



## **Diplomová práce**

# **Optimalizace konstrukce stroje pro bezkontaktní měření bočních autoskel**

*Studijní program:*

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

*Autor práce:*

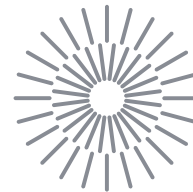
**Bc. František Čihák**

*Vedoucí práce:*

Ing. Michal Starý, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Optimalizace konstrukce stroje pro bezkontaktní měření bočních autoskel

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. František Čihák</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S22000233
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra sklářských strojů a robotiky
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

### Zásady pro vypracování:

Novodobým trendem v oblasti měření je aplikace bezkontaktních snímačů. Implementace tohoto trendu do procesu výroby zasklení automobilů vedla k vývoji systému bezkontaktního měření bočních autoskel, na kterém se podílela Katedra sklářských strojů a robotiky ve spolupráci s firmou FOR G, s.r.o.. Na základě experimentálního ověřování a ladění vyvinutého zařízení byly vytipovány konstrukční oblasti, a to zejména v podobě tuhosti rámu, jehož optimalizací, v kombinaci s dalšími technickými úpravami, lze potenciálně docílit navýšení přesnosti stroje a rovněž zjednodušit systém kalibrace.

Cílem zadání je navrhnout nové, resp. optimalizované konstrukční řešení stroje v podobě tuhostně vylepšeného nosného rámu stroje a případně dalších technických úprav, vedoucích k potenciálnímu navýšení přesnosti měření daného zařízení.

Úkolem Vaší DP bude:

1. Analyzovat současné technické řešení stroje – princip měření, konstrukční řešení atd.
2. Ve variantách provést návrh koncepce nového/optimalizovaného řešení.
3. Na základě rozhodovací analýzy zpracovat pro vybranou variantu řešení 3D počítačový model a vyhotovit základní výkresovou dokumentaci.
4. Provést technickoekonomické zhodnocení navrženého řešení v kontrastu s výchozím řešením stroje.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	výkresová dokumentace
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	40 – 50 stran textu
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. NOVOTNÝ, F., HORÁK, M. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
2. ŘEZNÍČEK, J., ŘEZNÍČKOVÁ, J. *Řezníčkovi Pružnost a pevnost v technické praxi: příklady III*. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008.
3. STARÝ, M. a kol. *Způsob bezkontaktního měření automobilových skel*. Sklář a keramik 3-4 (2021) s. 51-55.
4. MATÚŠEK, O., Z. VÍT a V. HOTAŘ. *Detection of glass edge corrugation for cutting distance optimization*. MM Science Journal, 2017, 01, 1734-1737. DOI: 10.17973/MMSJ.2017\_02\_2016182.
5. VOJÁČEK, A. *Konfokální princip optického měření vzdáleností*. Automatizace HW [online]. 2016 [cit. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-optickeho-mereni.html>
6. KUNKEL, M. et al. *Non-contact measurement of central lens thickness*. Glass Science and Technology. Laser Institute of America, 2005, 78(5), 1502-1505. DOI: 10.2351/1.5060438.
7. Interní podklady (dokumentace, model, ...).

*Vedoucí práce:* Ing. Michal Starý, Ph.D.  
Katedra sklářských strojů a robotiky

*Datum zadání práce:* 14. listopadu 2023  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 14. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.  
garant studijního programu

V Liberci dne 14. listopadu 2023

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací konstrukce stroje pro bezkontaktní měření bočních autoskel. Jedná se o prototyp stroje bezkontaktního měření gravitačně tvarovaných skel, pro firmu AGC ve spolupráci s výrobcem For G. Na základě získaných poznatků a výsledků z numerických simulací bylo vybráno optimální konstrukční řešení, pro které byl následně vypracován 3D model a výkresová dokumentace.

### **Klíčová slova:**

optimalizace, numerická simulace, tvorba tuhých konstrukcí

## **Anotation**

This thesis deals with the optimization of the machine design for non-contact measurement of side car glass. It is a prototype of a machine for non-contact measurement of gravity-moulded glass, for AGC company in cooperation with the manufacturer For G. Based on gained knowledge and the results from numerical simulations, an optimal design solution was selected, for which a 3D model and drawings were subsequently developed.

### **Key words:**

Optimization, numerical simulation, rigid structure design

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Michalovi Starému, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při vedení mé diplomové práce. Poděkování patří též Ing. Martinu Konečnému, Ph.D. za odborné rady při nastavení simulací v softwaru Creo. Na závěr bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celého studia.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	10
Úvod.....	11
1 Rozbor současného stavu dané problematiky .....	12
1.1 Popis podstaty stroje .....	12
1.2 Popis stávajícího technického řešení .....	12
1.2.1 Rám .....	13
1.2.2 Kyvná konzola .....	14
1.2.3 Základní deska .....	14
1.2.4 Pseudomaketa .....	15
1.2.5 Portál s konfokálními snímači .....	15
2 Metody tvorby tuhých konstrukcí.....	17
2.1 Materiály .....	17
2.1.1 Kovy.....	17
2.1.2 Plasty.....	19
2.1.3 Kompozity.....	20
2.2 Polotovary na konstrukce .....	22
2.2.1 Polotovary vyráběné tvářením .....	22
2.2.2 Polotovary vyráběné odléváním.....	22
2.2.3 Polotovary vyráběné svařováním.....	23
2.2.4 Polotovary vyráběné pájením.....	23
2.2.5 Polotovary vyráběné žárovým dělením materiálu.....	23
2.2.6 Polotovary vyráběné lepením.....	24
2.3 Tvar konstrukce .....	24
2.3.1 Koncepce strojních konstrukcí .....	24
2.3.2 Optimalizace.....	26
3 Návrh konstrukčního řešení .....	28
3.1 Simulace v softwaru PTC Creo Simulate .....	29
3.2 Simulační analýza výchozího konstrukčního stavu .....	32
3.3 Postup řešení problematiky .....	37
3.3.1 Optimalizace kyvné konzole.....	39
3.3.2 Optimalizace základní desky.....	48
3.3.3 Optimalizace pojezdového portálu .....	48
3.3.4 Optimalizace přidáním pohonu .....	51
4 Technicko-ekonomické zhodnocení navrženého řešení.....	53



4.1	Technické zhodnocení.....	53
4.2	Ekonomické zhodnocení .....	54
5	Závěr .....	56
	Seznam literatury.....	58
	Seznam obrázků, tabulek a příloh.....	60

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Jednotka	Veličina
RPS	[-]	systém referenčních bodů (Reference Point System)
CAE	[-]	počítačem podporované inženýrství (Computer Aided – Engineering)
CNC	[-]	počítačové numerické řízení (Computer Numerical Control)
A	[mm]	tloušťka plechu (díl 1)
B	[mm]	hloubka výstupku
C	[mm]	šířka výstupku
D	[mm]	výška výstupku
E	[mm]	tloušťka plechu (díl 2)
F	[mm]	šířka otvoru
G	[mm]	délka otvoru

# Úvod

Předkládaná diplomová práce se zabývá optimalizací konstrukce stroje pro bezkontaktní měření bočních autoskel. Bezkontaktní měření pomocí konfokálních snímačů je klíčovou technikou v moderním průmyslu automobilové výroby, kde spolehlivé měření tvarů a geometrie transparentních skel s parazitními reflexemi hrají klíčovou roli v zajištění kvality výsledného produktu. Optimalizace konstrukce měřicího stroje pro bezkontaktní měření těchto autoskel je tedy zásadní pro dosažení maximální přesnosti a efektivity procesu.

Diplomová práce je v souladu se zadáním strukturovaná do pěti hlavních kapitol. První kapitola se zabývá rozbohem současného technického stavu stroje. Nejprve je detailně popsána podstata samotného měřicího zařízení. Následně je proveden rozbor současného stavu, který zahrnuje detailní popis jednotlivých komponent stroje.

Ve druhé kapitole je popsána metodika tvorby tuhých konstrukcí, včetně specifikace používaných materiálů. Jsou zde detailně popsány postupy, které jsou nezbytné pro správnou výrobu tuhých konstrukcí.

Třetí kapitola je zaměřena na optimalizaci konstrukce měřicího zařízení pomocí numerické simulace v softwaru Creo Parametric. V této části byla provedena detailní analýza konstrukce stroje pomocí metody konečných prvků, což umožnilo identifikovat vzniklé deformace. Na základě výsledků analýzy byly provedeny různé varianty s cílem nalézt optimální řešení a dosáhnout snížení deformace konstrukce.

Předposlední čtvrtá kapitola obsahuje technicko-ekonomické porovnání mezi stávající a inovovanou konstrukcí kyvné konzole měřicího stroje. Poslední, závěrečná kapitola obsahuje shrnutí dosažených výsledků.

Cílem mé diplomové práce, jak již název napovídá, je optimalizace konstrukce stroje pro měření tvaru a geometrie bočních autoskel. Jednotlivé návrhy optimalizací byly ověřeny pomocí numerické simulace v softwaru Creo.

# 1 Rozbor současného stavu dané problematiky

Celkově je rozbor technického řešení stroje úvodním krokem při vylepšení a optimalizaci provozu. Z rozboru lze odhalit oblasti, které je třeba vylepšit a navrhnout řešení, která budou přinášet požadované výsledky. Rozbor současného technického řešení měřicího stroje zahrnuje popis podstaty stroje. Dále se rozbor zaměřuje na stávající technické řešení popisující dílčí komponenty stroje. Popsání technického řešení stroje je důležité pro lepší porozumění funkcím jednotlivých dílů a způsobu práce se zařízením. Tímto způsobem lze lépe porozumět, jak dané zařízení funguje a jak řešit případně vzniklé nedostatky. [1]

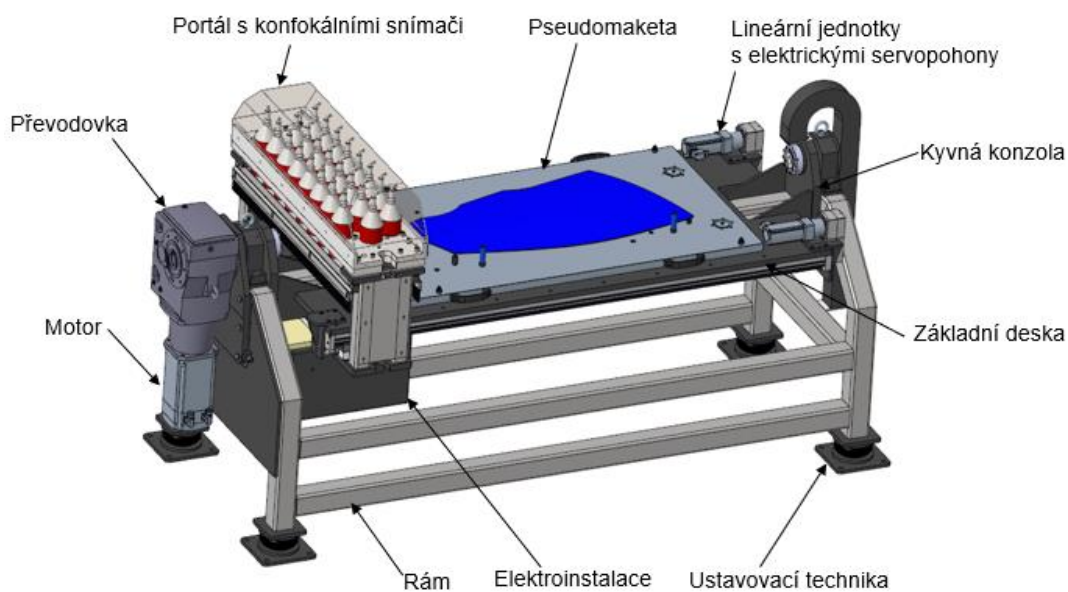
## 1.1 Popis podstaty stroje

Jedná se o prototyp stroje bezkontaktního měření gravitačně tvarovaných skel, primárně pro firmu AGC ve spolupráci s výrobcem For G. V rámci projektu byl návrh stroje rozdělen do tří etap. První projektová etapa byla zaměřena na nalezení optimálního způsobu bezkontaktního měření tvarové přesnosti automobilových skel. Druhá fáze projektu byla zaměřena na návrh konstrukčního řešení automatického zařízení pro bezkontaktní měření gravitačně tvarovaných skel. Třetí etapa pojednávala o funkčním testování, provozním ověření prototypu a konstrukční optimalizaci zařízení. Při optimalizaci byly provedeny zásahy do konstrukce prototypu. Tyto úpravy byly ovlivněny hmotností, rozměrovým uspořádáním, cenou a snahou zachovat koncepci obdobnou stávajícímu systému měření na maketách. Provedené úpravy vnášejí do konstrukce změnu tuhosti a tím pádem i přesnosti měřicího zařízení. Výsledkem těchto tří etap je sestavený prototyp odměřovacího zařízení, který slouží k hodnocení jakosti výrobků. [1]

## 1.2 Popis stávajícího technického řešení

Stávající technické řešení stroje je navrženo tak, aby jednotlivé komponenty efektivně vykonávaly danou úlohu a zajistily správný chod stroje. Měřicí zařízení se skládá z rámu, kyvné konzole, základní desky, pseudomakety a z portálu s konfokálními snímači. Tyto jednotlivé části stroje budou následně detailně popsány. Sestavením těchto výše uvedených komponent dostaneme výchozí část stroje, který se dále osadí motorem, převodovkou, lineárními jednotkami s elektrickými servopohony, brzdou a elektroinstalací. Dále může být zařízení vybaveno stavěcími

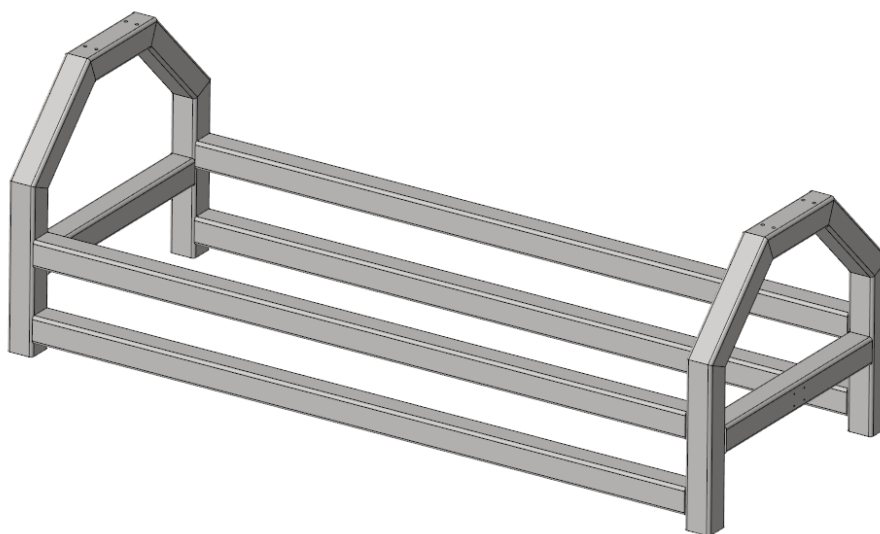
nohami s pryžovým odpružením nebo může být použito vzduchové odpružení. Popis stávajícího technického řešení měřicího stroje je zobrazen viz obr. 1. [1]



**Obr. 1 Popis měřicího zařízení (podklady KSR)**

### 1.2.1 Rám

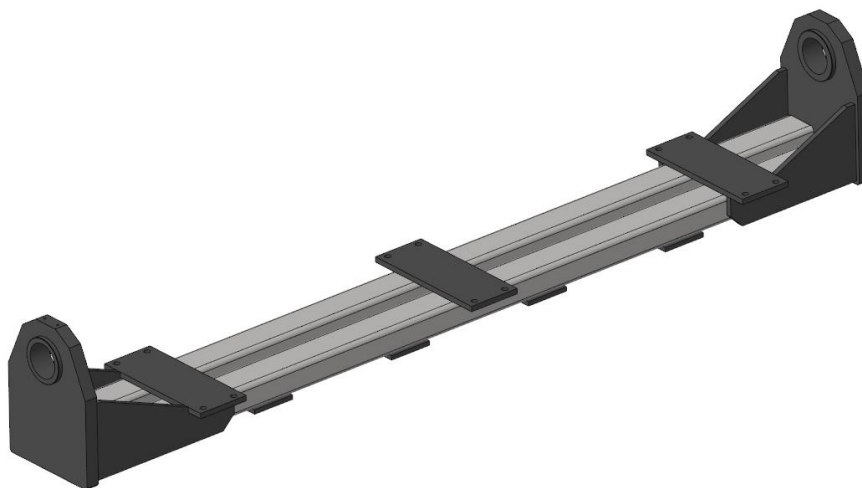
Základ měřicího stroje tvoří tuhý svařovaný ocelový rám z čtvercových trubek s dostatečně velkým prostorem pro umístění vyhodnocovacích jednotek určených k přímé komunikaci s konfokálními snímači tak, jak je zobrazen na obr. 2. [1]



**Obr. 2 Rám konstrukce (podklady KSR)**

### 1.2.2 Kyvná konzola

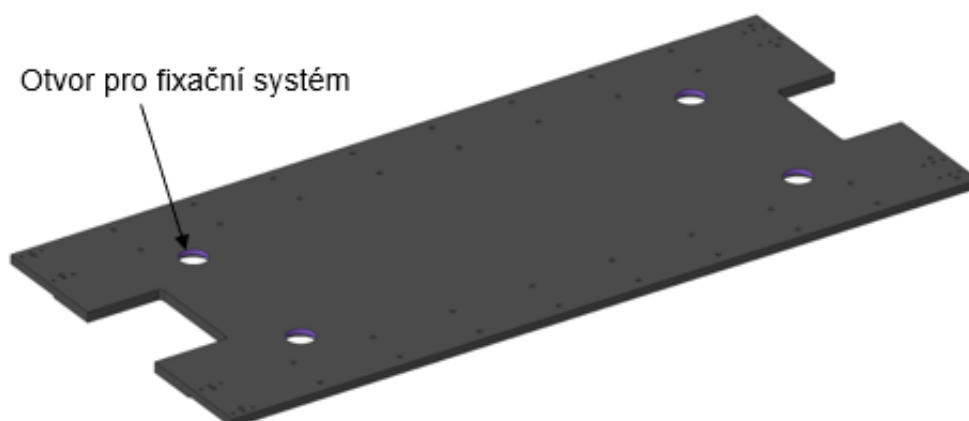
Kyvná konzola (viz obr. 3) je ustavena přes ložiskové jednotky k nosnému rámu a je osazena hliníkovou základní deskou. Konzola umožňuje naklopení bočního autoskla na požadovaný úhel měření. [1]



