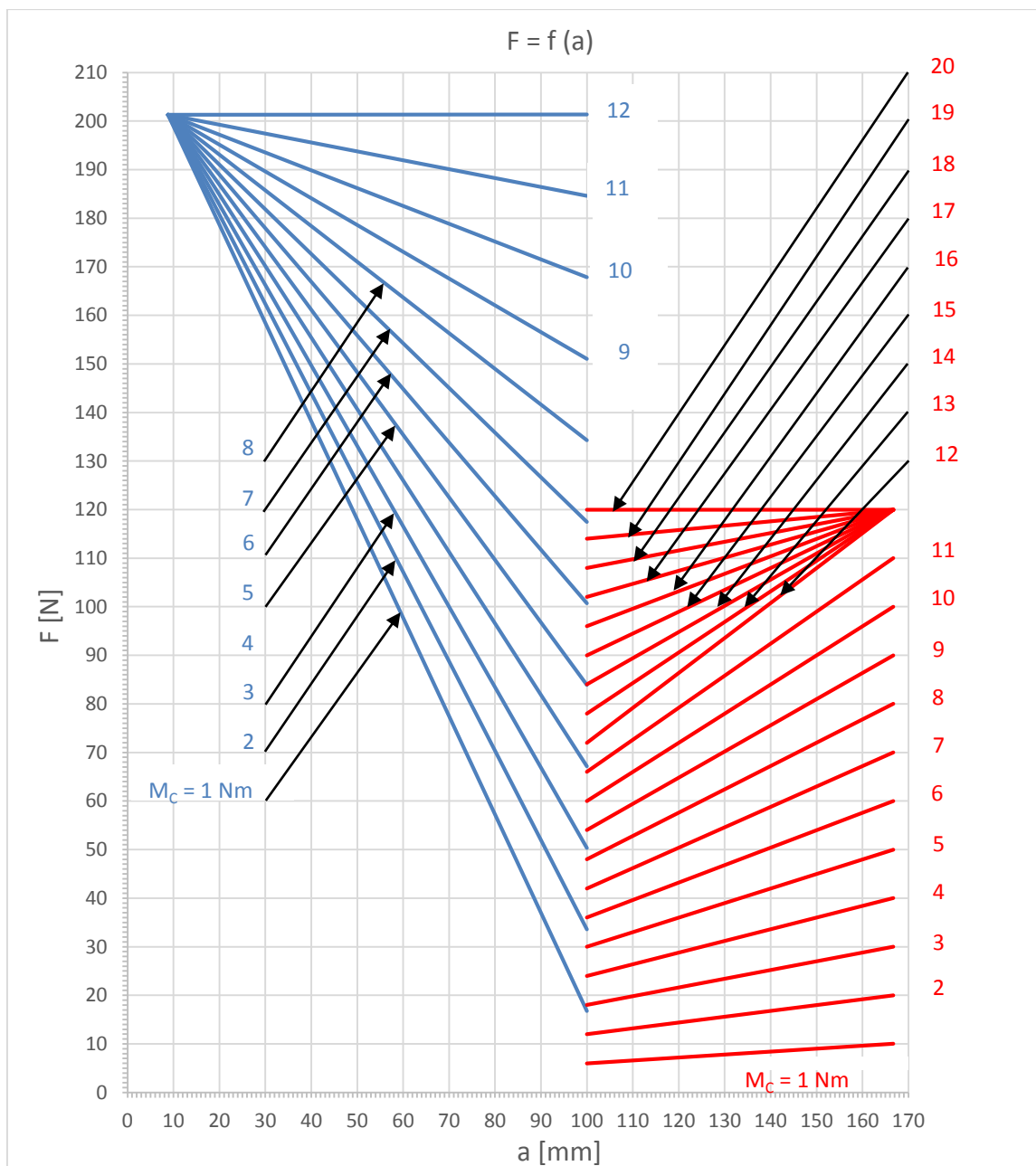
Zatížení vzorku momentem bylo navrženo na maximální hodnotu $M_C = 20$ Nm. Následně využitím poměru zatížení 6:1, 10:1 a 120:1 bylo dosaženo sil $F_C = 120$, 200 a 120 N pro dolní, střední a horní polohu vzorku. Horní poloha vzorku ohraničuje rozsah síly F_C hodnotou 120 N v celém rozsahu momentů M_C , proto byla hodnota $F_C = 200$ N omezena na $F_C = 120$ N a tak mohla být uzavřena pracovní oblast přípravku. Dle tohoto grafu obsluha zvolí požadované hodnoty F_C a M_C , které se nachází v pracovní oblasti

přípravku. Graf je vpravo dole doplněn o obr. 2-6, kde vetknutí znázorňuje pevné rozebíratelné spojení, s jehož pomocí lze snadno nastavovat polohu osy vzorku.



Graf 2-2 Závislost zatěžující síly F na vnější síle vzorku F_C

Pro předem zvolenou hodnotu síly F_C oběma vyčte potřebnou zatěžující sílu F .

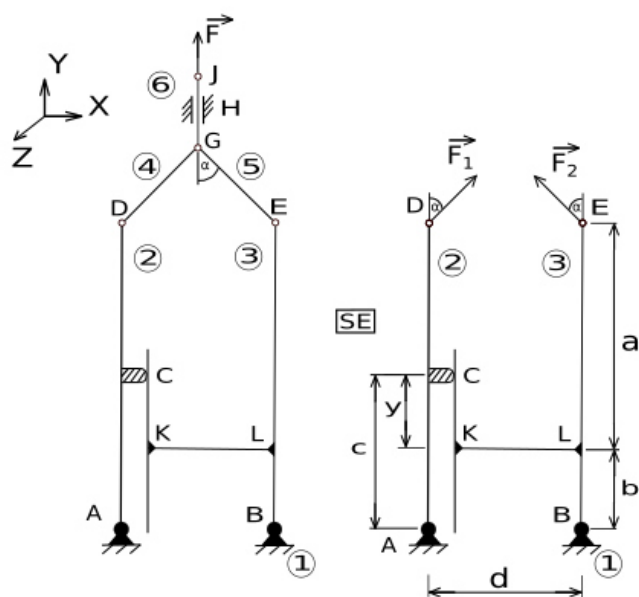


Graf 2-3 Závislost zatěžující síly F na poloze osy vzorku pro daný moment M_c

Nakonec je zapotřebí pomocí grafu 2-3 stanovit požadovanou polohu vzorku a to podle dříve určené síly F a požadovaného momentu M_c . Je však na výběr z různých kombinací těchto veličin, proto je třeba zvážit tu nejvhodnější. V levé části grafu lze pro dané hodnoty schématu zadání zatěžovat vzorek momentem o maximální hodnotě 12 Nm, další část grafu umožňuje zatížení vzorku momentem o hodnotě až 20 Nm. Parametr a (vzdálenost osy vzorku od vazby D a E) je omezen v rozsahu hodnot 8,8 až 166,7 mm, viz Tab. 2-3 a obr. 2-6.

I přes důmyslnost návrhu přípravku je tato varianta a manipulace s přípravkem příliš rozmanitá. Po zkonstruování bylo zjištěno, že bude výroba nákladná a to kvůli možnosti pohybu osy vzorku a tím i realizace posuvné vazby válečkovou tratí. I když byl při výpočtu zadání prokázán moment působící na vzorek, nemusí takový moment opravdu nastat. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k dalšímu návrhu přípravku.

2.1.3 Zadání 3



Zadané hodnoty:

$$F = 200 \text{ N}$$

$$\alpha = 50^\circ$$

$$a = 0,15 \text{ m}$$

$$b = 0,05 \text{ m}$$

$$c = 0,1 \text{ m}$$

$$d = 0,1 \text{ m}$$

$$y = 0,05 \text{ m}$$

Obr. 2-9 Schéma zadání 3

Součástí tělesa 3 je prut ohraničen vazbami K a L, který představuje zatěžovaný vzorek.

ad 1) Rozbor zadání:

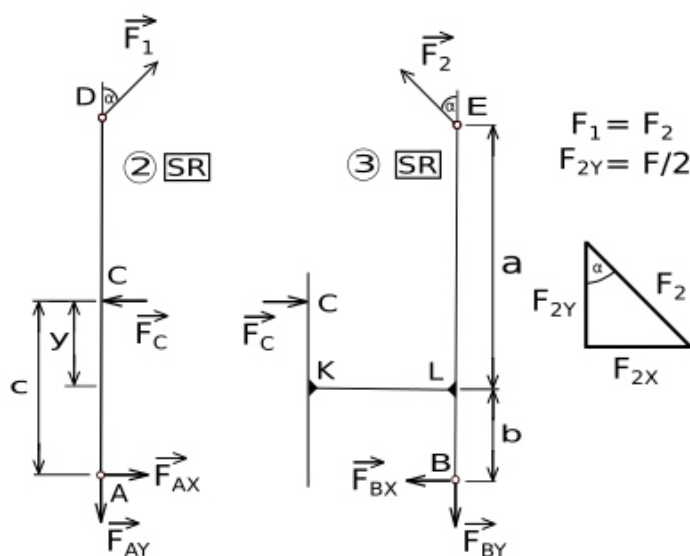
Počet stupňů volnosti soustavy: $i = (3 - 1) \cdot 3 - (2 + 2 + 1 - 0) = 1^\circ V$

Počet omezených deformačních parametrů: $\eta = 0$

Soustava těles je uložena pohyblivě bez omezení deformačních parametrů.

(Celá soustava i s tělesem 4, 5 a 6 je však při zatížení nepohyblivá.)

ad 2) Uvolnění těles soustavy



Obr. 2-10 ÚU zadání 3

ad 3) Statický rozbor

Podmínka statické určitosti:

$$\mu = \nu \wedge \mu_r + \mu_M \leq \nu_M$$

$$5 \neq 6 \wedge 0 + 0 < 2$$

Podmínka není splněna, uložení soustavy je staticky **přeurčené**.

Úloha je však **řešitelná**.

ad 4) Sestavení podmínek statické rovnováhy a jejich řešení

Maticový zápis soustavy rovnic: $A \cdot x = B$

$$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ F_{1X} \cdot (a+b) \\ F_{2X} \\ F_{2Y} \end{vmatrix}$$

Vyjádření známých veličin B:

$$F = 200 \text{ N}$$

$$F_1 = F_2 = \frac{F}{2 \cdot \cos \alpha} = 155,6 \text{ N}$$

$$F_{1X} = 0,5 \cdot F \cdot \tan \alpha = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{1Y} = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$$

$$F_{2X} = 0,5 \cdot F \cdot \tan \alpha = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{2Y} = \frac{F}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ N}$$

Vyjádření neznámých veličin x:

$$F_{AX} = 119,2 \text{ N};$$

$$F_{AY} = 100 \text{ N}$$

$$F_{BX} = 119,2 \text{ N}$$

$$F_{BY} = 100 \text{ N}$$

$$F_C = 238,4 \text{ N} \doteq 240 \text{ N}$$

ad 5) Rozbor výsledků řešení

V každém bodě úsečky vymezené body K a L je hodnota ohybového momentu:

$$M_O = F_C \cdot y = 12 \text{ Nm}$$

Tab. 2-4 Poloha osy vzorku při zatížení $F = 200 \text{ N}$

	F_C	M_O	$F_C : M_O$	$F : F_C$
$c = 0,1 \text{ m}$	240	12	20 : 1	5/6
$c = 0,15 \text{ m}$	160	8	20 : 1	5/4
$c = 0,18 \text{ m}$	132	6,6	20 : 1	3/2

Vyjádřením tabulky 2-4 je zřejmé, že nejvhodnější poloha osy vzorku je pro $c = 0,1 \text{ m}$.

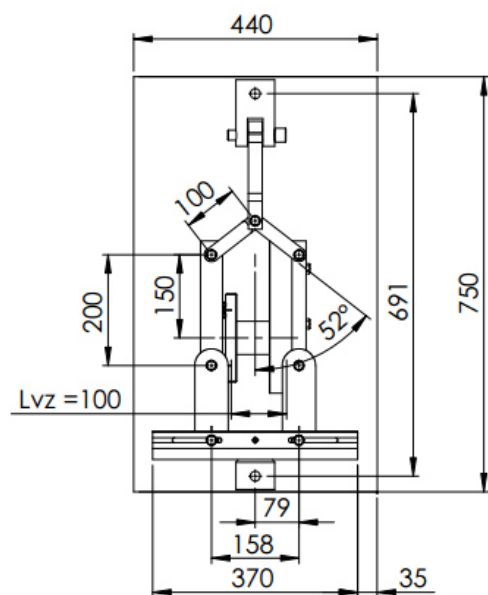
ad 5) Nastavení zatížení vzorku

Pro nastavení zatížení vzorku tlakem a ohybem bude tedy využita pouze jedna poloha osy vzorku. Vzhledem k této specifikaci lze snadno spočítat potřebou zatěžující sílu F pro zatížení vzorku požadovaným momentem a silou. K tomu slouží program vytvořený v prostředí MATLAB, viz příloha č. 3.

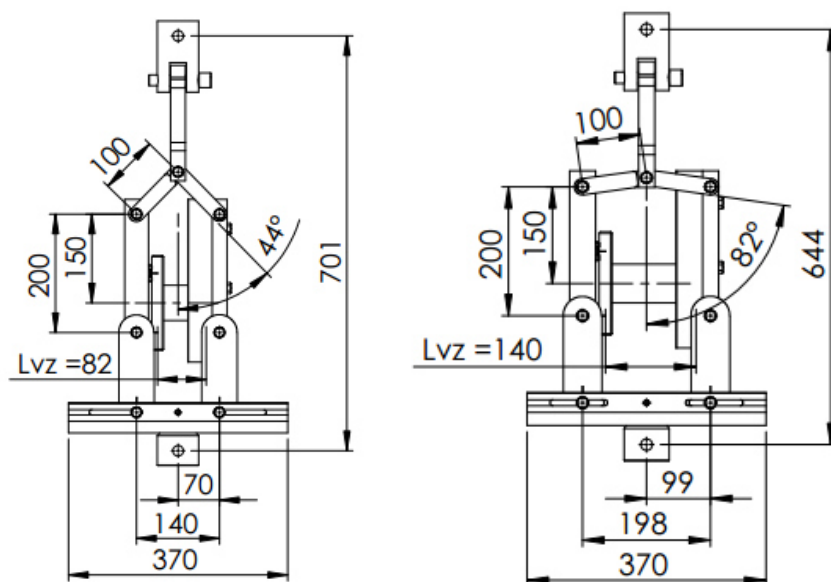
Obrázky 2-11, 2-12 odpovídají zatěžování vzorku o délce 100 mm. Příloha č. 3 slouží jako příručka pro obsluhu. Délka vzorku a hodnoty zatížení jsou pouze orientační. Dopředu není známa přesná délka a průřez zatěžovaného vzorku. Pro nastavení zatížení daného vzorku je nutno jej upnout do přípravku a změřit úhel 2α , viz obr. 2-9 .