**Obr. 3 Kyvná konzola (podklady KSR)**

### 1.2.3 Základní deska

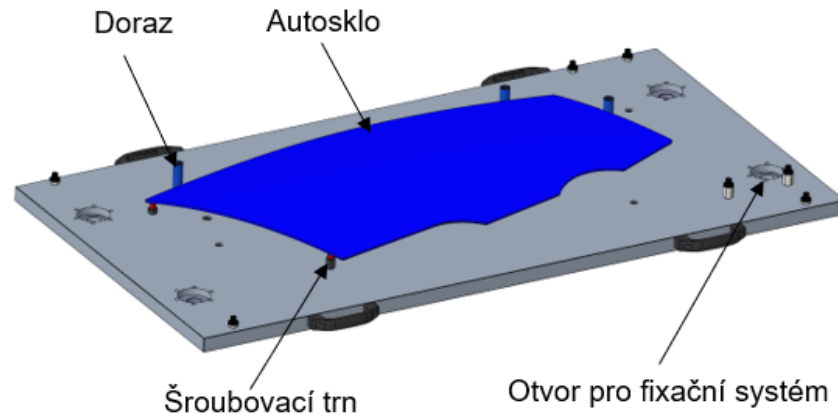
Základní deska (viz obr. 4) je vyhotovena z hliníku a tvoří nosný základ pro ustavovací systém odměřovaných skel, tzv. pseudomaketu. Na spodní straně desky jsou umístěny dvě lineární jednotky s pohony a čtyřmi pouzdry. Do pouzder se vkládá fixační systém, tvořený komponenty od firmy KIPP, který zajišťuje přesné uložení pseudomaketu. [1]



**Obr. 4 Základní deska (podklady KSR)**

### 1.2.4 Pseudomaketa

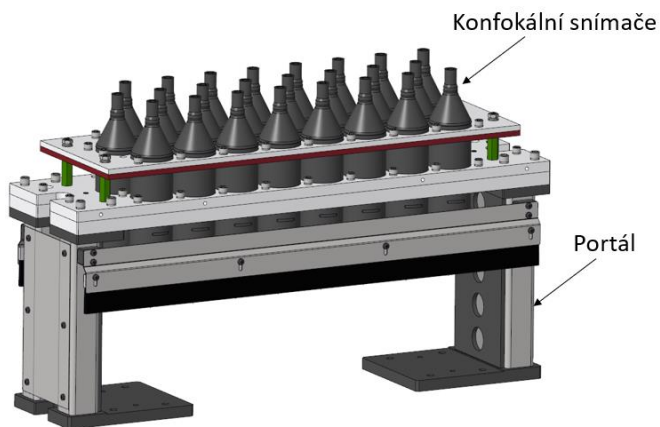
Pseudomaketa (viz obr. 5) je tvarově stálou deskou vyrobenou ze slitiny hliníku a je vyhotovena pro jeden pár autoskel. Obsahuje čtyři otvory pro fixační systém, šroubovací trny a dorazy, které slouží pro ustavení autoskla v RPS bodech. Umístění a výška trnů je dána geometrií autoskla a specifikací RPS bodů. [1]



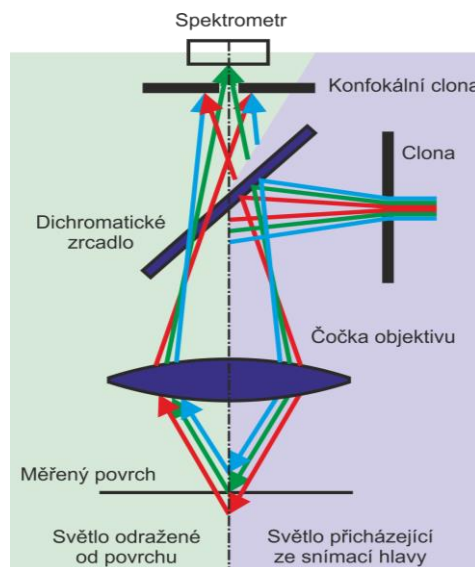
**Obr. 5 Pseudomaketa (podklady KSR)**

### 1.2.5 Portál s konfokálními snímači

Portál s konfokálními snímači (viz obr. 6) je fixován na vozíky lineárních pojezdů. Příčnick se skládá ze dvou desek ze slitiny hliníku. V deskách jsou vyhotoveny otvory pro založení snímačů válcového tvaru. Vhodný princip získávání dat bezdotykového měření bočních autoskel byl realizován pomocí konfokálních snímačů, které eliminují nepřesnost danou elastickými deformacemi a umožňují proměření komplexní geometrie transparentního skla. Snímače fungují na principu zaostřování polychromatického bílého světla na cílový povrch prostřednictvím multičočkového optického systému znázorněného viz obr. 7. Konfokální snímače jsou v průmyslové praxi používány především pro velmi přesné měření. Sklo umístěné na maketě je proměřeno sadou konfokálních snímačů ve 24 liniích. Fixace snímačů je realizována o-kroužky umístěnými v osazení otvorů. Sevření snímačů je vyvozeno přitlakem páru desek. Pro zvýšení přesnosti ustavení snímačů je příčnick doplněn dalšími dvěma deskami s obdobným systémem fixačních o-kroužků. Rozteč mezi deskami je zajištěna distančními sloupky. Tímto způsobem je tělo snímače ustaveno dvojím uchopením. [1, 2]



**Obr. 6 Portál s konfokálními snímači (podklady KSR)**



**Obr. 7 Princip optiky snímače [2]**



## 2 Metody tvorby tuhých konstrukcí

Kapitola tvorby tuhých konstrukcí vychází z rešeršního průzkumu. Jedná se o proces, při kterém se vytvářejí pevné a odolné konstrukce, které jsou schopny odolávat vnějším silám a dalším vlivům. Tyto konstrukce jsou klíčové při výrobě strojů, zařízení a jiných technických aplikací. Vytváření tuhých konstrukcí zahrnuje různé metody a postupy, které zajišťují pevnost a funkčnost konečného výrobku. Jedním z hlavních kroků je výběr vhodných materiálů, které poskytují dostatečnou pevnost, tvrdost, ohebnost a odolnost proti vnějším vlivům. Existuje široká škála materiálů, které lze použít při tvorbě tuhých konstrukcí. Mezi základní konstrukční materiály patří oceli, lehké kovy, kompozitní materiály, plasty. Výběr materiálu však závisí na konkrétní aplikaci a prostředí, ve kterém se bude konstrukce používat. Dalším krokem při tvorbě tuhých konstrukcí je volba vhodného polotovaru na konstrukce. Mezi nejčastěji používané polotovary na konstrukce patří plechy, desky, normalizované profily, stavebnicové profily apod. Při návrhu zařízení je důležitý tvar konstrukce, který vychází z požadavků na funkci. V současné době je při návrhu vhodného tvaru konstrukce věnována velká pozornost optimalizaci. Cílem optimalizace je dosáhnout co největšího využití materiálu a snížení rizika chyb při návrhu. K zajištění přesnosti a kvality výsledného produktu se používají moderní nástroje a technologie jako je 3D modelování, simulace a analýzy provedené metodou konečných prvků. [3]

### 2.1 Materiály

Při volbě materiálu se musí uvažovat hlediska konstrukční, technologická a ekonomická. Rozmanitost těchto požadavků na jednotlivé součásti dává podnět k hledání nových materiálů s takovými mechanickými, technologickými a fyzikálními vlastnostmi, které zajišťují další stupeň pokroku. Zásadně se volí nejlevnější druh materiálu, který vyhovuje všem hlediskům. Materiál navrhuje konstruktér součásti a kontroluje jej technolog. Nejběžněji používané materiály při konstruování jsou: [4]

#### 2.1.1 Kovy

Kovy jsou v dnešní době nejčastěji používaným materiálem na nosné konstrukce. Využívají se v nejrůznějších průmyslových odvětvích jako je například strojný, stavební a letecký průmysl. Nejvíce se uplatňují ocelové a litinové materiály,

ale také i lehké kovové materiály, zejména slitiny hliníku, titanu a hořčíku. Při výběru použitého materiálu se z důvodu hospodárnosti volí takový typ, který účinně odolává mechanickému, tepelnému nebo jinému druhu namáhání. Výše uvedené materiály nacházejí markantní uplatnění v konstrukčních realizacích z důvodu jejich nižších pořizovacích a výrobních nákladů ve srovnání s moderními kompozitními materiály. Výběr vhodného materiálu je klíčovým rozhodnutím, které zahrnuje nejen technické, ale i ekonomické aspekty. Kovové materiály nejběžněji používané při tvorbě tuhých konstrukcí jsou: [3, 4]

## **Ocel**

Je dnes nejpoužívanějším konstrukčním materiálem. Je velmi pevná, odolná a dokáže přenášet velké zatížení. Vlivem působení okolního prostředí je ocel citlivá na vlhkost a může dojít ke korozi. Je tedy potřeba opatřit ji ochranným povlakem např. nátěrem, kovovými povlaky nebo kombinací těchto povlaků. [5]

## **Litina a litá ocel**

Používá se především na kompaktní tělesa a rámy strojů. Výhodou jsou tlumící vlastnosti a možnost dosažení oblých a především složitých tvarů, které nelze vyrobit jinak, než litím. [6]

## **Slitiny hliníku**

Slitiny hliníku se používají ve stále větší míře. Oproti samotnému hliníku má tento materiál mnohem lepší mechanické vlastnosti a zároveň i značnou odolnost proti korozi. Nejznámější je slitina s hořčíkem, manganem a mědí, známá jako dural. Nejčastější použití duralu je v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, ale lze se s ním také setkat při výrobě jízdních kol, výtahů, lehkých žebříků, sportovního náčiní a podobně. [7]

## **Slitiny hořčíku a titanu**

V některých případech se pro nosné konstrukce používají méně obvyklé kovy jako je slitina hořčíku a titanu a to většinou za cenu vysokých nákladů. [6]

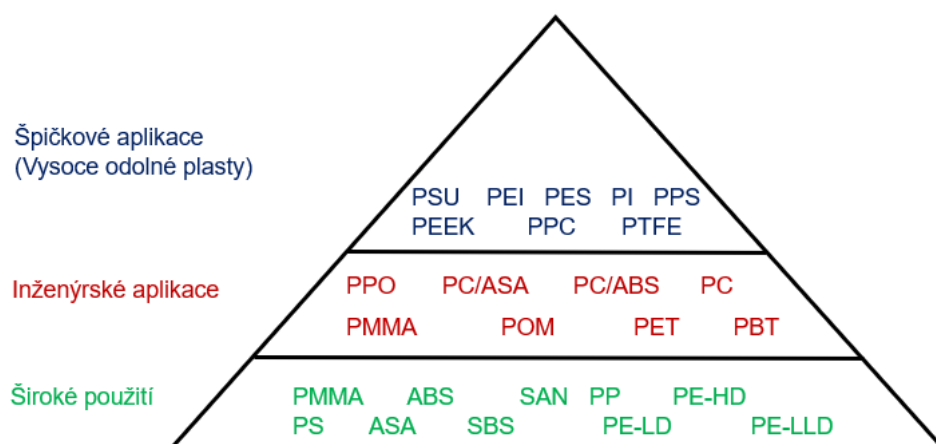
Hořčík a jeho slitiny jsou oblíbenými materiály v automobilovém průmyslu díky svým vlastnostem, které umožňují výrazné snížení váhy konstrukce vozidel. Automobilky jako Audi, Ford, Jaguar, Fiat a Kia Motors Corporation využívají hořčíkové slitiny ve svých výrobcích jako jsou plechy karoserie nebo opěradla

sedaček, která využila automobilka BMW. Použití hořčíku a jeho slitin v konstrukci vozidel nejen snižuje váhu, ale také redukuje vibrace a hluk, který je generován při provozu vozidla. Dále se výrobky ze slitiny hořčíku využívají v leteckém průmyslu, zdravotnickém průmyslu nebo ve sportovním vybavení. [8]

Titan je ideální materiál díky svým vlastnostem jako je vysoká pevnost, nízká hustota a vynikající odolnost proti korozi. Používá se ve vojenské technice, letectví, kosmickém průmyslu, výrobě sportovního náčiní, lodí, lékařství, šperků a hodinek. Titanové slitiny se využívají na výrobu implantátů, cévních stentů, kostních šroubů a chirurgického náčiní. Taktéž se používá jako bílý pigment v barvách. Celkově se stal titan nenahraditelným v mnoha odvětvích průmyslu. [9]

### 2.1.2 Plasty

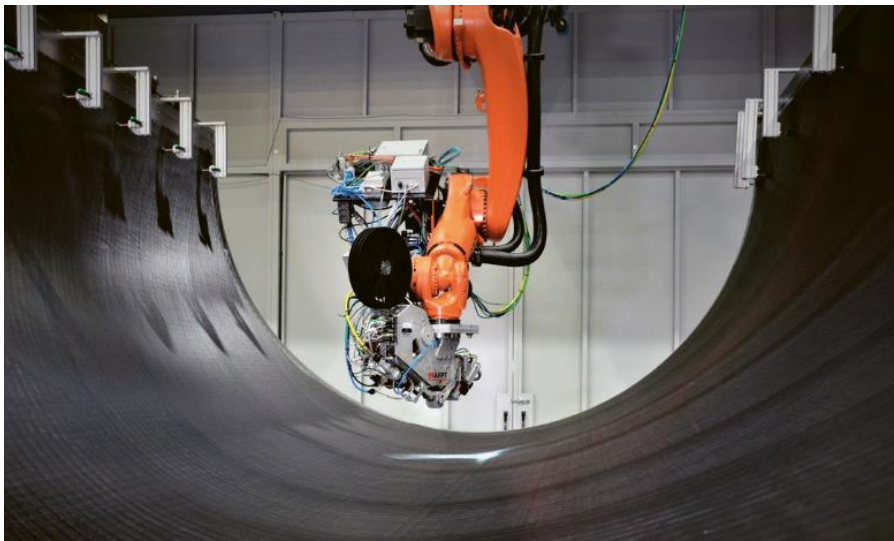
V technické praxi nejsou plasty z pohledu tuhosti pro tvorbu tuhých konstrukcí příliš vhodné. Uplatnění má jen několik desítek druhů plastů. Při volbě materiálu je třeba kromě vlastností a ceny hmoty vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti výrobku, technologické podmínky, ale i konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. K výhodám použití plastů patří nízká měrná hmotnost, izolační vlastnosti a dobré zpracovatelské vlastnosti. Mají také výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění. Plasty nachází uplatnění u konstrukčních dílů, které nejsou vystaveny značnému silovému působení. Podle aplikace a konstrukční složitosti vyráběných dílů lze plasty rozdělit do skupin (viz obr. 8) na plasty pro široké použití, inženýrské aplikace a plasty pro špičkové aplikace. [10]



Obr. 8 Rozdělení polymerů dle aplikace [10]

### 2.1.3 Kompozity

Použití kompozitních materiálů v moderním strojírenství je motivováno návrhem velmi lehkých dílů a konstrukcí s vysokými hodnotami mechanických vlastností, které dosahují podobných vlastností jako je například u slitiny hliníku, hořčíku, titanu a oceli. Nejvýraznější nástup kompozitních materiálů lze sledovat v leteckém průmyslu, kde se převážně kompozitní materiály využívají pro výrobu rozměrných a hmotných dílů jako jsou křídla, ocasní plochy a trup letadla (viz obr. 9), kde je využito laserové nanášení vláken a vytváření kompositu trupu letadla pomocí robota. [3]



*Obr. 9 Laserové nanášení vláken [11]*

Kompozitní materiály se stále více prosazují nejen v leteckém průmyslu, lodním průmyslu a kosmonautice, ale také v civilním průmyslu, především ve sportovním odvětví. [3]

Každý kompozitní materiál je složen z nejméně dvou fází, z nichž alespoň jedna je pevná. Vytužující elementy kompozitních materiálů nesou část vloženého napětí a propůjčují materiálu tuhost. Kompozitní materiály se dělí podle typu fáze na spojitě, kde matrice (pojivo) zprostředkovává přenos zatížení do tužších součástí (plniva) a zajišťuje odolnost kompositu vůči atmosférickým či jiným vlivům prostředí jako je například oxidace, koroze či mechanické poškození. Matrice vždy obklopuje plnivo a dává předmětu tvar. Kompozitní materiály se spojitou fází se dále dělí podle typu matrice na: [12]

## **Kompozity s kovovou maticí**

Kompozity s kovovou maticí využívají mechanismus zpevnění, založený na omezení pohybu dislokací. Mletý kovový prášek s částicemi oxidů, karbidů nebo nitridů chemických prvků je spékán a lisován nebo napařován pomocí práškové metalurgie. Kovová matrice poskytuje kompozitům unikátní vlastnosti jako je elektrická vodivost, nehořlavost, vysoká pevnost a houževnatost. Tyto kompozitní materiály jsou často používány v letectví, automobilovém průmyslu a v aplikacích s vysokými teplotami. Nevýhodou je vyšší cena než u polymerních kompozitů. [13]

## **Kompozity s keramickou maticí**

Pro výrobu kompozitních materiálů s keramickou maticí se často používá prášková metoda, kde se oxidy, karbidy nebo nitridy smíchají a slinují dohromady. Keramická matrice se pak nanáší na vláknitá plniva ve formě vodní suspenze nebo s přídavkem polymerního vazebného prostředku, který se během slinování vypálí. Při použití správných druhů kovů jako výztuže vznikají teplotně odolné materiály, které nacházejí uplatnění zejména v průmyslových aplikacích, například v reaktorech jaderných elektráren nebo raketoplánech. Ovšem nacházejí své uplatnění i v běžném životě například jakožto materiály, které se využívají pro zubní výplně a implantáty. [13]

## **Kompozity s polymerní maticí**

Polymerní kompozity jsou jedny z nejčastěji používaných kompozitů díky svým vlastnostem jako je odolnost proti prostředí, jednoduchá výroba složitých tvarů, nízká teplotní roztažnost, teplotní odolnost a elektro-izolační vlastnosti. Kompozity s polymerní maticí se dělí na reaktoplastické, termoplastické, a to podle typu polymeru matrice. Nejčastěji využívaná plniva jsou sklo, uhlík, aramid, hliník, bor a další. [13]

Kompozitní materiály se dále dělí podle typu fáze na nespojitě, kde nespojitá fáze má nejčastěji roli vyztužující. Výztuž obecně slouží k vytvoření nového materiálu s vysokou úrovní mechanických vlastností. Nespojitá fáze může být však i nositelem jiných vlastností materiálu jako je například elektrická vodivost. Typy vyztužujících prvků u kompozitních materiálů s nespojitou fází jsou: [12]

- částice – minerální plniva, polymerní plniva, saze, oxid křemičitý,
- destičky – montmorillonity (jíly),
- whiskery – karbid křemíku,
- vlákna – skelná, uhlíková, aramidová, čedičová, přírodní,
- tkaniny – tkané, netkané, skelné, uhlíkové, aramidové, čedičové,
- kombinace – hybridní kompozity (vlákna + částice).