Pro zatěžování vzorku byl navržen přípravek, jehož pracovní oblast se odvíjí od délky vzorku. Minimální délka zatěžovaného vzorku je 82 mm, maximální délka je 220 mm. Vzhledem k tomuto rozsahu byly vytvořeny 2 sady táhel. Táhlá mají roztečnou délku 100 a 140 mm. Použití těchto sad je zobrazeno na obr. 2-11 až 2-13 . Velikost celého přípravku je omezena parametry zkušebního stroje, zejména vzdáleností mezi vedeními vertikálního posuvu stroje, která je 440 mm. Parametr přípravku omezený touto hodnotou má rozměr 370 mm. Vůle mezi přípravkem a vedením stroje je tedy 35 mm z obou stran. Přípravek je takto navrhnut na maximální délku vzorku. Na obr. 2-11 je znázorněn přípravek přizpůsobený délce vzorku 100 mm. Rámeček o rozměrech 440 x 750 mm ohraničuje výše zmíněné omezení přípravku. Avšak hodnota 750 mm pouze ukazuje na pracovní oblast přípravku, která nebyla překročena v celém spektru délek vzorku, viz obr. 2-11 až 2-13 . Na obr. 2-11 jsou také zakótovány rozsahy polohování osy vzorku a rozměr 691 mm značí vzdálenost mezi upnutími přípravku ke stroji.

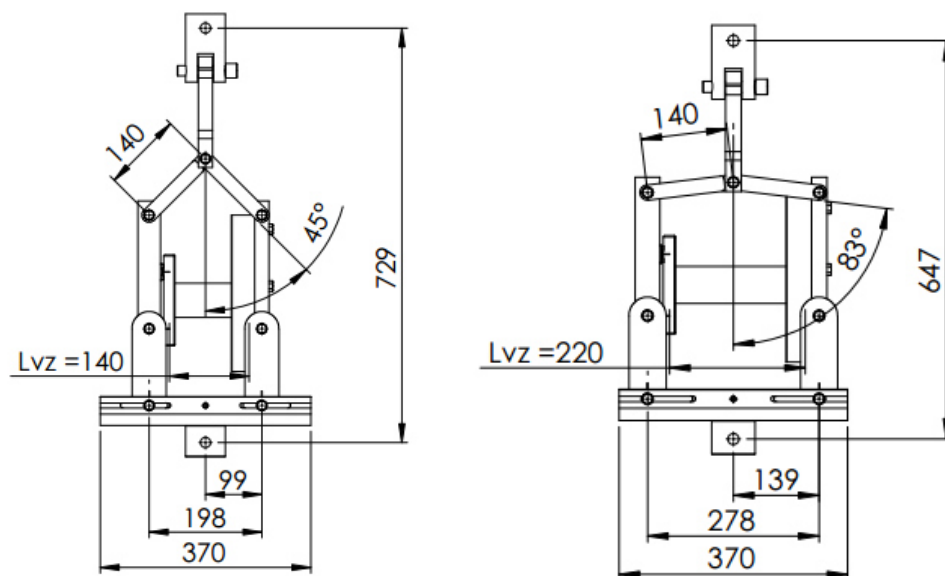
Přípravek se upne pomocí redukcí, které již jsou vyrobeny a jsou v prostorách laboratoře ÚMTMB. Dolní část přípravku bude nasazena na redukci stolu stroje a zaaretována čepem. Horní konec přípravku bude také nasazen na přípravek a zaaretován šroubem. Přípravek se skládá z mnoha dílů, mezi kterými mohou i přes důmyslnost konstrukčního řešení nastat vůle, které mohou zapříčinit vyosení horního a dolního upnutí. Tomuto faktu se předchází usazením kardanového kloubu mezi horní část přípravku a mezi horní upnutí stroje.



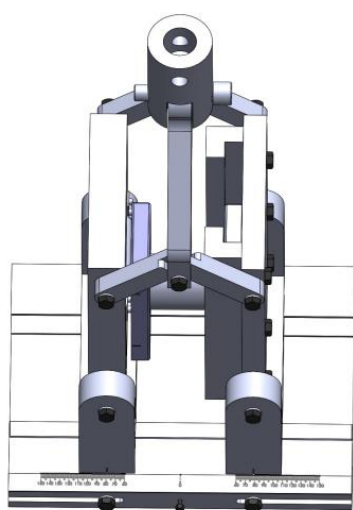
Obr. 2-11 Schéma přípravku sada, $L_{VZORKU} = 100$ mm



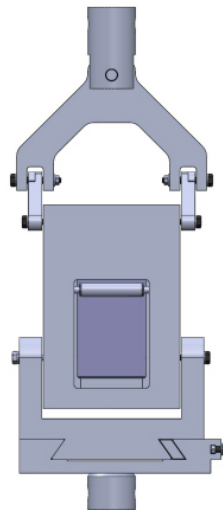
Obr. 2-12 Schéma přípravku sada 1 pro minimální a maximální délku vzorku



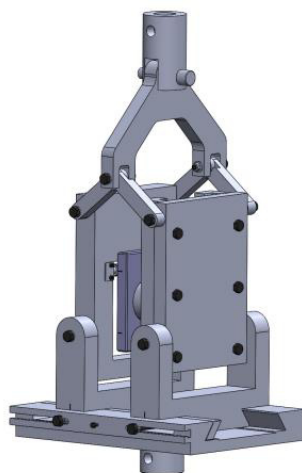
Obr. 2-13 Schéma přípravku sada 2 pro minimální a maximální délku vzorku



Obr. 2-14 Ustavení podstavců



Obr. 2-15 Vybrání

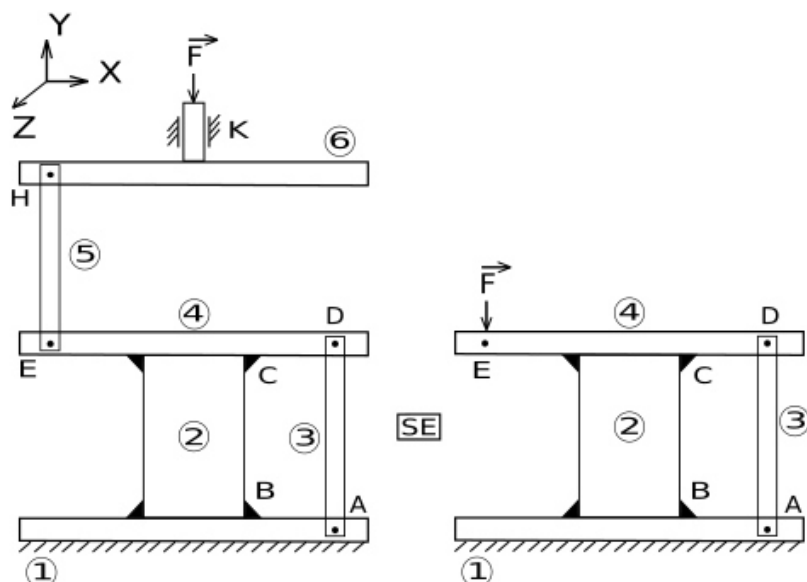


Obr. 2-16 Sestava přípravku

2.2 Další varianty konstrukčního řešení přípravku

V předchozí kapitole byl popsán funkční a vhodný přípravek pro zatěžování vzorku. Pro porovnání účinnosti předešlého přípravku byly provedeny návrhy dalších možných variant konstrukce tohoto zařízení.