## 2.2 Polotovary na konstrukce

Při výrobě polotovarů se výchozí materiál nejčastěji zpracovává tvářením, odléváním, svařováním, pájením, řezáním a lepením. Polotovar je tedy výrobek určený k dalšímu zpracování. Například výkovek je pro kovárnu výrobkem, ale pro další proces výroby, např. obrábění, je polotovarem. Polotovary ve strojírenství významně ovlivňují proces výroby a montáže strojů a mechanických zařízení a to zejména z konstrukčního hlediska. Začlenění polotovarů do výrobního procesu je následující: [4]

### 2.2.1 Polotovary vyráběné tvářením

Tváření je efektivní a hospodárná metoda s vysokou produktivitou a tedy i s velkou perspektivou. Výrobky jsou pevné a lehké s efektivním využitím materiálu a minimálním odpadem. Během obrábění odpadá asi 20 až 40 % materiálu. Výrobní procesy se dají dobře mechanizovat a automatizovat, což vede ke snížení výrobních nákladů. Příklady ocelových polotovarů vyráběných tvářením jsou: [4]

- válcované polotovary – válcování tyčí, plechů, drátů,
- tažené polotovary – tažení tyčí, drátů,
- výroba trubek – trubky svařované, bezešvé,
- vytlačované polotovary.

### 2.2.2 Polotovary vyráběné odléváním

Odlévání je technologie výroby součástí z kovů nebo jiných tavitelných materiálů, při které se tavenina vstříkne nebo vlije do formy, jejíž dutina má tvar negativu odlitku. Odléváním je možné vyrábět složité součásti, které by bylo obtížné či nemožné vyrobit jinými technologiemi. Příklady polotovarů vyráběných odléváním jsou: [4]

- odlitky motorových bloků,
- odlitky ozubených kol,
- odlitky ložisek.

### **2.2.3 Polotovary vyráběné svařováním**

Při svařování vznikají nerozebíratelná spojení strojních součástí i celých konstrukcí z tvarově jednoduchých polotovarů. Tyto konstrukce či strojní součásti jsou většinou vyrobeny z hutních polotovarů, někdy i z výkovků či odlitků. Výhodou svařování je trvanlivost, pevnost a těsnost. Svařování zjednodušuje konstrukci, zmenšuje spotřebu materiálu, zvyšuje produktivitu práce, zkracuje výrobní časy a pohotově umožňuje rychlou realizaci konstrukčních návrhů. Nevýhodou technologie svařování je realizace nerozebíratelných spojů, ve kterých dochází ke vzniku vnitřního pnutí a následným deformacím svařovaného materiálu. Mezi běžné metody, které vedou ke snížení vzniku deformace a vnitřního pnutí patří tepelné zpracování, mechanické opracování nebo volba vhodných svařovacích postupů. Další metodou minimalizující deformaci a vnitřní pnutí ve svařovaném spoji je použití zámkového systému, kde je důležité zajistit správné zarovnání a fixaci svařovaných dílů. Správné provedení zámkové konstrukce může zvýšit pevnost a minimalizovat problémy spojené s deformacemi a vnitřním pnutím. [2, 3]

### **2.2.4 Polotovary vyráběné pájením**

Jedná se o metalurgický proces, kterým vzniká nerozebíratelné spojení pomocí roztavené pájky, kde pájené plochy nejsou natavovány, ale smáčeny roztavenou pájkou. Pevnost pájky je dána mezivrstvou. Čím tenčí mezivrstva je, tím větší pevnost pájeného spoje je a naopak. Pájení se používá v případech, kdy je potřeba spojit dva kovové materiály s nižší teplotní odolností, jsou tenké nebo pro opravy jemných kovových součástí. [4]

### **2.2.5 Polotovary vyráběné žárovým dělením materiálu**

Tepelné řezání materiálu podstatně zkracuje čas, který je potřebný na výrobu a obrábění polotovarů. Prosazuje se i z důvodu nahrazení zápusťkového kování, výroby velkých polotovarů, které by se vyráběly odléváním nebo volným kovááním a také umožnění výroby jednotlivých dílů svarků. [4]

## 2.2.6 Polotovary vyráběné lepením

Metoda lepení v moderní technologii zaujímá významné místo a mnohdy se vyrovná spojování materiálu jako je pájení, spojování šrouby, svařování apod. Lepené spoje mají řadu předností. Nedochozí v nich k zeslabení nosného průřezu, spojovaný materiál je méně tepelně namáhán a také umožňují spojovat tenké materiály. [4]

## 2.3 Tvar konstrukce

Tvar konstrukce vychází z požadavků na funkci. Při navrhování produktů je snahou designérů a inženýrů splnění požadavků na funkci s estetickými požadavky a ergonomickými potřebami uživatele. Návrhem vhodného tvaru může dojít např. ke zlepšení aerodynamiky vozidla, nebo také ke zvýšení uživatelské přívětivosti a pohodlí. Vhodného tvaru a potřebných mechanických vlastností konstrukce, které splňují požadavky designéra, lze dosáhnout prostřednictvím optimalizace. [14]

### 2.3.1 Koncepce strojních konstrukcí

Pro dosažení potřebné tuhosti a únosnosti v prostoru se konstrukce zhotovují jako plnostěnné (případně rámové) nebo příhradové. Snížení hmotnosti se snažíme dosáhnout použitím dutých průřezů s koncentrací materiálu co nejdále od neutrálních os. Tento princip je využíván při konstrukci tenkostěnných skořepin, neboli tzv. skeletů. [6]

#### Plnostěnné konstrukce

Stěny plnostěnné konstrukce, respektive stojny, jsou tvořeny plným plošným materiálem viz obr. 10. Výhodou je jednoduchost povrchových úprav, kompaktní vzhled a obvykle menší pracnost výroby. Plnostěnné konstrukce jsou ideální pro malé konstrukce, ale používají se i u velkých celků. [6]

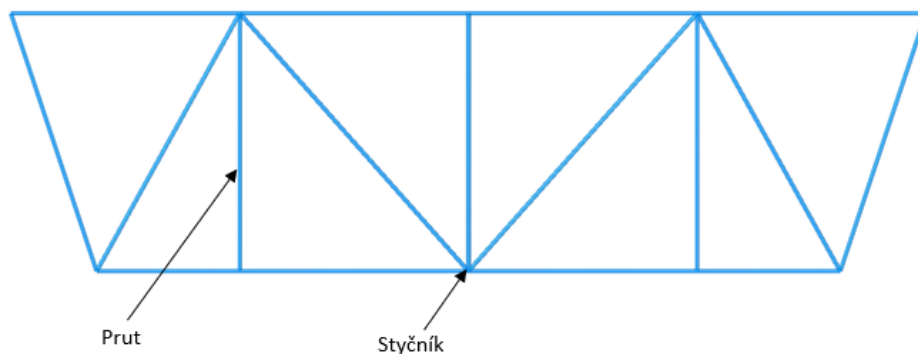


*Obr. 10 Plnostěnná konstrukce portálového jeřábu [15]*



## Příhradové konstrukce

Příhradové konstrukce jsou složeny z jednotlivých prutů. Pruty se stýkají v uzlech neboli styčnicích, přičemž základní uspořádání prutů je trojúhelník viz obr. 11. Vzhledem k relativní poddajnosti v ohybu jsou pruty schopny přenášet osově síly tahové a tlakové. Spojení v uzlech může být provedeno svařováním, nýtováním nebo pomocí šroubových spojů a to přes styčnickové plechy nebo bez nich. Příhradové konstrukce jsou proti plnostěnným většinou lehčí, avšak jejich členitost může znamenat větší pracnost. Mezi další nevýhody patří neucelený vzhled a obtížná ochrana proti povětrnostním vlivům apod. [6]



**Obr. 11 Příhradová konstrukce**

## Skořepinové konstrukce

Skořepinové konstrukce jsou v podstatě konstrukce plnostěnné. Jedná se o konstrukce s mimořádně velkým poměrem tloušťky stěny vůči dalším rozměrům. Odolnost stěn proti deformaci je dosaženo ohyby, prolisy a zakřivením konstrukce. Klasickým příkladem je nosná kostra automobilu zobrazená na obr. 12. [6]



**Obr. 12 Skořepinová konstrukce kostry automobilu [6]**

### **2.3.2 Optimalizace**

Pro optimalizaci konstrukce a dosažení lepších vlastností konkrétních prvků se využívají různé metody a techniky. Jednotlivé metody mohou být kombinovány a upraveny podle konkrétních požadavků a úkolů, které je potřeba optimalizovat. Před provedením změn je důležité provést důkladnou analýzu a testování, aby bylo zajištěno dosažení požadovaných výsledků. Metody optimalizace, které mohou být provedeny jsou: [16]

#### **Žebrování**

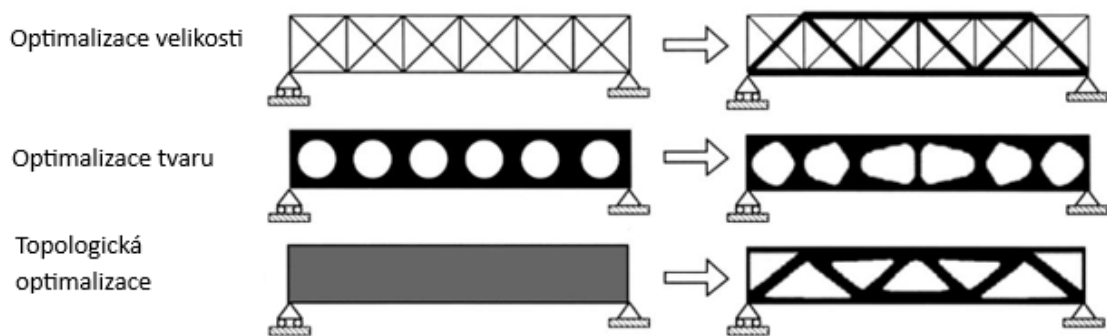
Tvorba žebrovaných konstrukcí představuje možnost, jak dosáhnout vyšší tuhosti a pevnosti. Žebrování se používá k zesílení konstrukce a snížení její hmotnosti. Dalším důvodem použití žeber může být pozicování dílů při montáži, zajištění lícování nebo použití žeber jako dorazů. [17]

#### **Tvarová odlehčení**

Provádí se v rámci minimalizace hmotnosti a to především v případě použití plechů. Tvarové odlehčení plechů z hliníkových slitin obvykle není tak výrazné jako u ocelových materiálů, protože často vede ke ztrátě tuhosti na úkor menší úspory hmotnosti. Běžným způsobem provedení tvarového odlehčení je použití výřezů, dutin nebo děr v konstrukci. [3]

#### **Strukturní optimalizace**

Ve vývojové etapě produktu má klíčovou roli fáze koncepčního návrhu. Provedená rozhodnutí v této fázi vývoje mají dopad na průběh ostatních fází, ať už na výrobu nebo testování. Proto je nutné provést více variant a alternativ určených k vyhodnocení a následnému nalezení co nejoptimálnějšího řešení. V posledních letech došlo k výrazným pokrokům výpočetní techniky, které umožnily provádět simulace jednotlivých konfigurací v různých podmínkách. Tyto pokroky pak také umožnily podnikům šetřit čas a peníze. Strukturální optimalizace je založena na určení nejvhodnějšího rozložení materiálu uvnitř navrženého prostoru s ohledem na přenesení definovaného zatížení. Metody strukturální optimalizace jsou obecně rozděleny na optimalizace velikosti, tvaru a topologie viz obr. 13. [18]



**Obr. 13** *Strukturní optimalizace [18]*

Optimalizace velikosti se zaměřuje na efektivní návrh příčných řezů jednotlivých částí konstrukce. Pokud je známé napětí v konkrétním místě konstrukce, je možné navrhnout příčný řez (ocelový profil). [18]

Při optimalizaci tvaru je celková topologie konstrukce definována a známa, ale v konstrukci se mohou vyskytnout místa s vysokým napětím. Optimalizace tvaru se snaží dosáhnout nejlepšího výsledku působení napětí v konstrukci pomocí úpravy tvaru či parametrů materiálu. [18]

Další vhodnou technologií k vytvoření potřebného designu je topologická optimalizace, která má uplatnění v aditivní technologii. Topologická optimalizace využívá metodu konečných prvků pro optimální rozložení materiálu v navrhovaném prostoru a množství materiálu, který je nutný pro přenesení zatížení. Touto metodou je při výpočtu vyhledáván předem neznámý tvar a topologie konstrukce tak, aby byly výsledky optimální. Předem je známé pouze prostředí jako jsou okrajové podmínky a optimalizační kritéria. Nejčastějším kritériem je hmotnost, protože hmotnost je jedním ze základních hledisek hospodárnosti konstrukce. Topologická optimalizace může řešit nejen úsporu hmotnosti, nákladů, ale i snížení nebo eliminaci vibrací díky optimalizaci tvaru a tím snížení mechanického namáhání, opotřebení a dalších nežádoucích efektů. [18]

### 3 Návrh konstrukčního řešení

Návrh konstrukčního řešení stroje byl proveden optimalizací s využitím numerické simulace. Cílem této optimalizace bylo zvýšení tuhosti nosného rámu stroje a případné provedení úprav, vedoucích k navýšení přesnosti měření stroje.

Pro řešení své diplomové práce jsem k simulaci využíval software PTC Creo, vyvinutý americkou firmou PTC. Creo je CAE aplikace, která je určena k optimalizaci 3D výrobků, simulacím a k provádění analýz. Díky CAE mohou konstruktéři optimalizovat výrobky v raných fázích vývoje a také lépe porozumět strukturálním a termálním vlastnostem produktu. V rámci této kapitoly jsou popsány základní funkce a možnosti tohoto softwaru. Software se skládá ze tří hlavních částí, jimiž jsou pre-processing, processing a post-processing. [19]

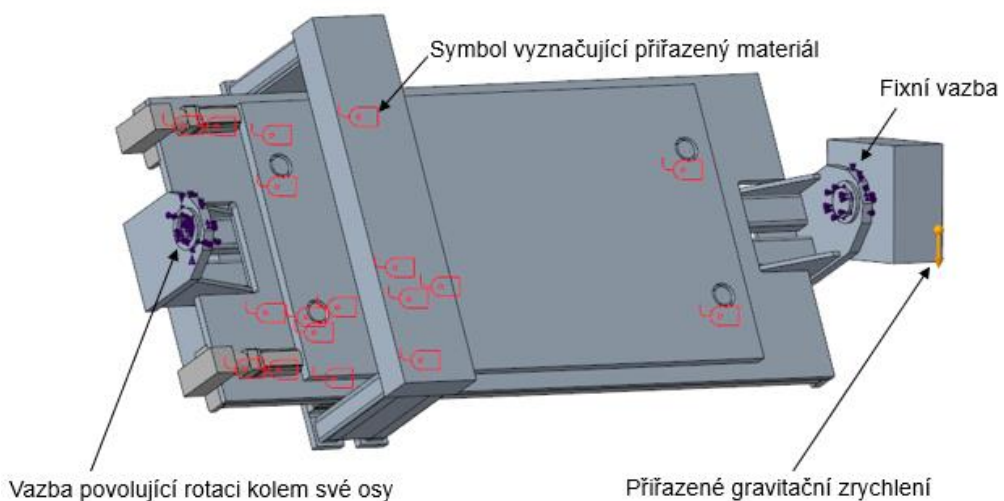
V rámci pre-processingu se provádí veškeré úkony spojené s tvorbou modelu. Především je potřeba definovat geometrii, materiál, okrajové podmínky neboli vazby a zatížení. Nejdříve je potřeba vytvořit geometrii, a to buď pomocí importu nebo přímo v pre-processoru. Pořadí dalšího postupu je volitelné a je na uživateli, jaké vlastnosti modelu bude definovat. Těsně před spuštěním samotného výpočtu simulace se provádí kontrola 3D modelu. [20]

V processingu probíhá sestavení rovnic a jejich následné řešení. Tato fáze probíhá bez zásahu uživatele. Uživatel může průběh simulace pouze sledovat. Při spuštění výpočtu může ještě proběhnout kontrola modelu a případně i kontrola vygenerované sítě. Tyto operace jsou však součástí pre-processingu. Po úspěšném dokončení processingu následuje post-processing. [20]

Tato fáze slouží pro zobrazení výsledků simulace. V první řadě by měl uživatel zkontrolovat získané výsledky a posoudit, zdali jsou reálné a případně rozhodnout o návrhu jiného řešení. Uživatel provádí simulace do doby, dokud nenajde vhodné řešení dané problematiky. [20]

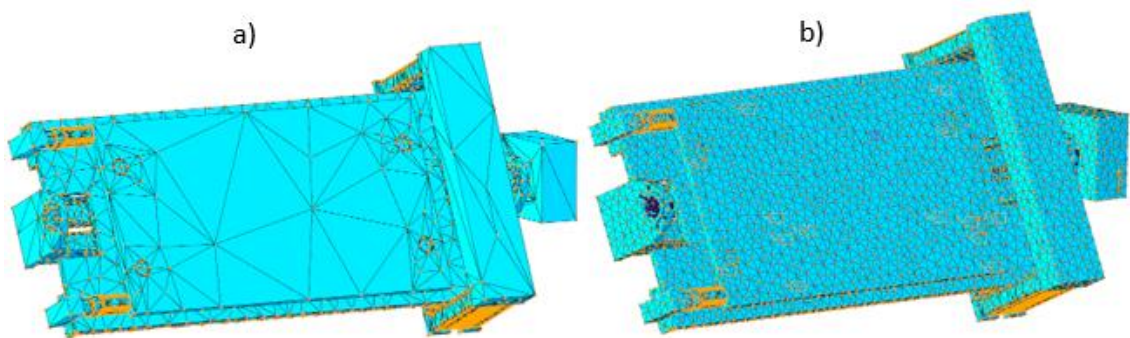
### 3.1 Simulace v softwaru PTC Creo Simulate

Pro optimalizaci konstrukce byl vytvořen efektivní model, který obsahuje množství zjednodušujících předpokladů. Vytvoření složitějšího modelu je přesnější na výpočet, ale také finančně a časově náročnější. Nejde jenom o výpočetní čas, ale i o dobu strávenou přípravou modelu a určením vstupních parametrů. Naopak vytvořením jednoduchého modelu bude výpočet simulace méně přesný a levnější, než model složitý. Z toho důvodu byl vytvořen efektivní model, který tvoří kompromis mezi přesností a nákladností [20]. Pro výpočet simulace byl vytvořen co možná nejjednodušší model, který splňuje kritéria efektivního modelu. V rámci pre-processingu došlo ke zjednodušení konstrukce, kde byl zachován tvar a rozměry jednotlivých dílů, které jsou důležité pro přesnost výpočtu. Zároveň však byly odstraněny závitové díry a otvory, které nemají na přesnost výpočtu významný vliv. Vytvořené modely byly vloženy do sestavy a připraveny pro řešení úlohy. V sestavě byla kyvná konzola nastavena do polohy car position. Tato poloha je vždy vyhotovena pro jeden pár skel tj. levé a pravé sklo stejného typu. Jedná se o úhel, pod kterým je automobilové sklo měřeno konstantní rychlostí a činí tak naklopení konzole o  $65^{\circ}$  pro levé a po překlopení i pro pravé sklo. Jelikož je v tomto případě řešena deformace pouze při měření a ne při manipulaci se sklem, bude tato úloha řešena staticky. Po určení geometrie modelu pomocí CAD softwaru byl stanoven materiál pro jednotlivé díly a definiční okrajové podmínky viz obr. 14. Následně byla vytvořena síť modelu.



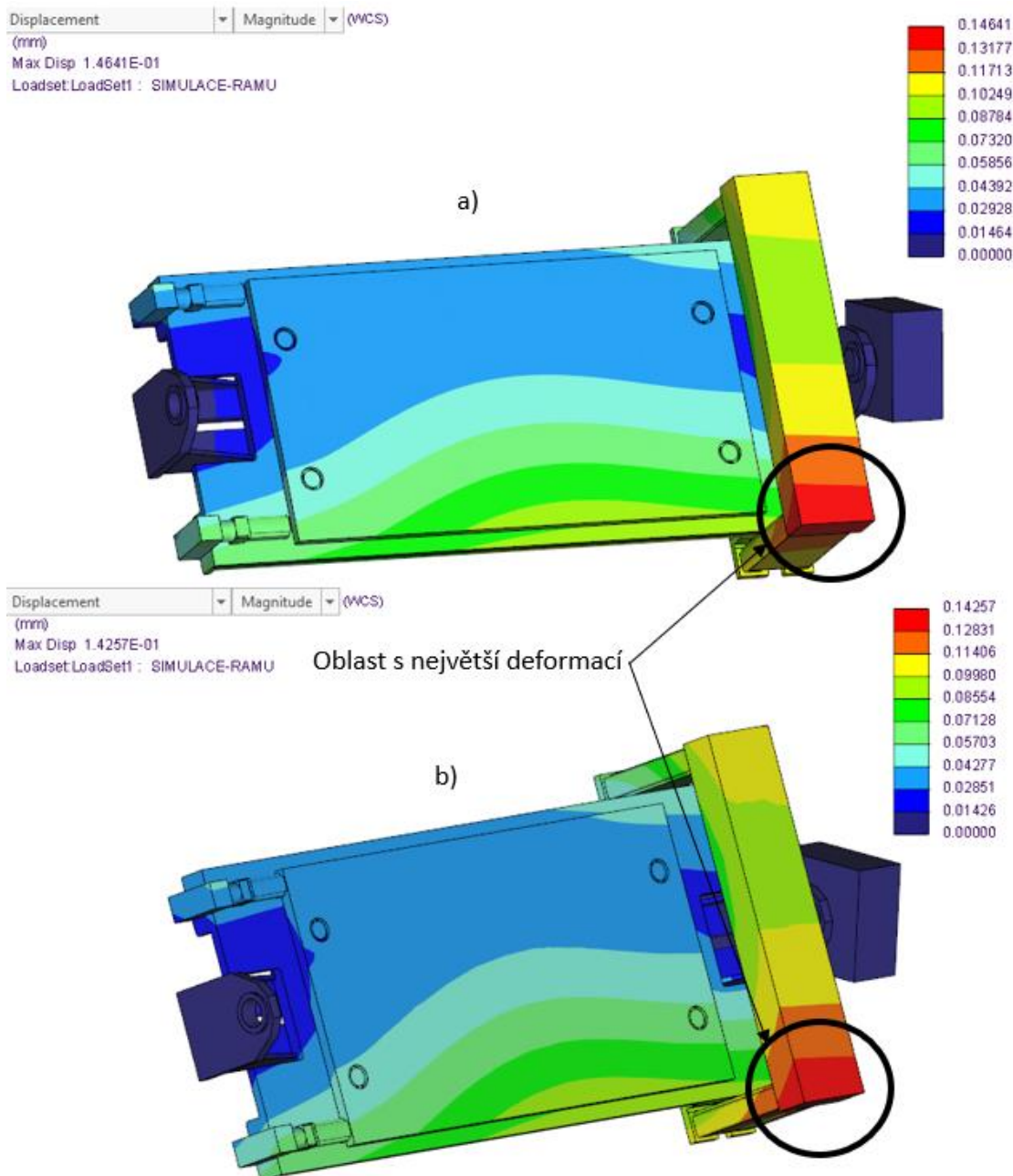
**Obr. 14** Definice okrajových podmínek a materiálu

Nastavení sítě v PTC Creo probíhá manuálně nebo automaticky pomocí příkazu AutoGEM. Sít' vytvořená pomocí tetraedrových prvků (čtyřstěnů) může být upravena ve zvoleném místě, nebo je možné síti nastavit vyšší hustotu, aby byla jemnější a výpočet přesnější. V tomto případě byla porovnávána přesnost automaticky vygenerované sítě (a) se sítí manuálně nastavenou (b). Manuální úprava spočívala v nastavením vyšší hustoty sítě pomocí příkazu Maximum Element Size, kde velikost elementu byla pro lepší dosažení výsledků nastavena na 10 mm. Grafické porovnání automaticky vygenerované sítě se sítí manuálně nastavenou je vyobrazeno na obr. 15.



**Obr. 15 Porovnání sítě – a) Automaticky generovaná, b) Manuálně nastavená**

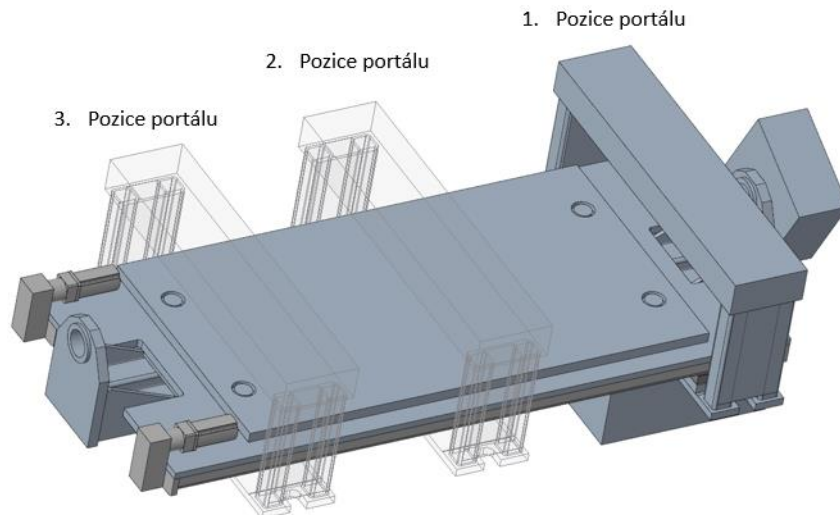
Při simulaci byla zjištěna nejvíce namáhaná oblast. Z porovnání výsledků automaticky generované (a) a manuálně nastavené sítě (b) (viz obr. 16) lze říct, že z důvodu malého rozdílu výsledků deformace a úspory času budou veškeré simulace nastaveny s automaticky vygenerovanou sítí.



**Obr. 16 Porovnání deformace – a) Automatická síť, b) Manuálně nastavená síť**

Pro dosažení více výsledků byl portál napoložován do tří pozic viz obr. 17. První pozice portálu je nastavena do polohy ještě před spuštěním přejezdu nad maketou s automobilovým sklem. Jedná se o výchozí stav stroje, kde ještě neprobíhá měření tvaru automobilového skla. Ve druhé pozici je portál umístěn doprostřed makety. Třetí pozice je poslední poloha portálu, kde pojízdný portál skončí s měřením tvaru automobilového skla.

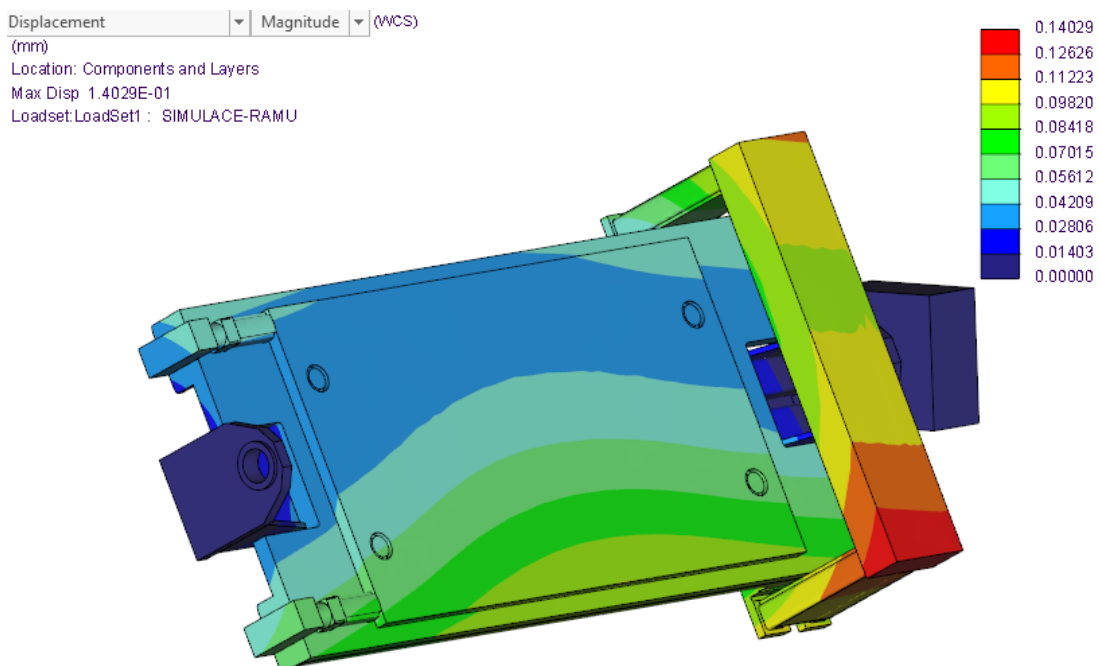




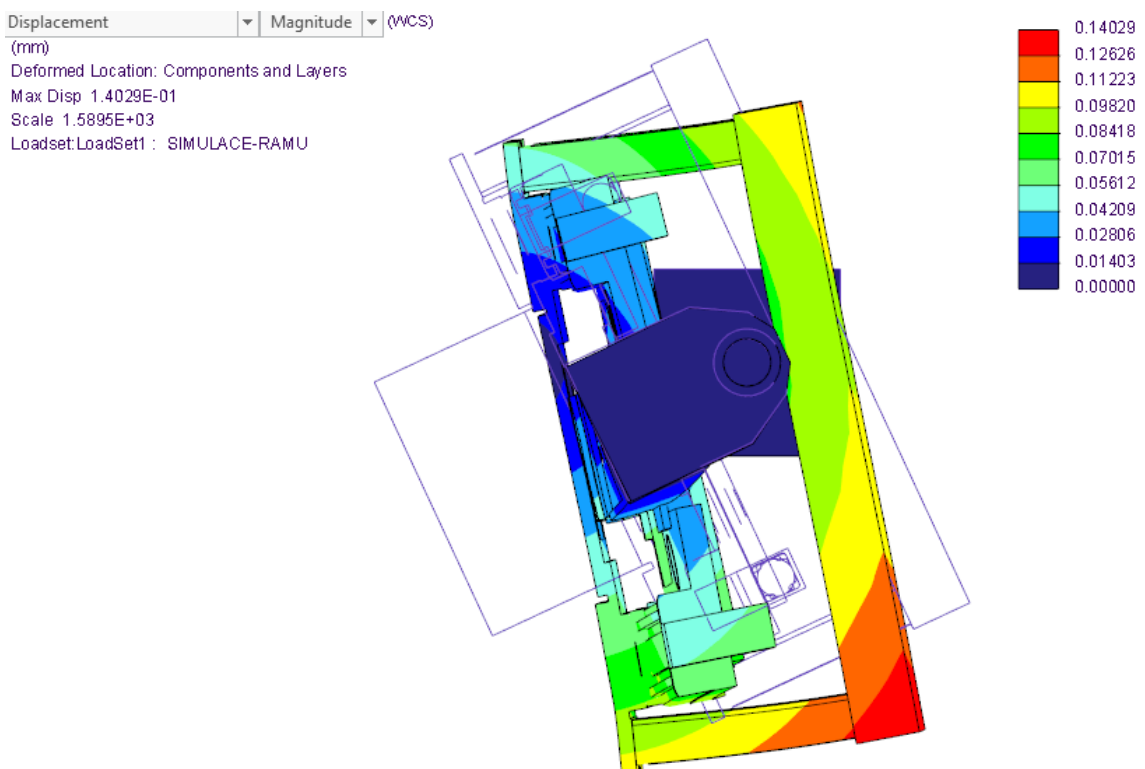
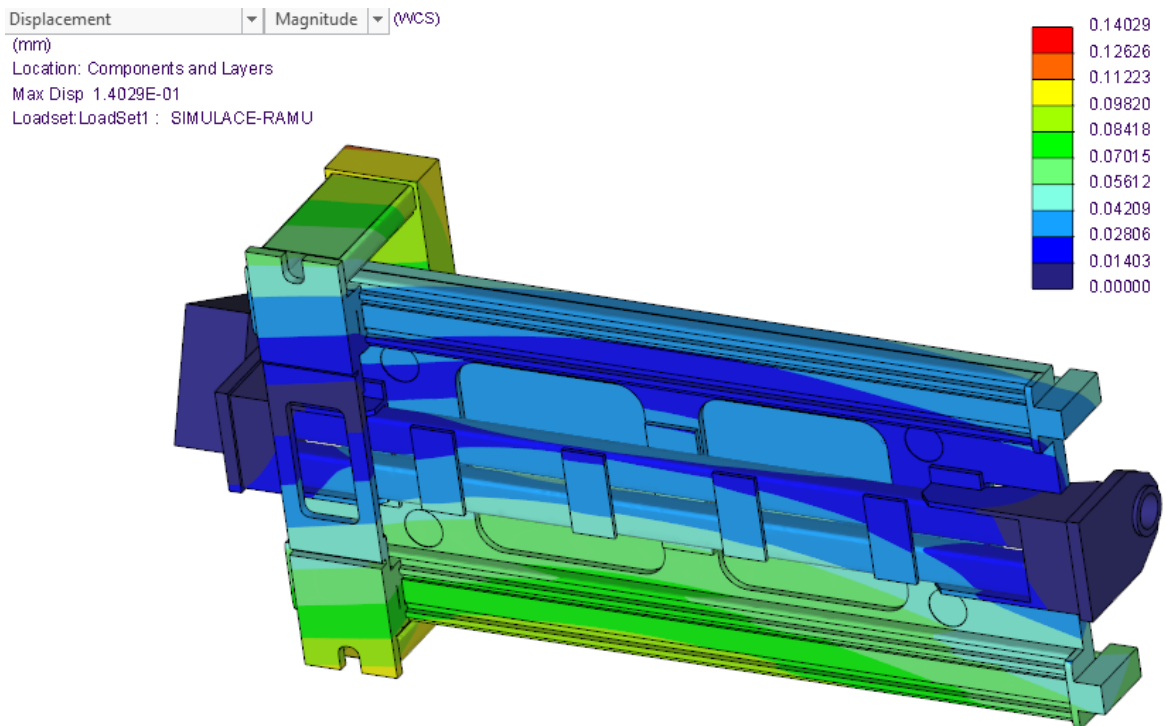
**Obr. 17 Pozice portálu**

### 3.2 Simulační analýza výchozího konstrukčního stavu

V každém výsledku simulace byla skryta krabice s elektronikou a to z důvodu lepší viditelnosti průběhu deformace. Výsledek první pozice portálu současného technického řešení stroje je vyobrazen na obr. 18. Na obrázku je vidět místo s největší deformací, které je zobrazeno červenou barvou. Konstrukce měřicího zařízení je z důvodu uložení kyvné konzole pod vlastní tíhou přejezdového portálu ohýbána a deformována do tvaru vrtule. Vlivem vlastní hmotnosti portálu a naklonění konstrukce do polohy car position, který činí  $65^{\circ}$  dochází k mírnému podkosení portálu.



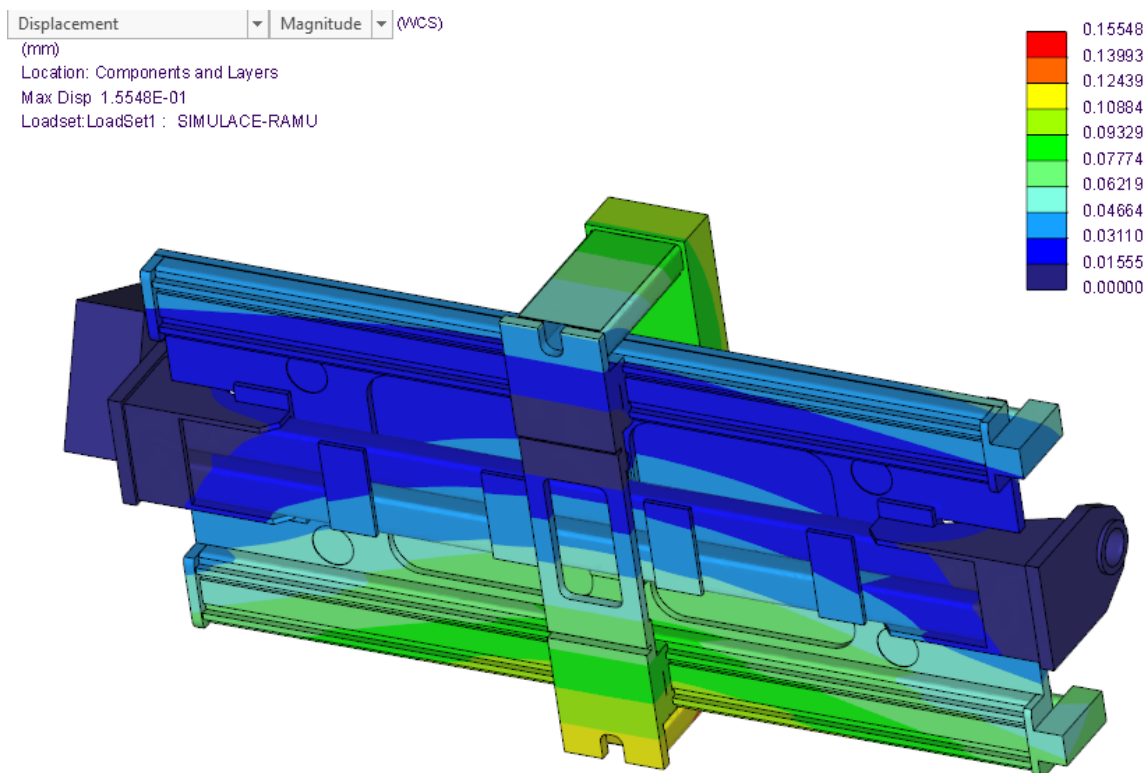
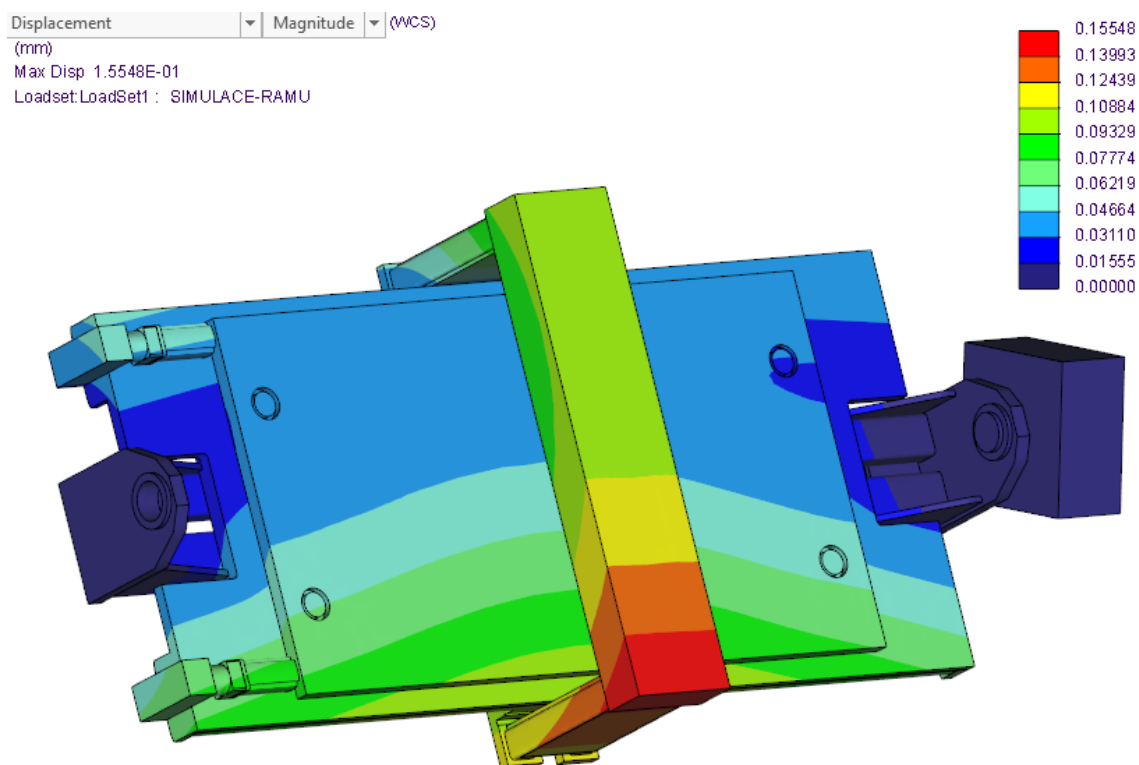