2.2.1 VARIANTA A



Obr. 2-17 Schéma varianty A

ad 1) Rozbor zadání:

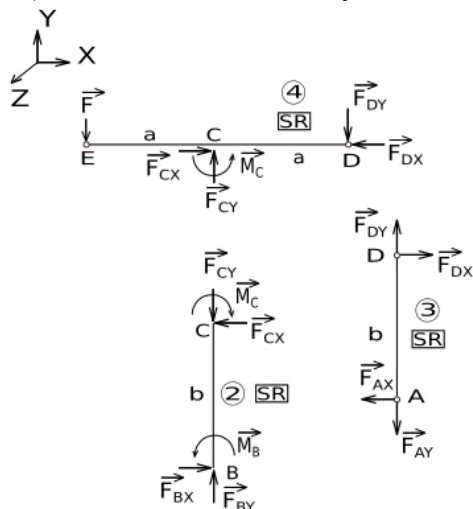
Počet stupňů volnosti soustavy:

$$i = (4 - 1) \cdot 3 - (2 + 3 + 3 + 2 - 1) = 9 - 9 = 0^\circ V$$

Počet omezených deformačních parametrů:

$$\eta = 1$$

ad 2) Uvolnění těles soustavy



Obr. 2-18 ÚU varianty A

ad 3) Statický rozbor

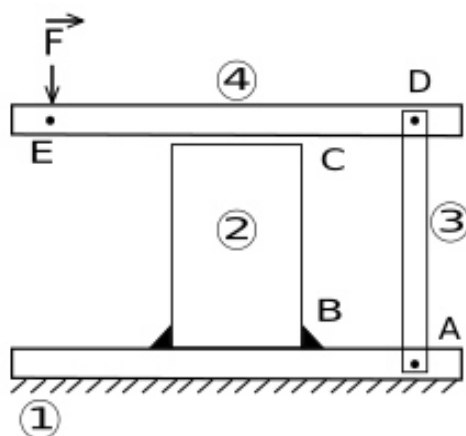
Podmínky statické určitosti:

$$\mu = v \wedge \mu_r + \mu_M \leq v_M$$

$$10 \neq 9 \wedge 0 + 2 = 2$$

Podmínka není splněna, uložení soustavy je staticky **neurčitě**.

2.2.2 VARIANTA B



Obr. 2-19 Schéma varianty B

ad 1) Rozbor zadání:

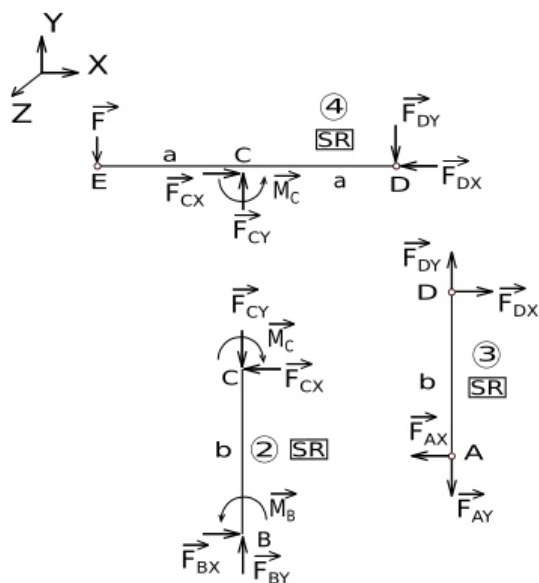
Počet stupňů volnosti soustavy:

$$i = (4 - 1) \cdot 3 - (2 + 3 + 2 + 2 - 0) = 9 - 9 = 0^\circ V$$

Počet omezených deformačních parametrů:

$$\eta = 0$$

ad 2) Uvolnění těles soustavy



Obr. 2-20 ÚU varianty B

ad 3) Statický rozbor

Podmínky statické určitosti:

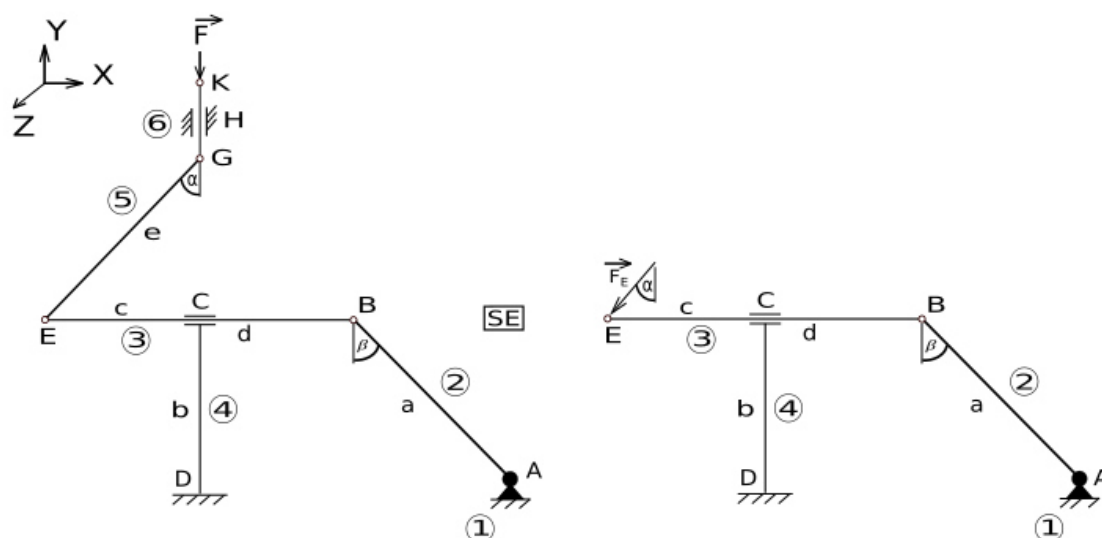
$$\mu = v \wedge \mu_r + \mu_M \leq v_M$$

$$9 = 9 \wedge 0 + 2 = 2$$

Podmínka není splněna, uložení soustavy je staticky určité.

Po sestavení rovnic rovnováhy a následném maticovém řešení bylo zjištěno, že úloha nelze spočítat. Determinant matice neznámých veličin je roven nule. Proto byla úloha přehodnocena na staticky **neurčitou**. Zde je ukončen algoritmus výpočtu. Bylo třeba vyvinout alternativu přípravku, viz varianta C.

2.2.3 VARIANTA C



Obr. 2-21 Schéma varianty C

ad 1) Rozbor zadání:

Počet stupňů volnosti soustavy:

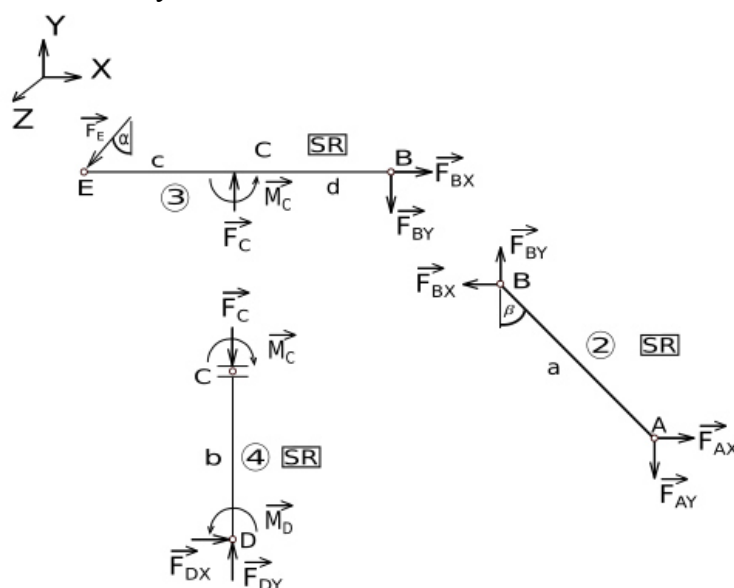
$$i = (4 - 1) \cdot 3 - (2 + 2 + 2 + 3 - 0) = 9 - 9 = 0^\circ V$$

Počet omezených deformačních parametrů:

$$\eta = 0$$

Soustava těles je uložena nepohyblivě bez omezení deformačních parametrů.

ad 2) Uvolnění těles soustavy



Obr. 2-22 ÚU varianty C

ad 3) Statický rozbor

$$NP = \{F_{AX}, F_{AY}, F_{BX}, F_{BY}, F_C, M_C, F_{DX}, F_{DY}, M_D\}$$

$$\mu_F = 7 \quad \mu_M = 2, \mu = 9$$

$$\nu = \sum \nu_i = 9; \quad \nu_F = 6; \quad \nu_M = 3$$

Podmínka statické určitosti:

$$\mu = \nu \wedge \mu_r + \mu_M \leq \nu_M$$

$$9 = 9 \wedge 0 + 2 < 3$$

Podmínka splněna, uložení soustavy je staticky **určité**.