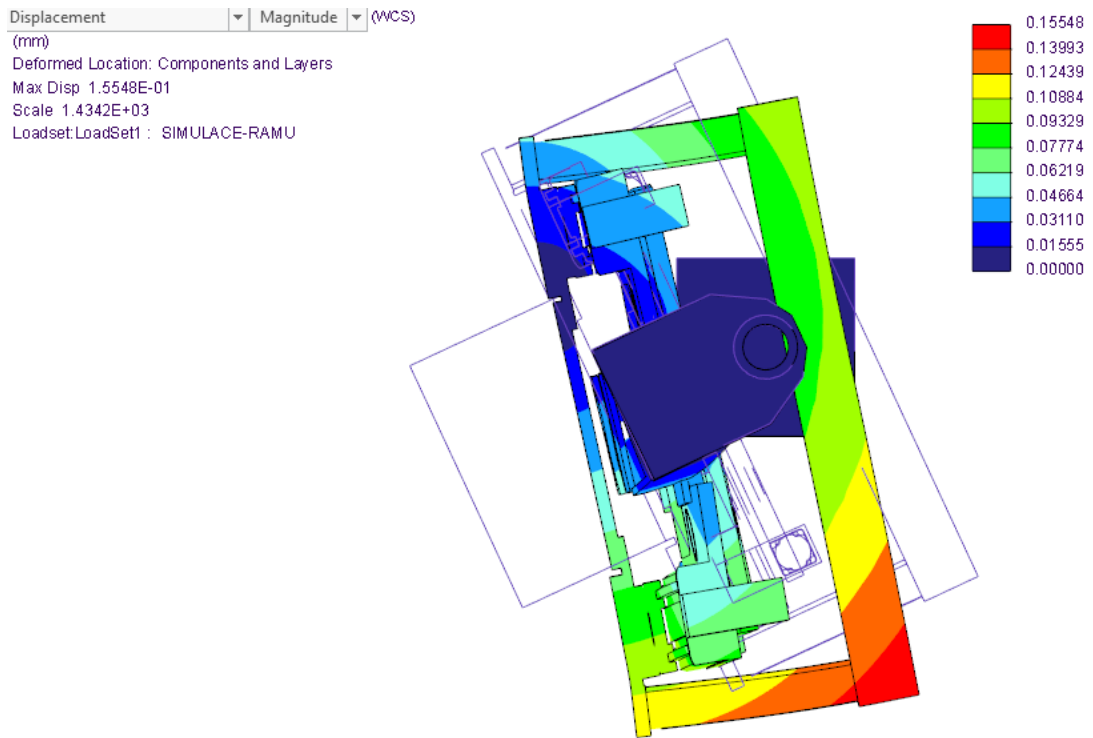


**Obr. 18 První pozice portálu současného technického řešení stroje**

Ve druhém výsledku simulace byl portál nastaven na střed zařízení viz obr. 19. Deformace způsobená změnou polohy portálu je vyšší z důvodu přesunutí zatížení od otočného uložení na střed měřicího stroje. Tato změna polohy portálu způsobuje větší průhyb konstrukce. Stejně jako v první, tak i ve druhé pozici je

konstrukce měřicího zařízení deformována pod tíhou přejezdového portálu do tvaru vrtule. Vlivem vlastní hmotnosti portálu a naklopení konstrukce do polohy car position dochází k mírnému podkosení portálu.

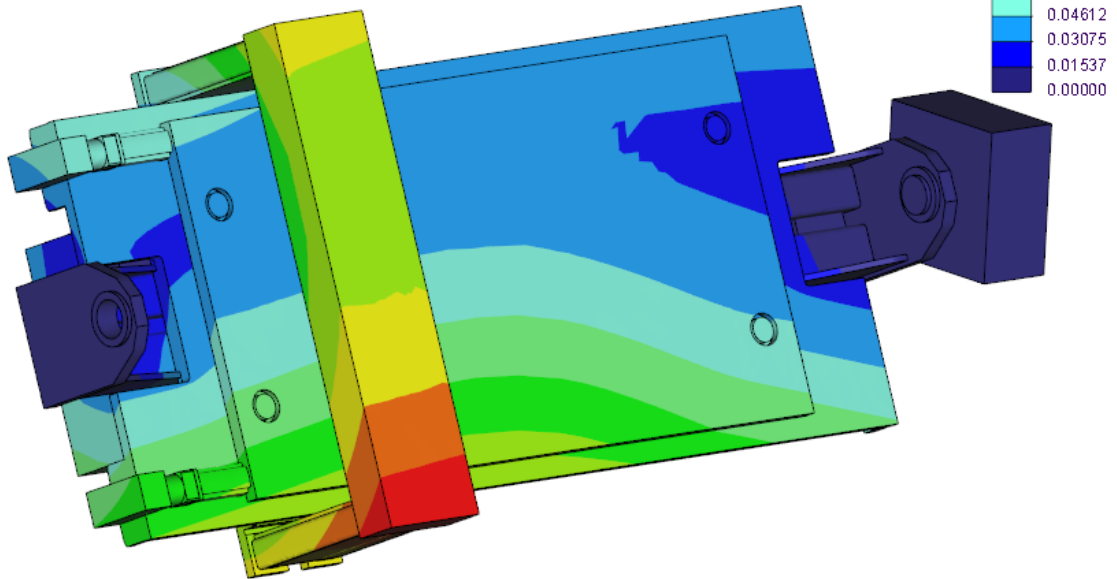




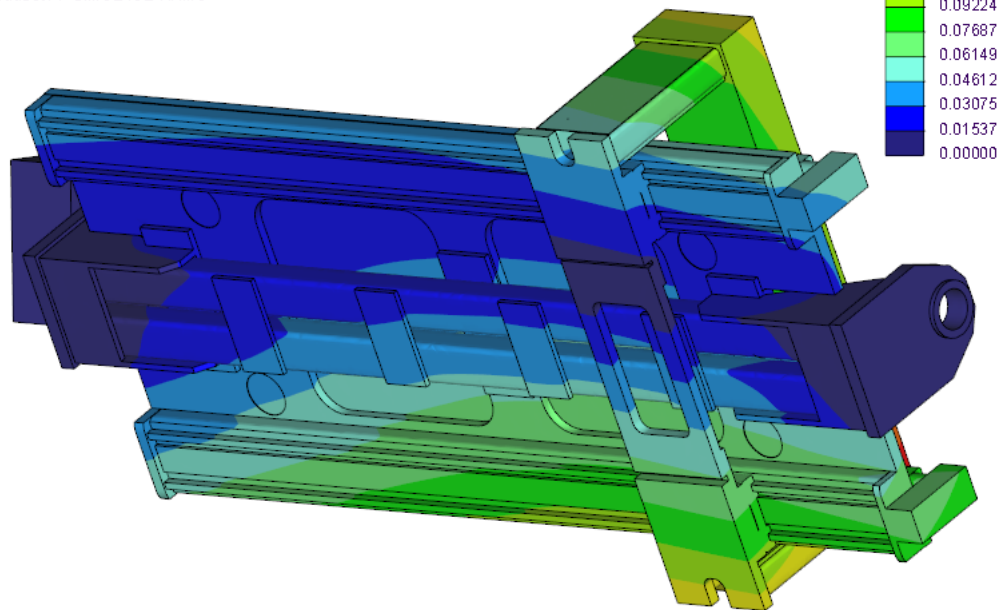
**Obr. 19 Druhá pozice portálu současného technického řešení stroje**

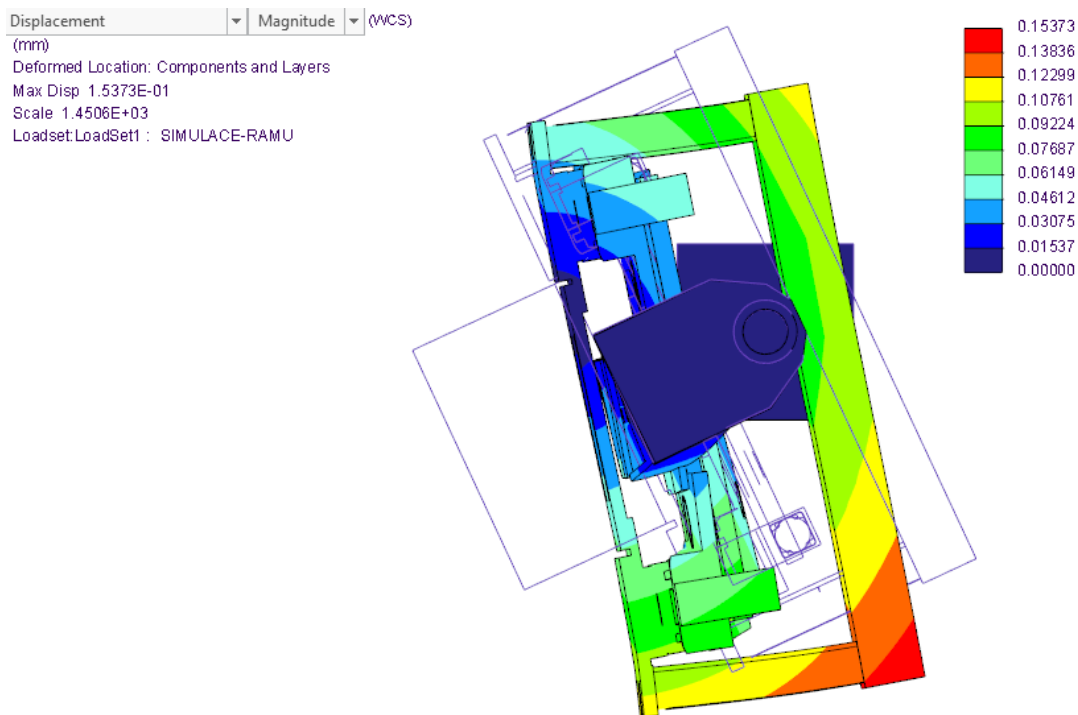
Třetí pozice portálu byla nastavena do polohy po skončení měření viz obr. 20. Jedná se tedy o polohu, ve které poslední řada konfokálních snímačů přestane odměřovat tvar automobilového skla. Průběh výsledné deformace měřicího zařízení se snižuje z důvodu přemístění působícího zatížení způsobeného přejezdovým portálem s konfokálními snímači umístěnými blíže k otočnému uložení měřicího stroje. Podobně jako v předešlých pozicích dochází k deformaci stroje do tvaru vrtule a také k podkosení pojezdového portálu.

Displacement (mm)  
Max Disp 1.5373E-01  
Loadset: LoadSet1 : SIMULACE-RAMU



Displacement (mm)  
Location: Components and Layers  
Max Disp 1.5373E-01  
Loadset: LoadSet1 : SIMULACE-RAMU



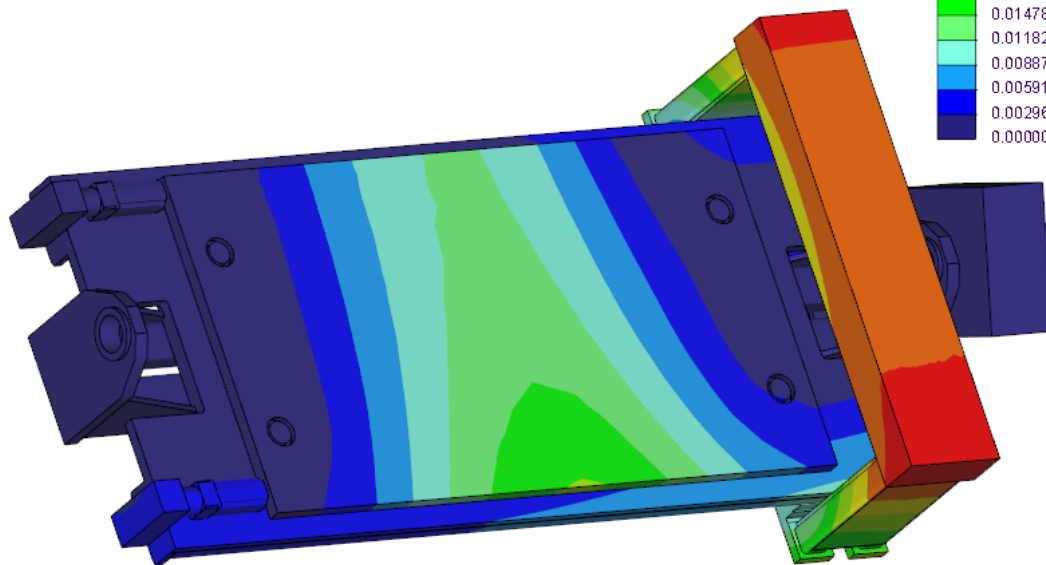
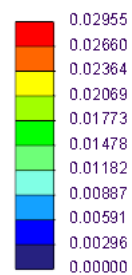


**Obr. 20 Třetí pozice portálu současného technického řešení stroje**

### 3.3 Postup řešení problematiky

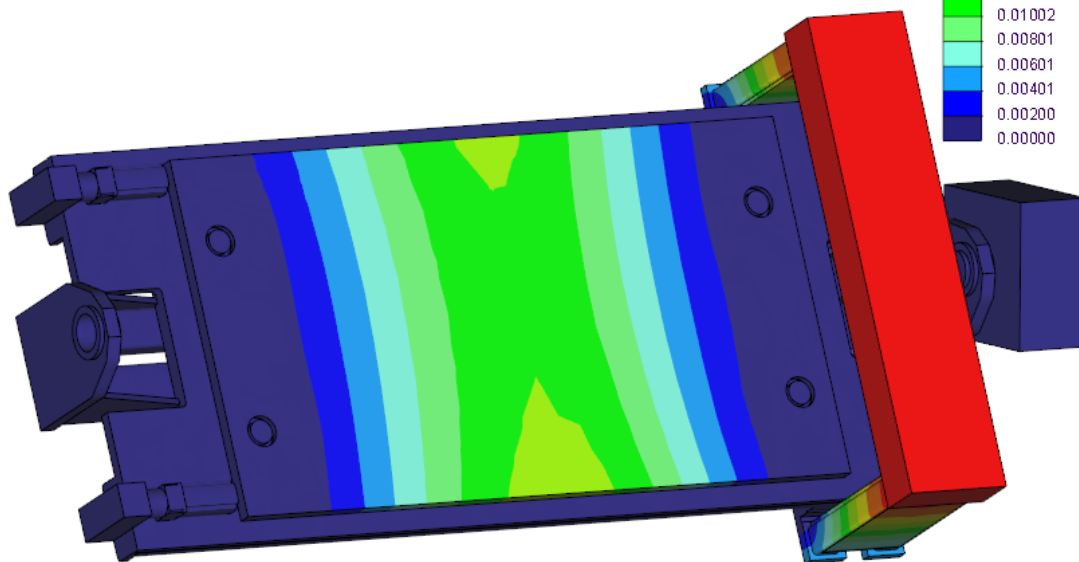
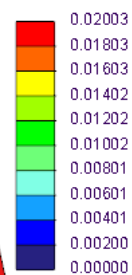
Příčina vzniku deformace v oblasti pojezdového portálu nemusí být přímo způsobena jeho nedostatečnou tuhostí, ale může být způsobena i od jednotlivých komponent v sestavě, které nejsou dostatečně tuhé a součet těchto jednotlivých deformací se nejvíce projeví na jiném dílu. Aby byla odhalena příčina vzniku nedostatečné tuhosti měřicího stroje, byly vybrány dva díly ze sestavy. Jednalo se o výběr kyvné konzole a základní desky. Těmto vybraným dílům byla přiřazena absolutní tuhost. Z výsledků simulace sestavy s absolutně tuhými kyvnou konzolou (viz obr. 21) a absolutně tuhými základní deskou (viz obr. 22) vyplývá, že deformace konstrukce je minimální. Z tohoto důvodu bude pro splnění cíle, tedy navýšení tuhosti, úprava zaměřena na tyto dvě komponenty. Dále budou úpravy zaměřeny na oblast pojezdového portálu měřicího zařízení a také bude přidán další pohon s cílem snížit deformaci konstrukce.

Displacement (mm)  
Max Disp 2.9554E-02  
Loadset: LoadSet1 : SIMULACE-RAMU



Obr. 21 Přřazená absolutní tuhost kyvné konzole

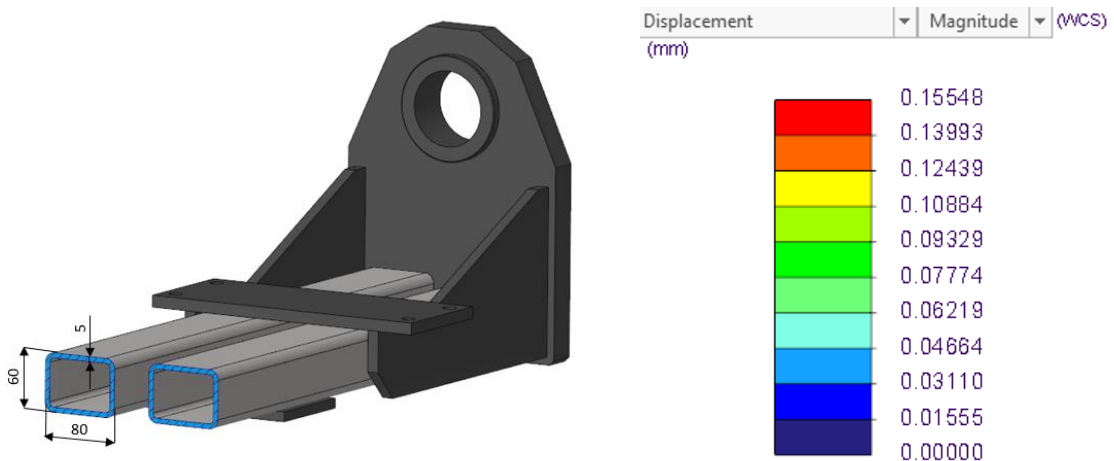
Displacement (mm)  
Max Disp 2.0032E-02  
Loadset: LoadSet1 : SIMULACE-RAMU



Obr. 22 Přřazená absolutní tuhost základní desce

### 3.3.1 Optimalizace kyvné konzole

Při optimalizaci kyvné konzole byly systematicky zkoumány a testovány různé varianty profilů, které byly porovnávány s původní konstrukcí kyvné konzole a maximální deformací měřicího stroje (viz obr. 23) s cílem dosáhnout optimální tuhosti měřicího stroje. Při snaze navrhnout konzoli co nejefektivněji byl brán zřetel na omezený prostor.



Obr. 23 Původní varianta kyvné konzole s maximální deformací měřicího stroje

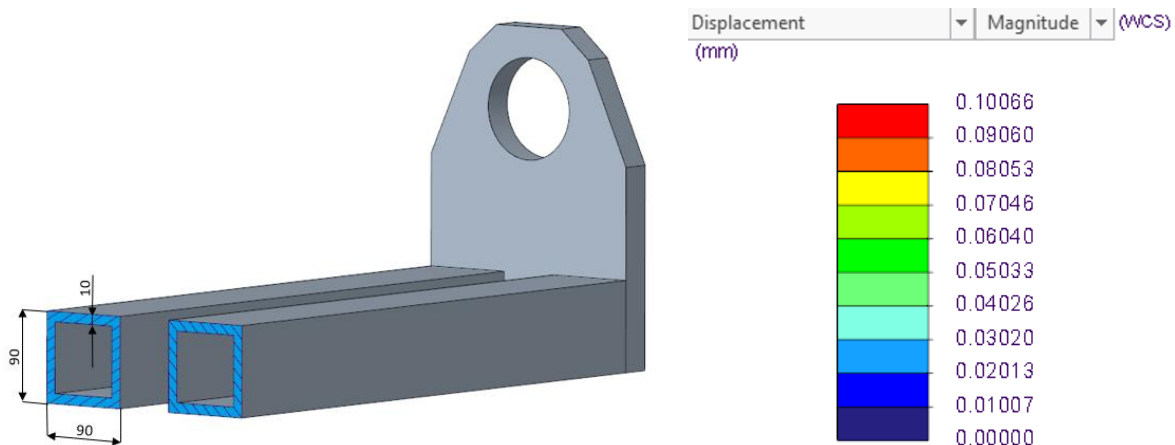
Pro optimalizaci kyvné konzole byly vytvořeny varianty se čtvercovým, kruhovým a obdélníkovým průřezem, u kterých bylo zkoumáno zvýšení tuhosti v závislosti na změně tloušťky stěny polotovaru. Cílem bylo nalézt optimální konfiguraci, která by zajišťovala snížení celkové deformace konstrukce. Při konstrukci jednotlivých variant byl brán ohled na stávající technické zařízení, aby nedošlo k potřebě výrazných úprav.

#### Analýza konstrukčních alternativ řešení

Tabulka 1 zobrazuje změnu tloušťky polotovaru (viz obr. 24) vždy po 5 mm. Ke každé změně tloušťky materiálu je přiřazena celková deformace měřicího zařízení.

Tabulka 1: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 1)

Tloušťka stěny [mm]	Celková deformace měřicího zařízení [mm]
10	0,10066
15	0,08725
20	0,08113

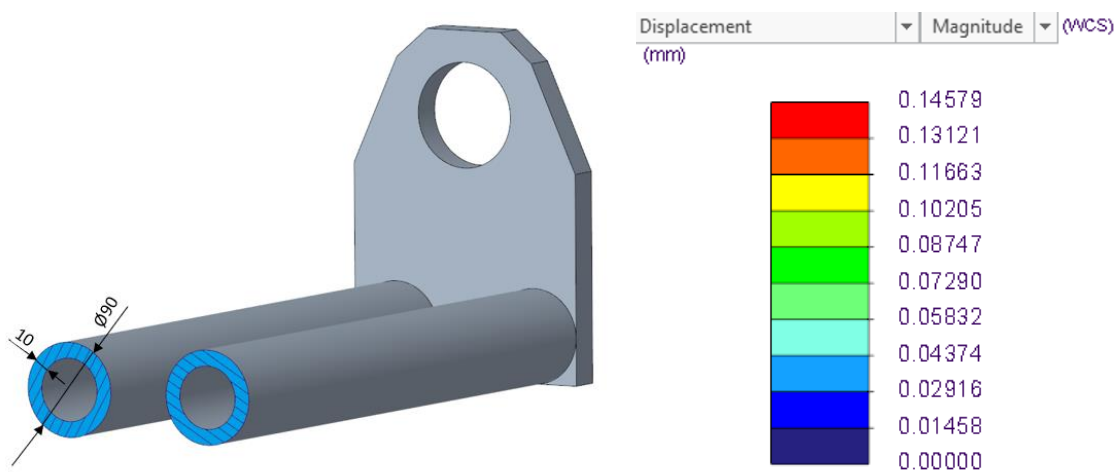


**Obr. 24 První varianta kyvné konzole se čtvercovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje**

Tabulka 2 zobrazuje totožné veličiny jako Tabulka 1, nicméně pro polotovar kruhového průřezu viz obr. 25.

**Tabulka 2: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 2)**

Tloušťka stěny [mm]	Celková deformace měřicího zařízení [mm]
10	0,14579
15	0,12307
20	0,11383



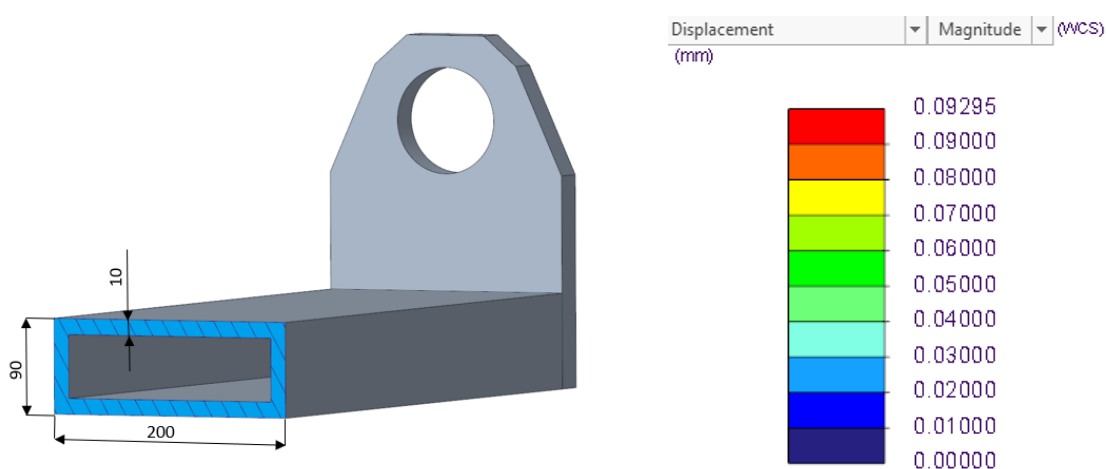
**Obr. 25 Druhá varianta kyvné konzoli s kruhovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje**



Tabulka 3 zobrazuje opět ty stejné veličiny, nyní však pro polotovar obdélníkového průřezu viz obr. 26.

**Tabulka 3: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 3)**

Tloušťka stěny [mm]	Celková deformace měřicího zařízení [mm]
10	0,09295
15	0,07867
20	0,07260

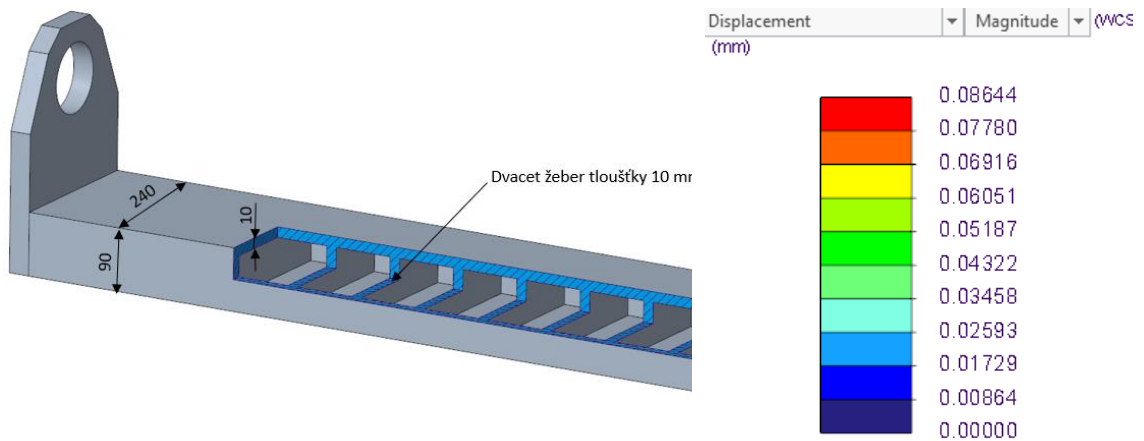


**Obr. 26 Třetí varianta kyvné konzole s obdélníkovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje**

Tabulka 4 zobrazuje veličiny pro polotovar obdélníkového průřezu se žebrováním viz obr. 27.

**Tabulka 4: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 4)**

Tloušťka stěny [mm]	Celková deformace měřicího zařízení [mm]
10	0,08644
15	0,07546
20	0,07103



**Obr. 27 Čtvrtá varianta kyvné konzole s obdélníkovým průřezem s vyztužujícími žebry a maximální deformací měřicího stroje**

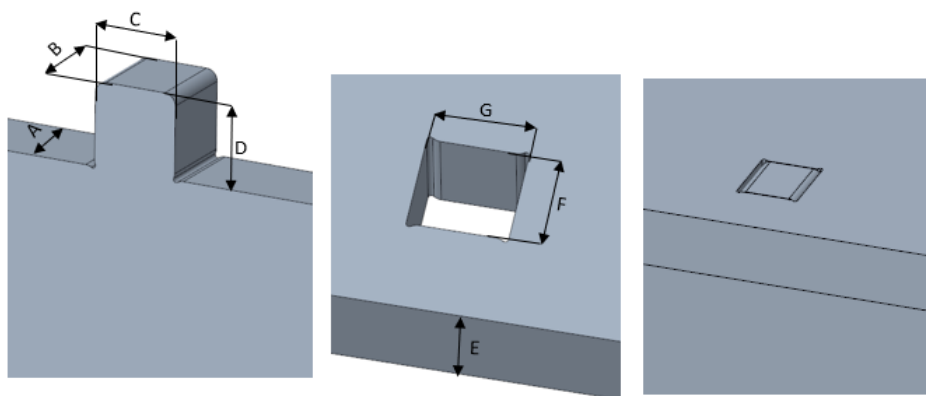
Simulace ukazují, že zvýšení tloušťky materiálu má významný vliv na tuhost navrhnuté konstrukce. Rovněž se prokázalo, že použití jednoho většího profilu namísto dvou menších výrazně zvyšuje tuhost konstrukce. Nejlépe vyhovující výsledek je u profilu s obdélníkovým průřezem, který je navíc vyztužen žebry viz obr. 27. Při porovnání výsledků z obr. 26 a obr. 27 lze konstatovat, že přidání žeber a zvětšení tloušťky o více než 15 mm nemá signifikantní vliv na zvýšení tuhosti konzole. Z tohoto důvodu nemá smysl přidávat žebra a navyšovat tloušťku materiálu na úkor zvýšení samotné hmotnosti konstrukce.

### Finální konstrukční řešení

Návrh finální varianty konstrukce kyvné konzole vychází z předešlé kapitoly 3.3.1. Na základě zjištění, že potřebný profil obdélníkového průřezu o tloušťce 15 mm není standardně dostupný, bylo pro výrobu konstrukce rozhodnuto o jejím svaření z polotovaru plechu. Pro eliminaci vnitřního pnutí při svařování, které by vyžadovalo další procesy úpravy jako je žíhání a následné obrábění povrchu, byla zvolena metoda zámkové konstrukce, která je blíže popsána v následujícím textu.

Tvar výstupku zámků a otvorů je geometricky složitý na výrobu, což vyžaduje použití nekonvenční technologie obrábění materiálu. Konkrétně se jedná o technologii laserového paprsku. Při tvorbě výstupků a otvorů je nutné dodržovat zásady, které vyžadují zaoblení nebo zápichy na místech, kde by vznikaly ostré hrany [3].

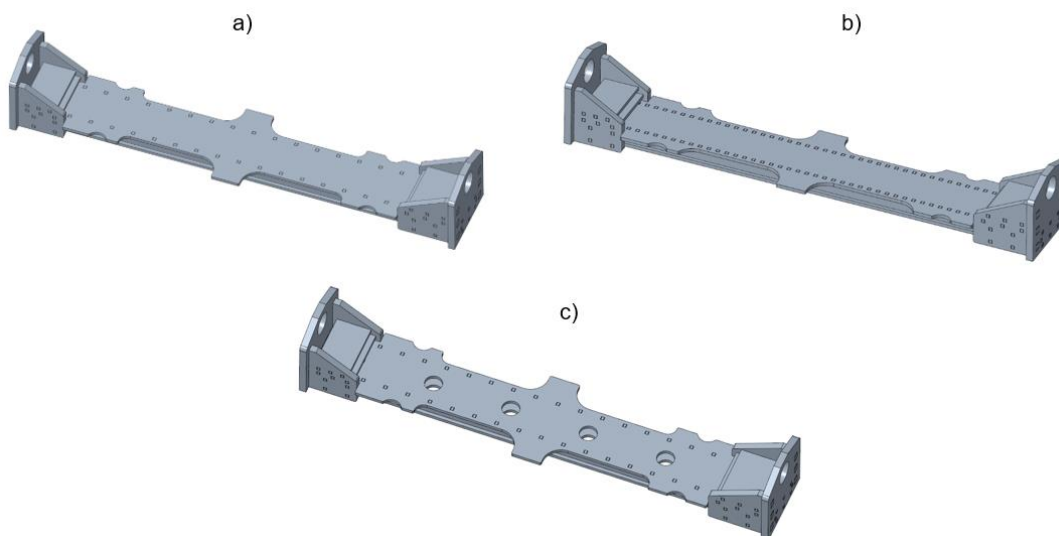
Rozměrová specifikace výstupku zámku (viz obr. 28) je odvozena od tloušťky (**A**) plechu, která určuje jak hloubku (**B**), tak šířku (**C**) výstupku. Výška (**D**) výstupku je stanovena tloušťkou (**E**) protilehlého dílu, přičemž daná hodnota se odvíjí od použitého materiálu na základě praktických poznatků s danou technologií lokálního svařování ( $D = f(E)$ ). Velikost otvoru zámku je dána protikusem, přičemž rozměry (**F**) a (**G**) jsou navýšeny o přídavek přibližně +0,2 mm, který je dán přesností CNC laserového centra ( $F = B + 0,2 \text{ mm}$  a  $G = C + 0,2 \text{ mm}$ ). Otvor pro zámek obsahuje zápichy, které musí být během montáže orientovány tak, aby byly rovnoběžné s tloušťkou protilehlého plechu a zajišťovaly tak jeho rovinnost [3].



**Obr. 28 Specifikace zámkového systému – výstupek, otvor a spojení [3]**

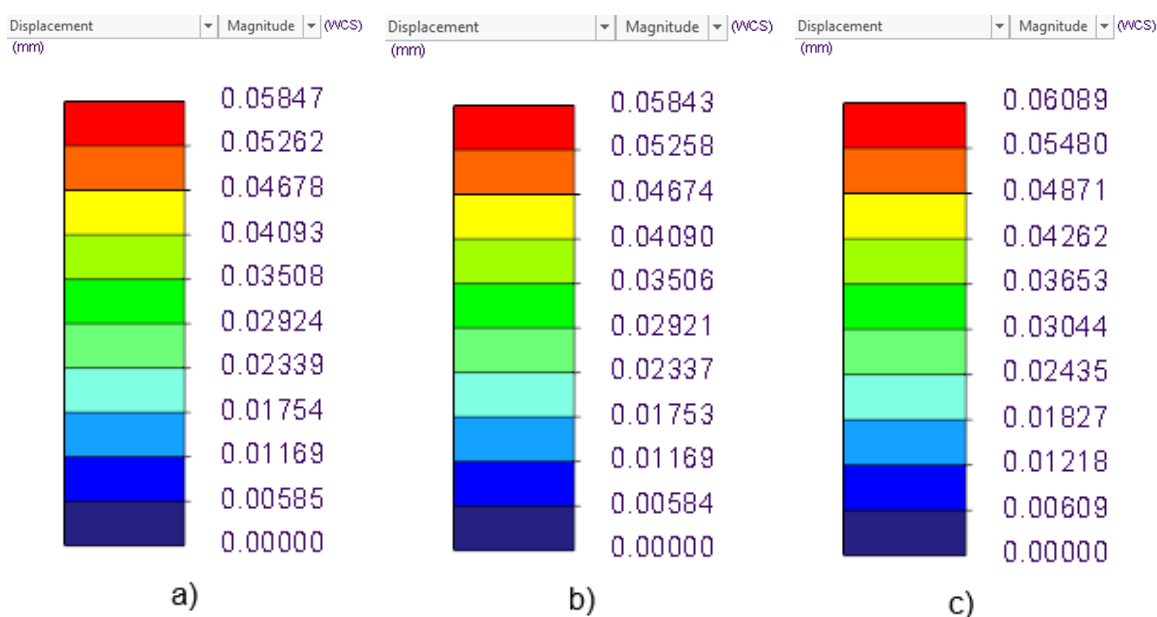
Při navrhování kyvné konzole byly vypracovány tři různé varianty svařenců spojené zámkovou konstrukcí viz obr. 29. První varianta (**a**) byla navrhnutá s nižším počtem zámků, kde je jádro konstrukce spojeno dvaceti zámky a zpevněno pomocí žeber. Druhá varianta (**b**) se liší pouze počtem zámků, kde je namísto spojení jádra konstrukce dvaceti zámky je spojení padesáti zámky. Třetí varianta (**c**) byla navržena jako odlehčená verze varianty (**a**), u které došlo odebráním materiálu k odlehčení o 6,23 kg.

Aby výpočet simulace proběhl správně, byl brán ohled na systém zámkové konstrukce, kde muselo být spojení dílů nastaveno ve všech kontaktních plochách zámkového spojení.