ad 4) Sestavení podmínek statické rovnováhy

Maticový zápis soustavy rovnic:

$$A \cdot x = B$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & b & -a \cdot x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} F_{AX} \\ F_{AY} \\ F_{BX} \\ F_{BY} \\ F_C \\ F_{DX} \\ F_{DY} \\ M_C \\ M_D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_{EX} \\ F_{EY} \\ F_{EY} \cdot c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Tab. 2-5 Hodnoty zadání var. C pro různé konfigurace

	A	B	C
F [N]	200	200	200
F_E [N]	282,9	282,9	282,9
α [°]	45	45	45
β [°]	45	56,3	63,4
a [m]	0,1	0,18	0,22
b [m]	0,1	0,1	0,1
c [m]	0,1	0,1	0,1
$b \cdot \operatorname{tg} \beta$ [°]	0,1	0,15	0,2

Hodnoty v tabulkách jsou vztaženy k obr. 2-21.

Tab. 2-7 Vzájemné porovnání všech variant přípravku

	A	B	C
Úloha staticky	neurčitá	neurčitá	určitá
F_C	--	--	> 0
M_C	--	--	> 0
Poměr $F_C : M_C$	--	--	30:1
Poměr $F : F_C$	--	--	2:3
Použitelné	NE	NE	ANO

Ze všech variant byla vybrána varianta C, ale jen pro nízké hodnoty zatěžující síly F . Nízké zatěžující síly jsou omezeny hodnotou 50 N. Kvůli rozdílnosti konfigurací přípravků bylo pro porovnávání využito zatěžující síly F namísto její složky kolmé na osu horního upnutí.

3 POČÍTAČOVÁ SIMULACE

Zatížení přípravku spolu se zjednodušeným modelem vzorku bylo provedeno v programu Ansys Workbench. Model přípravku byl vytvořen a následně zjednodušen v prostředí programu SolidWorks. MKP⁵ analýza byla provedena v dle postupu znázorněného níže.

3.1 Model geometrie

Tab. 3-1 Materiálové charakteristiky

	Ocel	Vzorek
Youngův modul pružnosti v tahu E [MPa]	$2,1 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^4$
Poissonův poměr μ [-]	0,3	0,3
Hustota ρ [kg · m ⁻³]	7 850	1 900

Geometrie přípravku byla zjednodušena a upravena pro zkrácení výpočetního času. Váleček demonstruje vazbu, kde nedochází ke tření s upnutím vzorku a tak nemůže vzniknout y-ová složka stykové síly.

3.2 Kontakty

Mezi jednotlivými prvky modelu se využily dva typy kontaktů (Bonded a No Separation). Oba dva typy jsou lineární.

Bonded

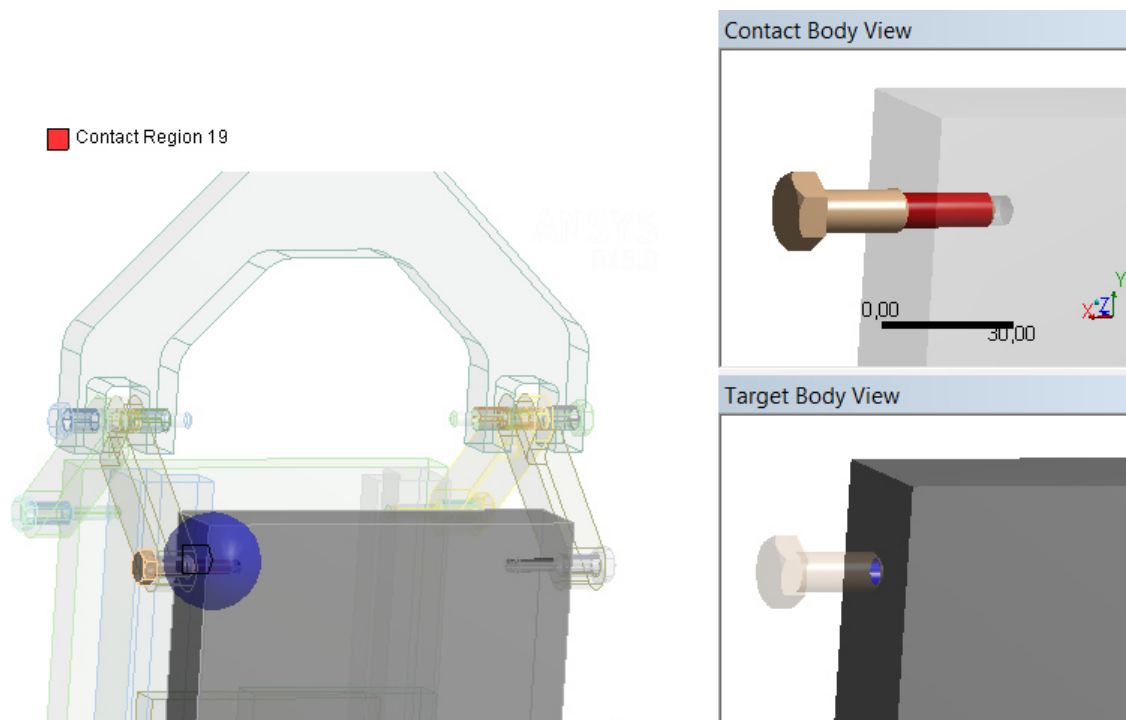
- Kontaktní plochy jsou pevně spojeny, není možné jejich vzájemné oddělení.
- Využito jako vetknutí.

No Separation

- Obdobné jako Bonded, je však umožněn malý pohyb mezi kontaktními plochami, jejichž vzdálenost se nemění.
- Využito pro simulaci rotační a posuvné vazby.

Spojení No Separation se využilo i pro spojení čepu válečku s jeho usazením do desky. Tento kontakt nahrazuje ložisko, neuvažujeme tedy tření. Prvek Initial Information ověřil funkčnost kontaktů. V případech, kde kontakty nefungovaly, se provedlo zvětšení oblasti, ve které byl kontakt uvažován. Tato oblast se nazývá Pinball Region a je znázorněna objemem koule o poloměru R. Tento poloměr byl zvětšován do takové míry, aby byla oblast Pinball Region větší, než je mezera mezi plochami kontaktu. Maximální hodnota penetrace byla $1,5936 \cdot 10^{-13}$.

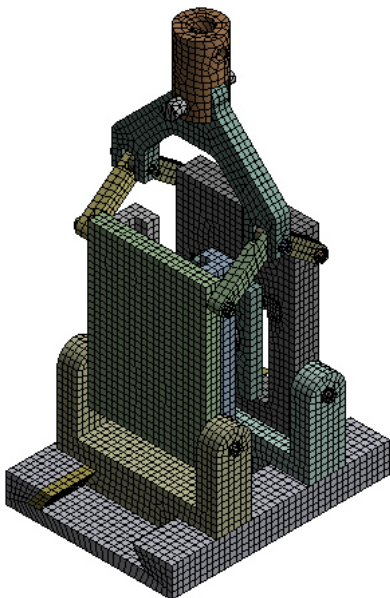
⁵ MKP – Metoda konečných prvků



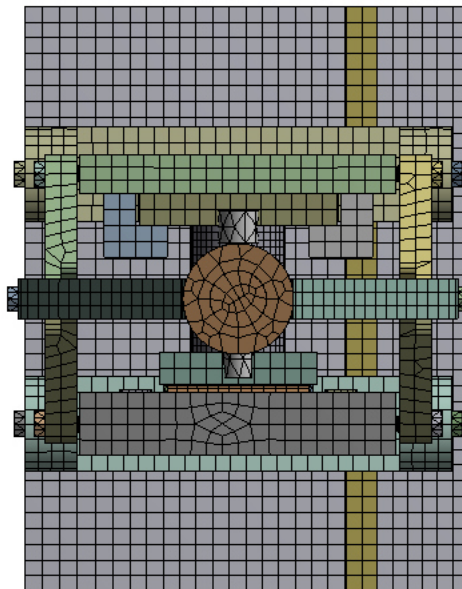
Obr. 3-1 Schéma kontaktu Bonded mezi otvorem a šroubem, $R = 25 \text{ mm}$.