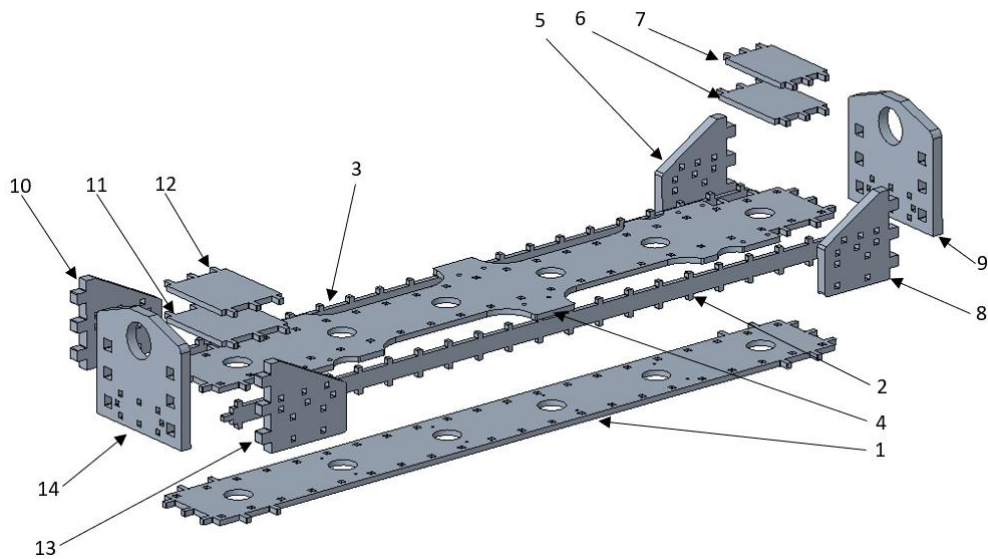
**Obr. 29 Návrhy – a) nižší, b) vyšší počet zámků, c) odlehčená verze**

Při porovnání dosažených výsledků simulací s maximální deformací měřicího stroje (viz obr. 30) je vidět, že mezi variantou (a) a (b) není téměř žádný rozdíl. Proto není nutné realizovat konstrukci s vyšším počtem zámků, jak je navrženo ve variantě (b). Na druhou stranu odlehčená varianta (c), která byla navržena pro snížení hmotnosti, nezpůsobila výrazné snížení tuhosti konstrukce. Z tohoto důvodu je jako optimální verze kyvné konzole vybrána varianta (c).

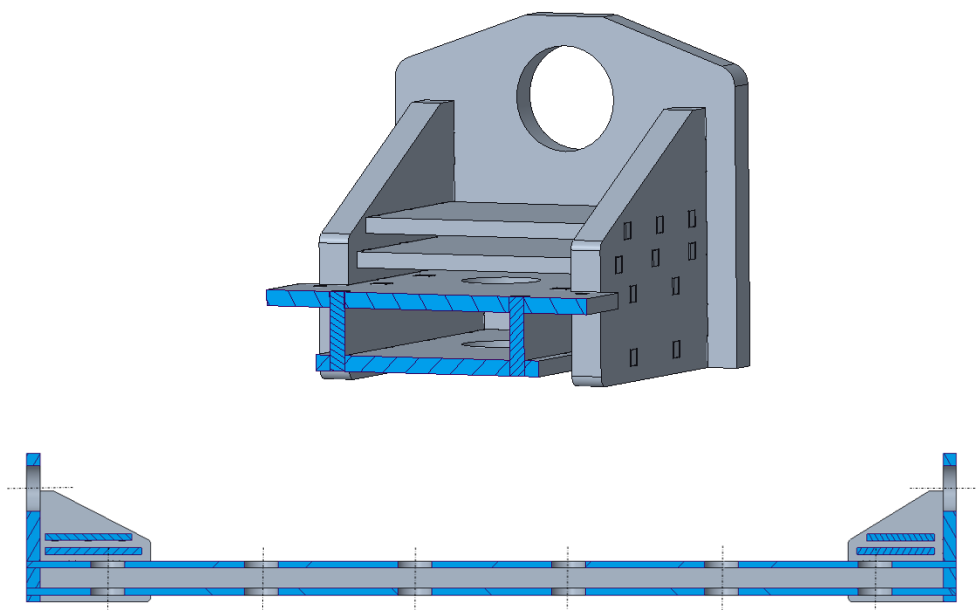


**Obr. 30 Maximální deformace měřicího zařízení pro varianty – a), b) a c)**

Jak již bylo zmíněno, finální varianta optimalizované kyvné konzole se skládá z výpalků plechů, které jsou spojeny zámkovým systémem. Použitím zámkového systému dochází k minimalizaci vnitřního pnutí, k jehož výraznému nárůstu by došlo použitím konvenční metody svařování. Na obr. 31 se nachází exploze kyvné konzole s číselným označením dílů, které značí postup při jejím sestavování. Řez kyvnou konzolí je zobrazen na obr. 32. V samotném řezu konstrukce lze lépe vidět spojení jednotlivých výpalků plechů.

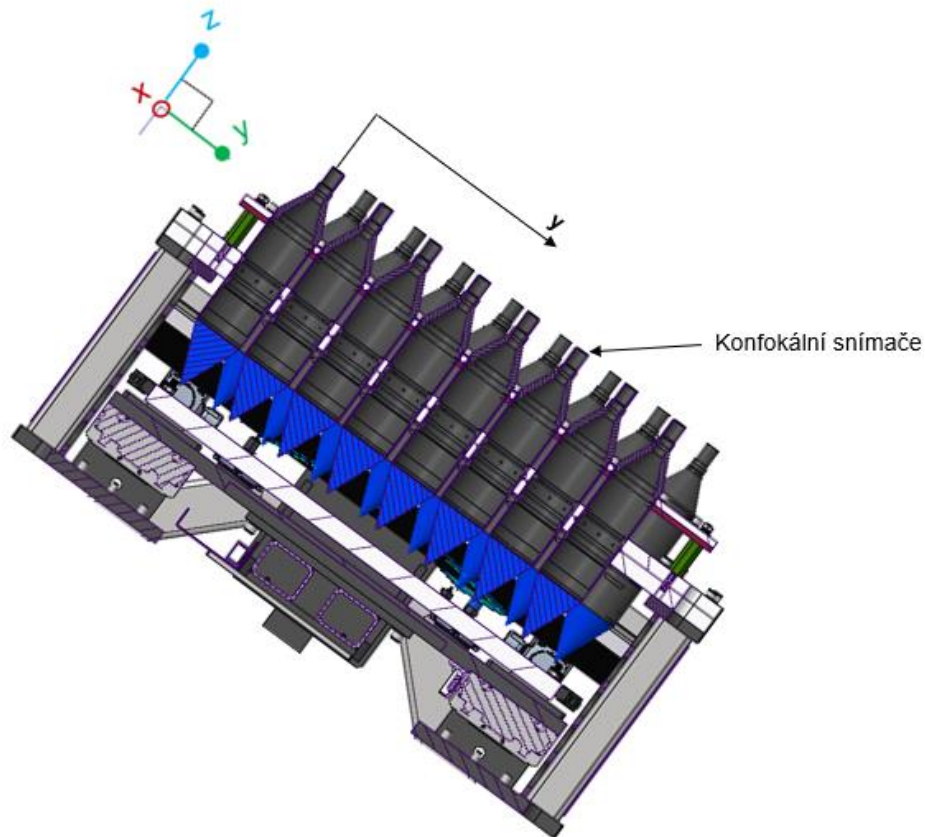


**Obr. 31** Exploze kyvné konzole



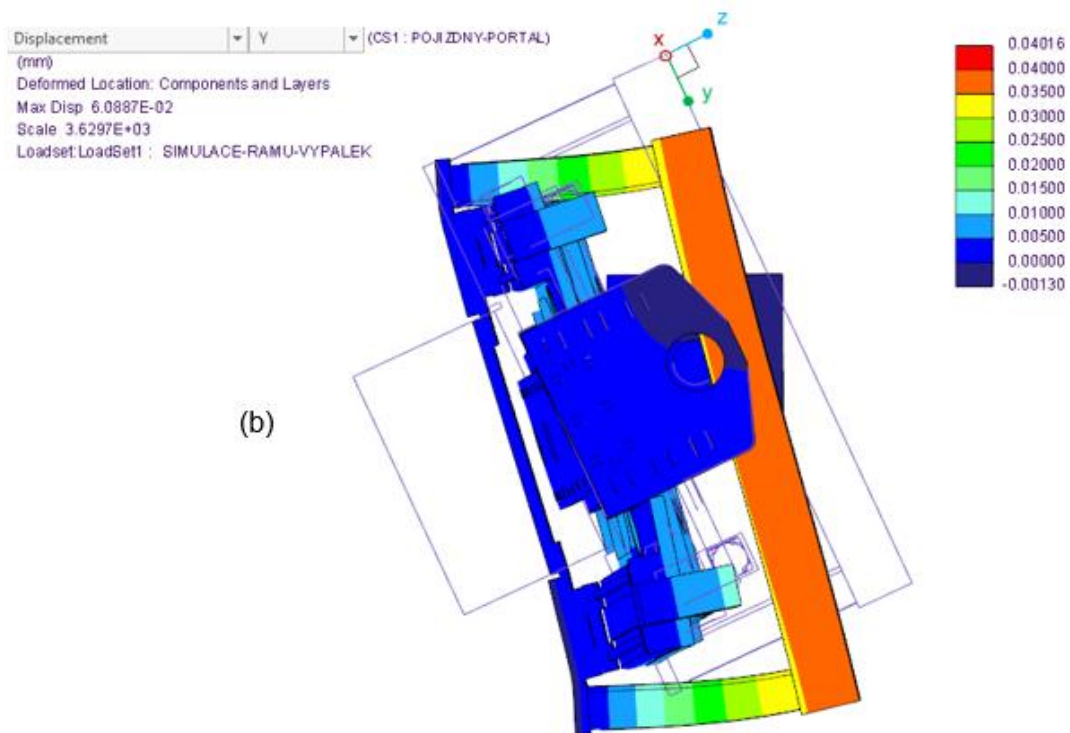
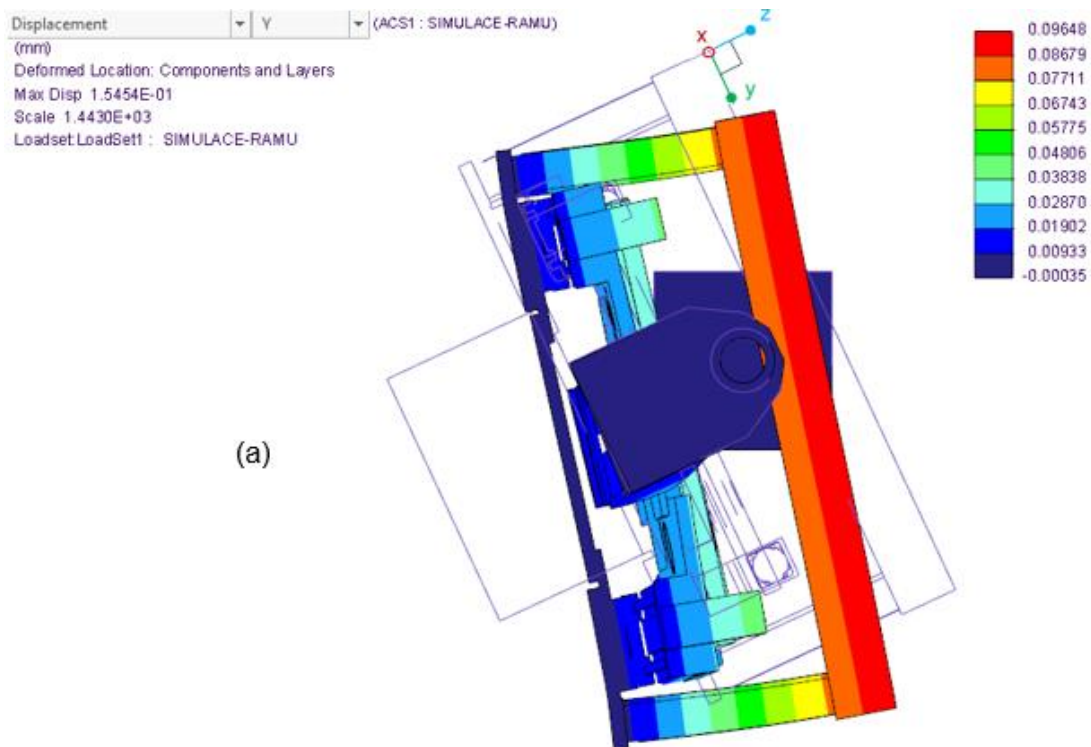
**Obr. 32** Řez kyvnou konzolí

Při návrhu měřicího zařízení je důležité nejen zohlednit celkovou deformaci stroje, ale také přesně definovat polohu mezi konfokálními snímači a maketou, zejména polohu skla, které je ustaveno na maketě pomocí čtyř trnů. Cílem je zajistit přesnou polohu a správné měření. Z předešlých výsledků simulace v kapitole 3.2 bylo zjištěno, že dochází k mírnému podkosení portálu, což způsobuje měření geometrie skla na jiném místě. Průřez pojezdového portálu s konfokálními snímači a vyznačeným směrem posunutí v ose y je znázorněn na obr. 33.



**Obr. 33 Posunutí konfokálních snímačů v ose y (podklady KSR)**

Pro zjištění deformace pojezdového portálu s konfokálními snímači ve směru osy y musel být portálu přiřazen nový souřadný systém a v simulaci nastavena deformace ve směru osy y nově definovaného souřadného systému. Porovnání posunutí konfokálních snímačů měřicího zařízení s původní kyvnou konzolou (**a**) a inovovanou konzolou (**b**) je vyznačeno na obr. 34.



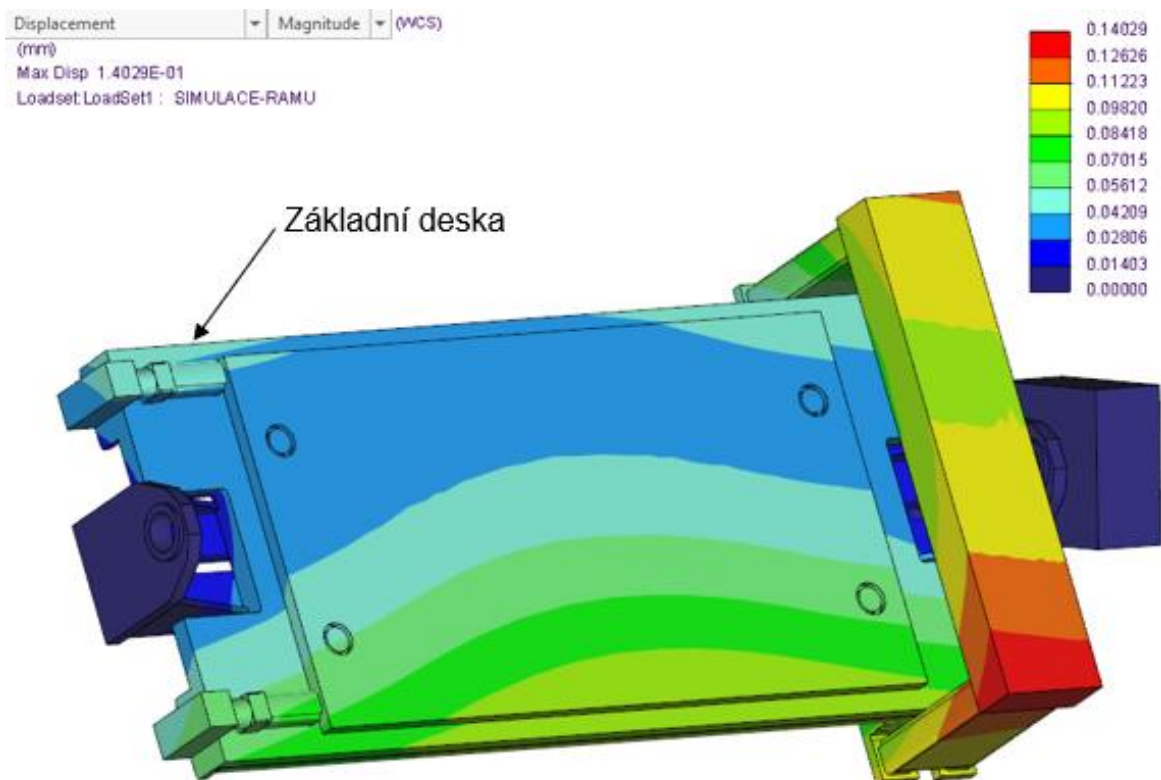
**Obr. 34** Posunutí snímačů ve směru osy y mezi konzolou (a) a (b)

Posunutí konfokálních snímačů ve směru osy y u varianty (a) bylo přibližně 0,1 mm a u varianty (b) došlo k posunutí pouze o 0,04 mm. Optimalizací kyvné konzole došlo ke zmenšení posunutí konfokálních snímačů až o 60 %.