3.3 Konečnoprvková síť

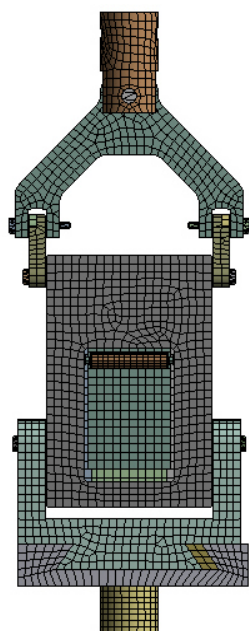
Základní konečnoprvková síť byla nastavena velikostí elementu o hodnotě 10 mm. Funkcí Body Sizing byla zjemněna síť tělesa vzorku o parametru elementu 5 mm. Na ostatní prvky modelu přípravku byla použita funkce Hex Dominant Method. Touto metodou se vytvořili převážně pravoúhlé prvky konečnoprvkové sítě. Konečnoprvková síť byla podložena diskretizací a výsledné hodnoty analýzy se mezi jednotlivými kroky nelišily o více než 5 %.



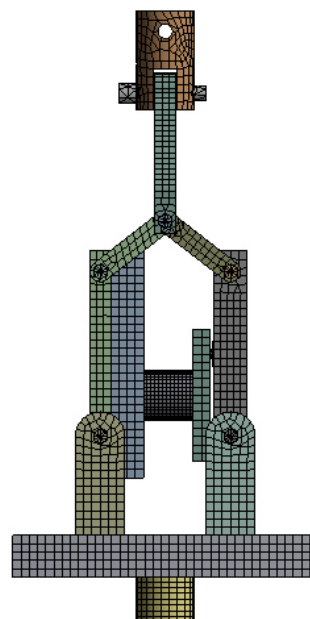
Obr. 3-2 Konečnoprvková síť



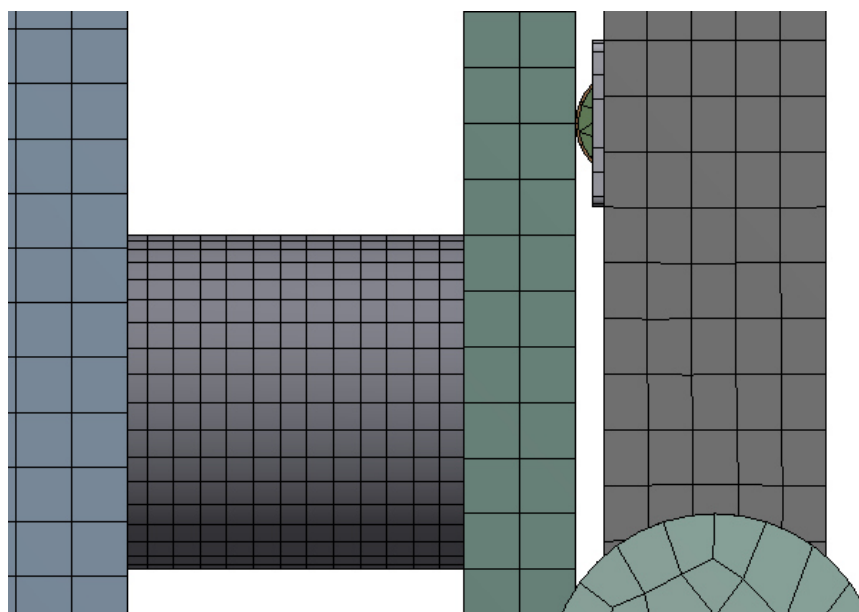
Obr. 3-3 Konečnoprvková síť - půdorys



Obr. 3-4 Boční konečnoprvková síť



Obr. 3-5 Čelní konečnoprvková síť



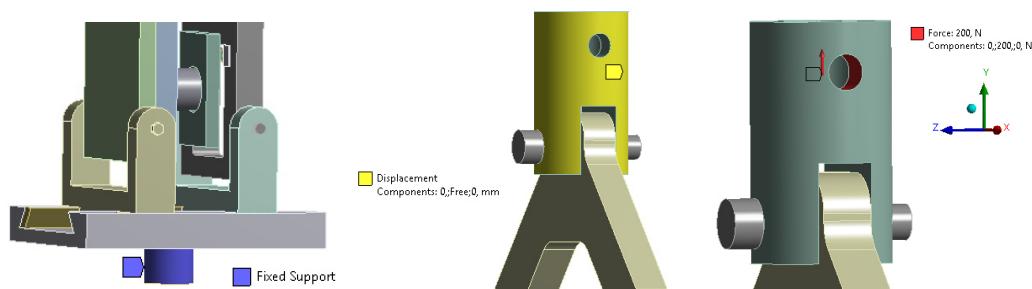
Obr. 3-6 Detail konečnoprvkové sítě vzorku

3.4 Struktura zatížení přípravku

Přípravek je ke zkušebnímu stroji (UZS) upnut zespodu a shora. To umožňuje přípravek natahovat. Tímto způsobem zatížení vznikají silové dvojice vyvolávající ohybový moment a tlak působící na vzorek.

Zatížení bylo provedeno těmito prvky: Fixed Support
Displacement
Force

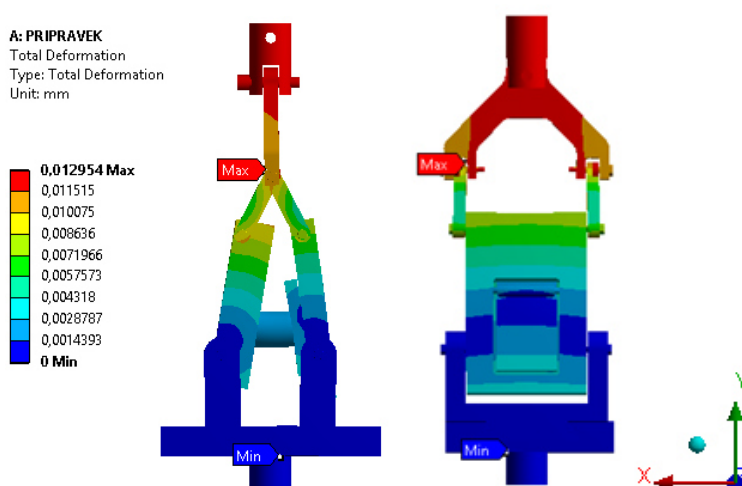
Pomocí Fixed Support bylo spodní válcové části přípravku odebráno všech šest stupňů volnosti. Pro zachování vertikálního vedení horního upnutí bylo využito prvku Displacement. Přípravek je v otvoru tohoto dílu natahován silou $F = 200 \text{ N}$.



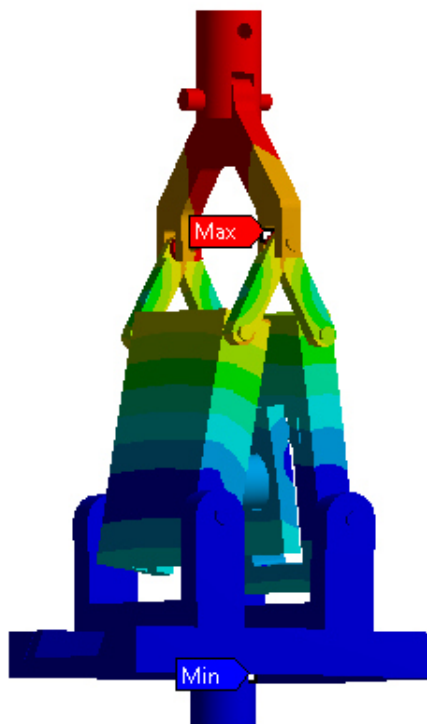
Obr. 3-7 Struktura zatížení přípravku

3.5 Deformace soustavy

Faktorem popisujícím chování přípravku je deformace, která byla zkoumána pro celou soustavu přípravku i se vzorkem. V běžné praxi se model materiálu biomechanický částí modeluje jako homogenní izotropní lineárně pružný materiál, tedy tzv. Hookovský materiál, jenž je určen Youngovým modulem pružnosti $E \text{ [MPa]}$ a Poissonovým číslem $\mu \text{ [-]}$, viz tab. 3-1. Deformace soustavy byla určena ve všech třech směrech kartézského souřadnicového systému. Obrázky popisující deformace jsou zobrazeny v měřítku $3,4 \cdot 10^3 : 1$ vzhledem k reálné deformaci.



Obr. 3-8 Celková deformace přípravku



Obr. 3-9 Celková deformace přípravku – natočený pohled

Deformace:

- Celková: 0,0129 mm
- Ve směru osy x: 0,0007 mm
- Ve směru osy y: 0,0129 mm
- Ve směru osy z: 0,0091 mm

3.6 Diskuze

Dle výše uvedených obrázků deformace bylo posouzeno zatížení přípravku spolu se zjednodušeným modelem vzorku.

Předpoklady:

- a) Ohýbání základního tělesa spolu s podstavci.
- b) Zachování rotační vazby pomocí čepů, vazby nepřenáší moment.
- c) Funkčnost válečku působící na desku
- d) Ohýbání a zároveň stlačování vzorku.
- e) Redukce mezi táhly je natahována.
- f) Táhla jsou natahována.
- g) Deformace je symetrická.

Deformační analýza přípravku splňuje všechny výše uvedené předpoklady. Kontakty jsou tedy funkční. Přípravek je natahován a vzorek je při tom stlačován a zároveň ohýbán. Deformační analýzou byla tedy ověřena správná konfigurace přípravku.

ZÁVĚR

Tato práce pojednává o konstrukčním návrhu přípravku pro zatěžování vzorku ohybem na univerzálním zkušebním stroji. V první části práce byla stručně nastíněna problematika porušení páteřního segmentu a následně bylo shrnuto několik dostupných řešení systémů používaných pro ohýbání biomedicínských vzorků. Teoretický náhled do problematiky umožňuje čtenáři dosáhnout základního pojetí o možnostech výzkumu lidských aparátů.

Druhá část práce popisuje tvorbu konstrukčního návrhu již zmíněného přípravku. Logika návrhu se odvíjela od studie zatěžování páteřního segmentu provedené na Ústavu mechaniky těles. Bylo vytvořeno několik návrhů, přičemž značná část z nich byla nevhodná pro následnou realizaci. Nejefektivnější z nich byl zkonstruován s využitím softwaru SolidWorks.

V další části práce se model přípravku podrobil MKP analýze. Ta měla za účel simulovat reálné zatížení vzorku spolu s přípravkem pomocí celkové deformace této soustavy a byla tak ověřena správná konfigurace zatížení vzorku ohybem a tlakem.

Na závěr byl konstrukční návrh podložen kompletní výkresovou dokumentací vhodnou pro následnou výrobu. Všechny cíle práce tedy byly splněny. Výroba tohoto zařízení byla odhadnuta na přibližnou částku 13 500 Kč.

Význam práce spočívá v navržení přípravku, který by s využitím univerzálního zkušebního stroje co nejlépe simuloval reálné zatížení páteřního segmentu, na kterém se zkouší účinnost stabilizačních implantátů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] M. HIGHSMITH, Jason. Anatomy of Spinal Fractures: Spinal column. In: *Anatomy of Spinal Fractures* [online]. Charleston Brain and Spine Charleston, SC: Charleston, SC, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.spineuniverse.com/conditions/spinal-fractures/anatomy-spinal-fractures>
- [2] MUDR. VYLETELKA, Juraj. Nemocnice Žilina, Neurologické aplikace: Vyhřeznutí ploténky. In: *Nemocnice Žilina, Neurologické aplikace: Vyhřeznutí ploténky* [online]. Nemocnice Žilina: Nemocnice Žilina, 2004 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/zajimavosti.php>
- [3] KOCIS, Jan, Tomas NAVRAT, Zdenek FLORIAN a Peter WENDSCHE. *Biomechanical testing of spinal segment fixed by thoracolumbar spine locking plate on the swine lumbar spine*. DOI: 10.5507/bp.2010.052. ISBN 10.5507/bp.2010.052. Dostupné také z: <http://biomed.papers.upol.cz/doi/10.5507/bp.2010.052.html>
- [4] SpofaDental - DURACRYL PLUS 250 ml - FLAVA s.r.o. *FLAVA s.r.o.* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.flava.cz/index.php?n=DURACRYL-PLUS-250-ml&go=shop&id=1671>
- [5] KELLY, Brian P. a Denis J. DIANGELO. *A Multiaxis Programmable Robot for the Study of Multibody Spine Biomechanics Using a Real-Time Trajectory Path Modification Force and Displacement Control Strategy*. DOI: 10.1115/1.4024645. ISBN 10.1115/1.4024645. Dostupné také z: <http://medicaldevices.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4024645>
- [6] KELLI, M. Whealan. Noninvasive Imaging Predicts Failure Load of the Spine with Simulated Osteolytic Defects. *The Journal of Bone and Joint Surgery* [online]. 2000, 1240-1240 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://jbjs.org/content/82/9/1240>
- [7] HOLSGROVE, Timothy, Nikhil NAYAK, William WELCH a Beth WINKELSTEIN. *Advanced Multi-Axis Spine Testing: Clinical Relevance and Research Recommendations* [online]. [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.14444/2034. ISBN 10.14444/2034. Dostupné z: <http://ijs-surgery.com/10.14444/2034>
- [8] Precision Point - Hexapod - kinematics. *JPE - Experts In Positioning* [online]. 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.janssenprecisionengineering.com/page/hexapod-kinematics/>
- [9] Ing. FLORIAN, Zdeněk, CSc., Prof. Ing. ONDRÁČEK Emanuel, CSc. a Doc. Ing. PŘIKRYL Karel, CSc. *MECHANIKA TĚLES: STATIKA*. 2.vydání. V Brně: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2007. ISBN 978-80-214-3440-0.

Seznam použitých symbolů a zkratek

ÚU		úplné uvolnění
F	[N]	zatěžující síla přípravku
F _{vz}	[N]	síla působící na vzorek
M _{vz}	[Nm]	moment působící na vzorek
UZS		univerzální zkušební stroj
ÚMTMB		Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
TSLP		Thoracolumbar Spine Locking Plate
		Stabilizátor poškozeného páteřního segmentu
NNTN		neprostrupnost, neproměnnost, tlakovost, neutrálnost
MKP		Metoda konečných prvků
GLS		gimbal load sensor
		snímač natočení
BLS		base load sensor
		snímač zatížení

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Charakteristické prvky lidské páteře [1]	16
Obr. 1-2 Vyhřeznutí meziobratlové ploténky [2]	16
Obr. 1-3 Testovací stroj ZWICK Z020	17
Obr. 1-4 Schéma přípravku se zatíženým / nezatíženým vzorkem [3].....	18
Obr. 1-5 Neporušený, porušený a porušený fixovaný vzorek [3]	19
Obr. 1-6 Schéma programovatelného mechanismu [5]	21
Obr. 1-7 Testovací zařízení bez a s upnutým vzorkem, šipka vpravo ilustruje směr ohybu vzorku [5]	22
Obr. 1-8 Hydraulické testovací zařízení [6]	24
Obr. 1-9 Tzv. šestinohé testovací zařízení [7]	25
Obr. 2-1 Schéma zadání 1.....	27
Obr. 2-2 ÚU zadání 1	29
Obr. 2-3 Superpozice – část A.....	31
Obr. 2-4 Superpozice – část B.....	31
Obr. 2-5 Schéma zadání 2.....	32
Obr. 2-6 ÚU zadání 2	32
Obr. 2-7 Superpozice- část A	34
Obr. 2-8 Superpozice- část B.....	34
Obr. 2-9 Schéma zadání 3.....	40
Obr. 2-10 ÚU zadání 3	40
Obr. 2-11 Schéma přípravku sada, $L_{VZORKU} = 100 \text{ mm}$	43
Obr. 2-12 Schéma přípravku sada 1 pro minimální a maximální délku vzorku.....	43
Obr. 2-13 Schéma přípravku sada 2 pro minimální a maximální délku vzorku.....	44
Obr. 2-14 Ustavení podstavců Obr. 2-15 Vybrání.....	44
Obr. 2-16 Sestava přípravku.....	44
Obr. 2-17 Schéma varianty A	45
Obr. 2-18 ÚU varianty A	45
Obr. 2-19 Schéma varianty B	46
Obr. 2-20 ÚU varianty B	46
Obr. 2-21 Schéma varianty C	47
Obr. 2-22 ÚU varianty C	47
Obr. 2-23 Grafické znázornění var. C	49
Obr. 3-1 Schéma kontaktu Bonded mezi otvorem a šroubem, $R = 25 \text{ mm}$	52
Obr. 3-2 Konečnoprvková síť.....	52
Obr. 3-3 Konečnoprvková síť - půdorys	52
Obr. 3-4 Boční konečnoprvková síť	53
Obr. 3-5 Čelní konečnoprvková síť	53
Obr. 3-6 Detail konečnoprvkové sítě vzorku.....	53
Obr. 3-7 Struktura zatížení přípravku.....	54
Obr. 3-8 Celková deformace přípravku	54
Obr. 3-9 Celková deformace přípravku natočený pohled.....	545

Seznam grafů

Graf 1-1 Interval rozptylu hodnot s pravděpodobností 95 %; Červené body – střední hodnota, šedé body – naměřené hodnoty (dle stavu vzorku) [3]	20
Graf 1-2 Závislost smykové síly vzorku na úhlu natočení [5]	22
Graf 1-3 Závislost tlakové síly vzorku na úhlu natočení [5]	23
Graf 1-4 Závislost momentu vzorku na úhlu natočení [5]	23
Graf 2-1 Pracovní oblasti přípravku	37
Graf 2-2 Závislost zatěžující síly F na vnější síle vzorku F_C	38
Graf 2-3 Závislost zatěžující síly F na poloze osy vzorku pro daný moment M_C	39

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Naměřené hodnoty experimentu [3]	19
Tab. 1-2 Výhody a nevýhody stávajícího přípravku	20
Tab. 1-3 Zatížení vzorku smykem [5]	22
Tab. 1-4 Zatížení vzorku tlakem [5]	23
Tab. 1- 5 Zatížení vzorku ohybem [5]	23
Tab. 1-6 Výhody a nevýhody testovacího zařízení	23
Tab. 1-7 Výhody a nevýhody hydraulického testovacího zařízení	24
Tab. 1-8 Výhody a nevýhody tzv. šestinohého testovacího zařízení	25
Tab. 2-1 Výsledky hodnot superpozice zadání 2	34
Tab. 2-2 Inverzní řešení zadání 3	35
Tab. 2-3 Pracovní oblast přípravku pro zatěžování vzorku	36
Tab. 2-4 Poloha osy vzorku při zatížení $F = 200 \text{ N}$	41
Tab. 2-5 Hodnoty zadání var. C pro různé konfigurace	48
Tab. 2-6 Výsledky hodnot var. C pro různé konfigurace	49
Tab. 2-7 Vzájemné porovnání všech variant přípravku	50
Tab. 3-1 Materiálové charakteristiky	51

Seznam příloh

- **Příloha 1** - Program pro výpočet zadání 2
- **Příloha 2** - Program pro výpočet zadání 2 inverzně
- **Příloha 3** - Program pro výpočet zadání 3 inverzně

Příloha 1 - Program pro výpočet zadání 2

Program v prostředí MATLAB pro určení zatěžující síly F a polohy osy vzorku při požadované síle a momentu působící na vzorek.

a) Zadání programu

b) Řešení programu

```
clc,clear all, close all

alpha = 0.8726; %[rad]
Fc = 120;        %[N]
Mc = 20;         %[Nm]

F1x = Fc;
F1y = F1x/tan(alpha);
F   = 2*F1y
F2x = F1x;
F2y = F1y;

ab = 0.20; % tj. (a+b)
ac = 0.18; % tj. (a+c)
d  = 0.1;  % délka vzorku

%   Fax Fay Fbx Fby  b   c
m = [1,  0,  0,  0,  0,  0
      0 , 1,  0,  0,  0,  0
      0 , 0,  0,  0,  1,  0
      0 , 0,  1,  0,  0,  0
      0 , 0,  0,  1,  0,  0
      0 , 0,  0,  0,  0,  1];

b = [Fc-F1x;F1y; (F1x*ab-Mc)/Fc;Fc-F2x;F2y; (F2x*ac-Mc)/Fc];

n = inv(m)*b
c = det(m)
```

F =	
	201.4103
n =	
	0
	100.7052
	0
	100.7052
	0.0333
	0.0133
c =	
	1

Příloha 2 - Program pro výpočet zadání 2 inverzně

Program v prostředí MATLAB pro určení síly F_C a momentu M_C působící na vzorek.

a) Zadání programu

b) Řešení programu

```
clc,clear all, close all

% F=200 N;
% alfa=50°;

f1x=119.18;
f1z=100;
f2x=119.18;
f2z=100;

a=0.1;
b=0.1;
c=0.08;
d=0.16;

% fax faz fbx fbz fc mc
m= [-1, 0, 0, 0, 1, 0
     0, 1, 0, 0, 0, 0
     0, 0, 0, 0, b, 1
     0, 0, -1, 0, 1, 0
     0, 0, 0, 1, 0, 0
     0, 0, 0, 0, c, 1];

%
b=[f1x;f1z;f1x*(a+b);f2x;f2z;f2x*(a+c)];

n=inv(m)*b

c=det(m)
```

```
n =

     0
100.0000
     0
100.0000
119.1800
11.9180

c =

0.0200
```

Příloha 3 - Program pro výpočet zadání 3 inverzně

Program v prostředí MATLAB pro určení zatěžující síly F při požadovaném momentu a jemu odpovídající síle působící na vzorek.

a) Zadání programu

b) Řešení programu

```
clc,clear all, close all

% alfa=50°;
% a=0.15;
% b=0.05;
% c=0.1;
% d=0.1;
% y=0.05;

talfa=1.1918;      %tangent úhlu alfa [-]
mo=12              %požadovaný ohybový moment vzorku [Nm]

fc=20*mo           %odpovídající tlaková síla vzorku [N]

f1x=0.5*fc         %x-ová složka síly F1 [N]
f2x=f1x            %x-ová složka síly F2 [N]

f1y=(f1x/talfa)    %y-ová složka síly F1 [N]
f2y=f2x            %y-ová složka síly F2 [N]

F=2*f1y            %zatěžující síla přípravku [N]
```

fc =	f1y =
240	100.6880
f1x =	f2y =
120	120
f2x =	F =
120	201.3761