### 3.3.2 Optimalizace základní desky

Při simulaci byla ve zjednodušeném modelu zachována původní varianta kyvné konzole a došlo pouze ke změně rozměru základní desky, aby byl vidět jeho vliv na celkovou deformaci měřicího zařízení pouze od této úpravy. Ve snaze zvýšit tuhost konstrukce navýšením tloušťky základní desky z 25 mm na 40 mm bylo zjištěno, že navýšení o 15 mm nemá významný vliv na celkovou tuhost. Z tohoto důvodu nebude základní deska upravována, aby nedošlo k nadbytečnému zvýšení hmotnosti a zmenšení operačního prostoru měřicího zařízení. Výsledek simulace optimalizace základní desky lze vidět na obr. 35 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



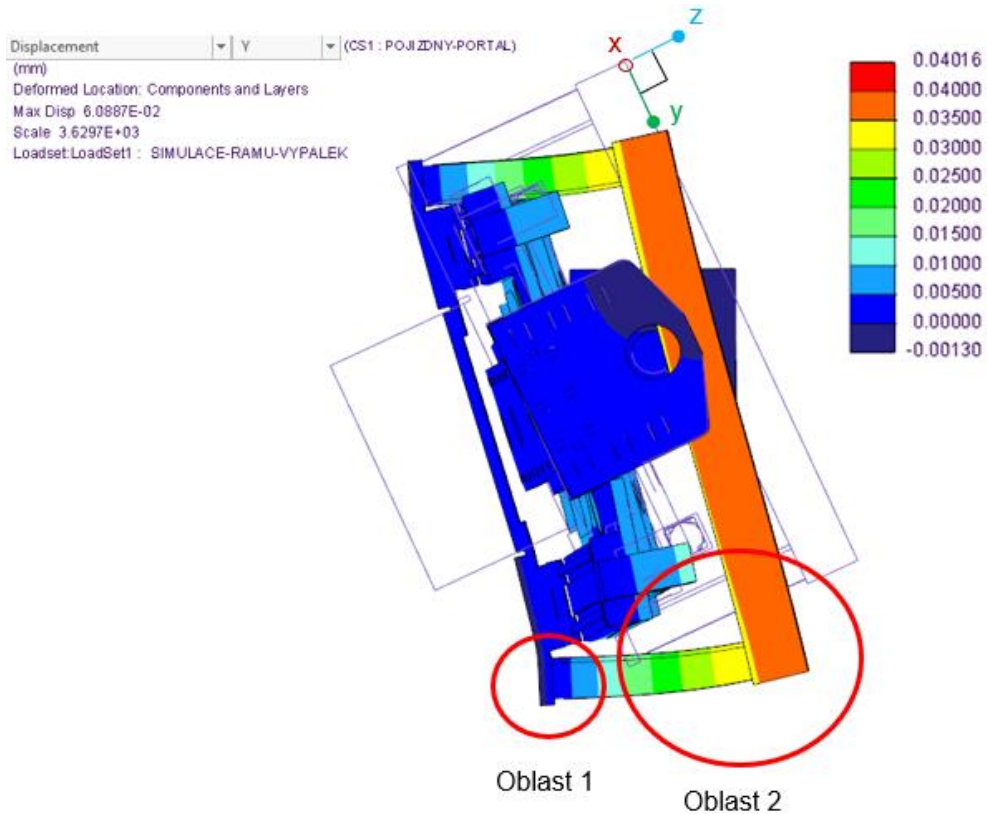
Obr. 35 Optimalizace základní desky

### 3.3.3 Optimalizace pojezdového portálu

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole 3.2, tak vlivem vlastní tíhy a nastavením konstrukce do polohy car position dochází k podkosení pojezdového portálu. Ve snaze eliminovat tyto deformace byly stojny portálu vyztuženy prostřednictvím vhodných opatření. Je třeba zdůraznit, že porovnávané simulace již zahrnují finální variantu odlehčené kyvné konzole. Při optimalizaci portálu byla

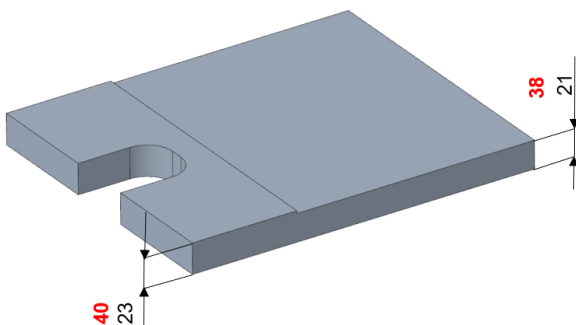


snaha eliminovat posunutí ve směru osy y nově zavedeného souřadného systému. Oblast zaměřená na úpravu portálu je vyobrazena na obr. 36.

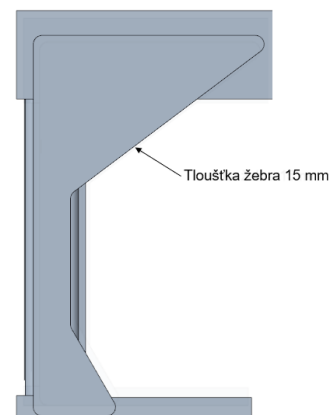


**Obr. 36 Upravované oblasti portálu**

Pro zabránění deformace byla v první oblasti zvýšena tloušťka podstavy stojny, jak je znázorněno na obr. 37, kde červeně označená čísla značí navýšení materiálu. Ve druhé oblasti byla snaha o zpevnění portálu přidáním žebra o tloušťce 15 mm viz obr. 38.

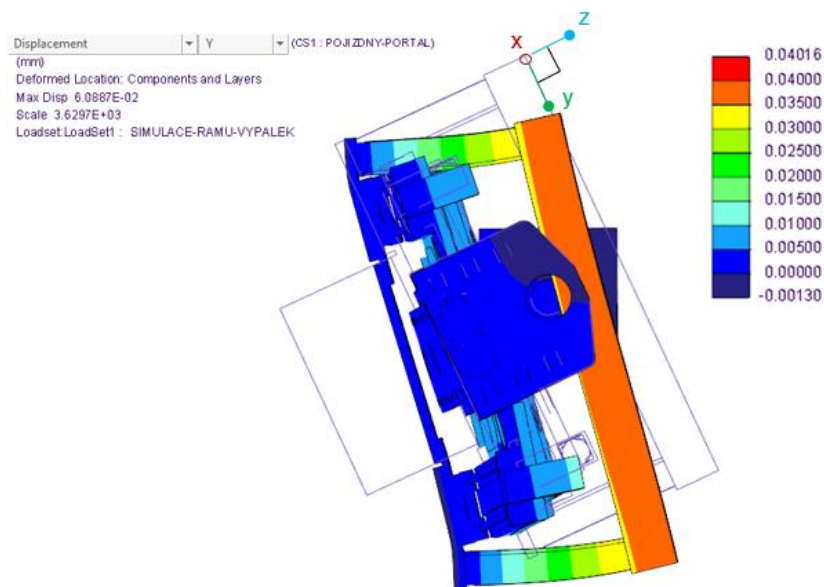


**Obr. 37 Upravovaná oblast 1**

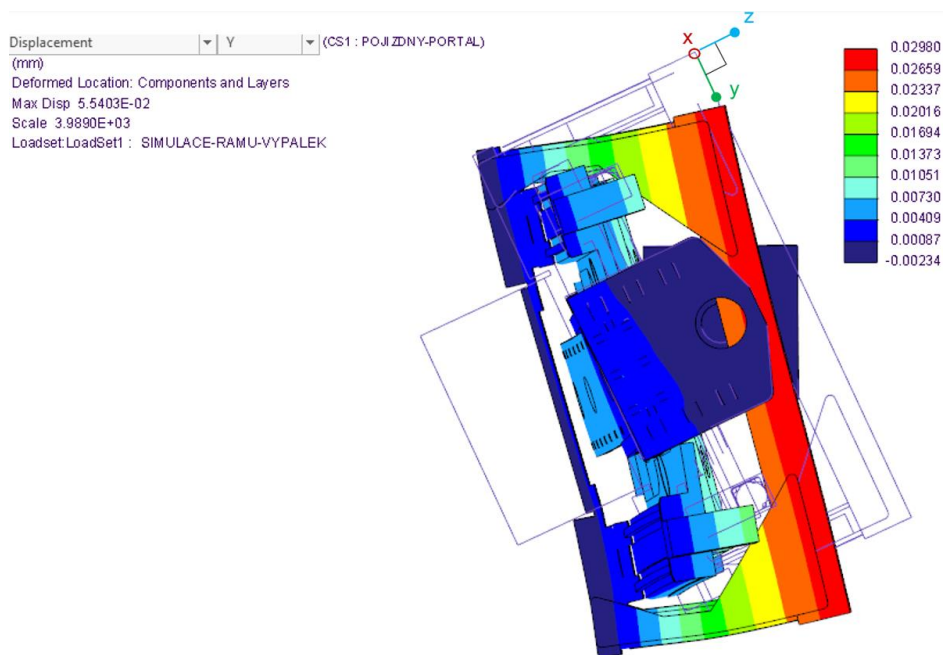


**Obr. 38 Upravovaná oblast 2**

Během porovnání výsledků simulací mezi neupraveným portálem (viz obr. 39) a upraveným portálem (viz obr. 40) se ukázalo, že došlo pouze k nepatrnému zlepšení posunutí pojezdového portálu. Vytužení pomocí žebra a zvýšení tloušťky podstavy stojny nevedlo k významnému snížení deformace ve směru osy y nově definovaného souřadného systému. Z tohoto důvodu není nutné se problémem nadále zabývat.



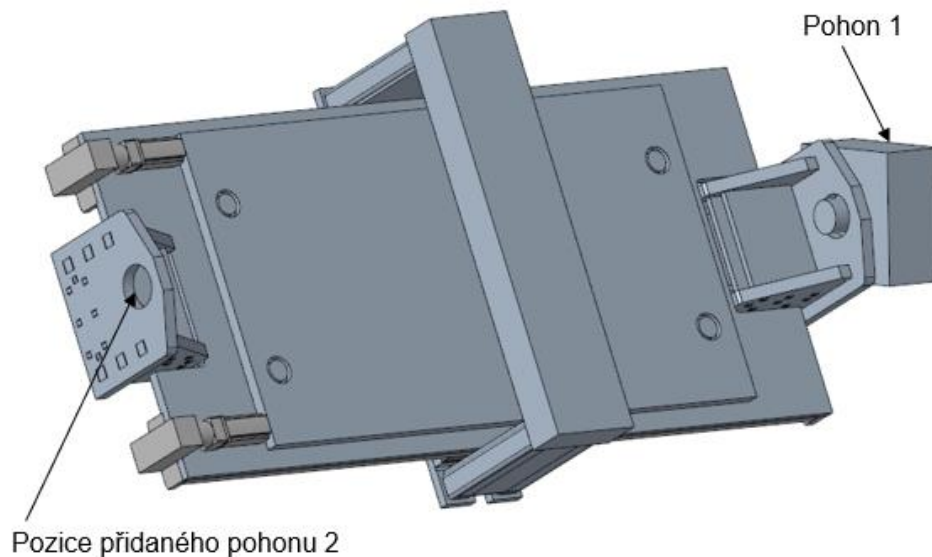
**Obr. 39** Posunutí ve směru osy y neupraveného pojezdového portálu



**Obr. 40** Posunutí ve směru osy y upraveného pojezdového portálu

### 3.3.4 Optimalizace přidáním pohonu

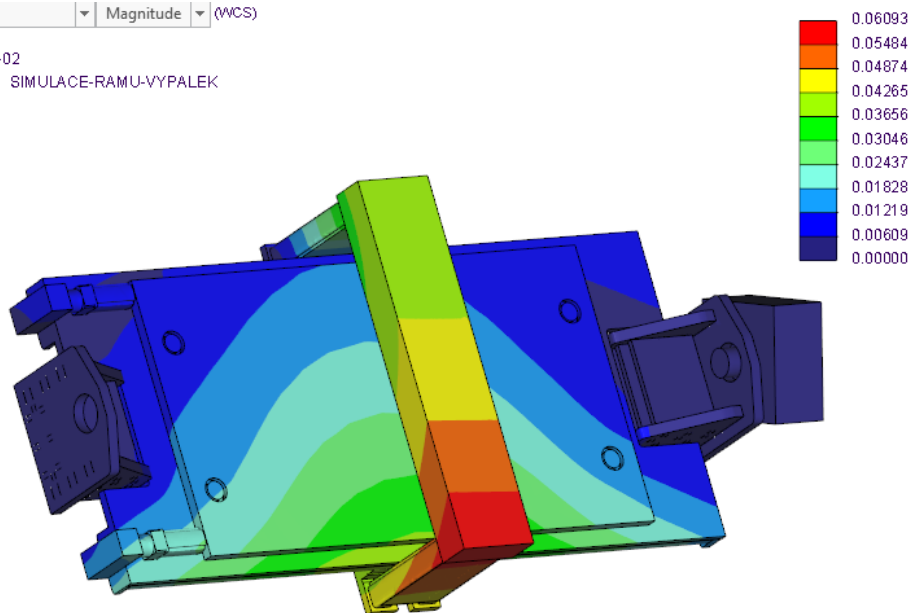
Na obr. 41 se nachází model měřicího zařízení s inovovanou kyvnou konzolou a s pojezdovým portálem umístěným ve středu měřicího stroje. Dále byl do sestavy měřicího zařízení přidán další pohon, který při nastavení v simulaci představuje pouze definovanou okrajovou podmínku. V simulaci došlo pouze ke změně rotační okrajové podmínky na fixní, která charakterizuje přidání druhého pohonu.



**Obr. 41 Přidání nového pohonu**

Přejezdový portál měří boční autoskla konstantní rychlostí, a to pod stálým úhlem. Zaměřujeme se pouze na deformace vzniklé během samotného měření, a nikoliv na manipulaci se sklem mimo tento proces. Proto je úloha řešena staticky. Použití dalšího pohonu by mělo výrazný vliv na snížení deformace rámu do tvaru vrtule během překlápění autoskla. Z výsledku statické analýzy (viz obr. 42) vyplývá, že přidáním dalšího pohonu nemá vliv na tuhost konstrukce během měření tvaru skla.

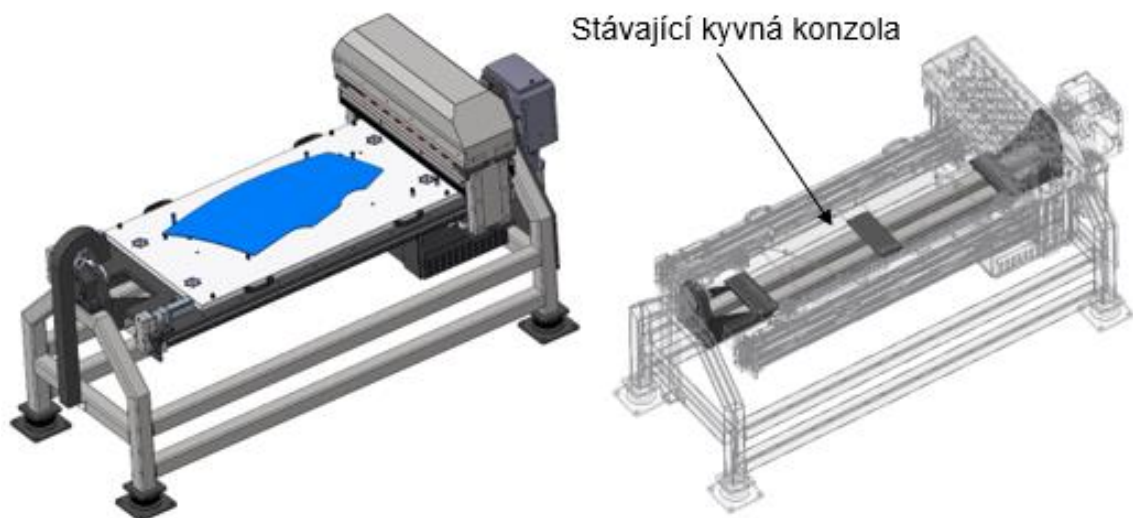
Displacement    Magnitude    (WCS)  
(mm)  
Max Disp 6.0928E-02  
Loadset: LoadSet1 : SIMULACE-RAMU-VYPALEK



**Obr. 42** Optimalizace přidáním pohonu

## 4 Technicko-ekonomické zhodnocení navrženého řešení

V této části diplomové práce je popsán postup hodnocení technických a ekonomických parametrů nového produktu ve srovnání se stávajícím produktem. Hlavním cílem tohoto zhodnocení je analyzovat a porovnat dosažené výsledky ze simulací a následně provést vyhodnocení výhod a nevýhod nového produktu oproti jeho původní verzi. Na obr. 43 je zobrazeno stávající technické zařízení, ve kterém byla upravována vyobrazená kyvná konzola.



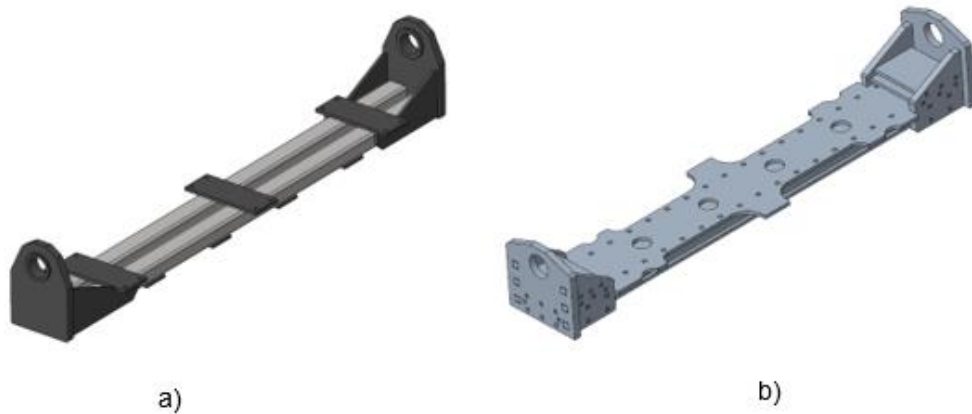
*Obr. 43 Stávající technické zařízení (podklady KSR)*

### 4.1 Technické zhodnocení

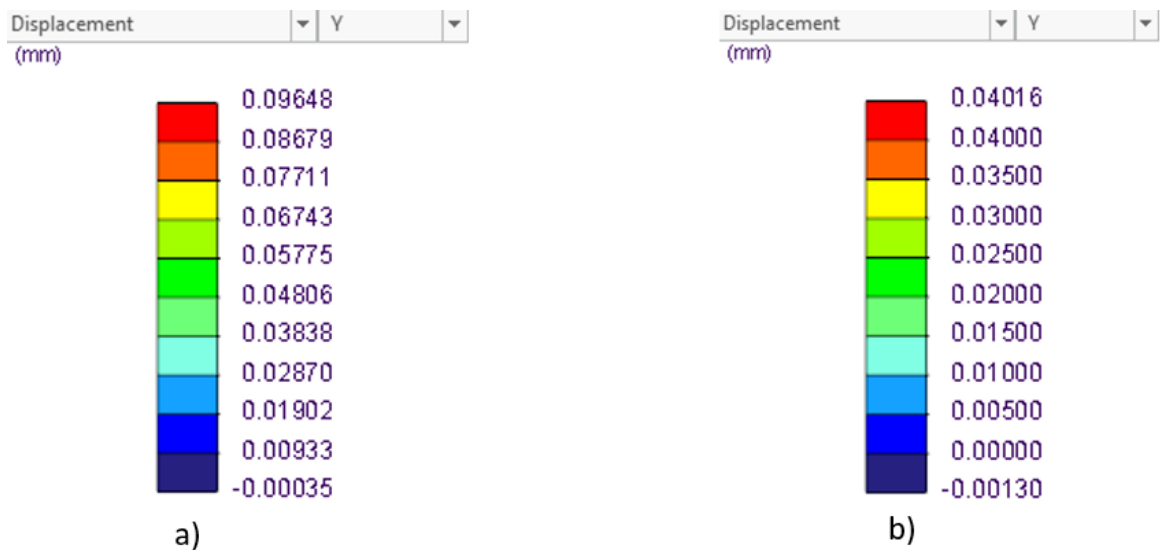
Inovovaná kyvná konzola s konstrukčně navrženým zámkovým systémem byla vyrobena z výpalků plechů. Při samotné konstrukci produktu hrála roli kompatibilita. Cílem bylo navrhnout takové řešení kyvné konzole, které by zajistilo kompaktnost s měřicím zařízením a zároveň umožnilo svou snadnou výměnu bez nutnosti větších úprav konstrukce stroje.

Výhoda použití zámkového systému spočívá v minimální teplotní deformaci konstrukce a to díky lokálnímu svařování. Z tohoto důvodu dochází k eliminaci žíhání a následně složitého a drahého obrábění funkčních ploch konstrukce. Díky moderním technologiím dělení materiálu má výsledné konstrukční řešení relativně přesnou rozměrovou geometrii. Porovnání obrázků inovované konzole se stávající konzolou jsou znázorněné na obr. 44.

Z interpretace výsledků kapitoly 3.3.3 a 3.3.1, jejichž výsledky jsou vidět na obr. 45, lze pozorovat rozdíl v maximálním posunutí pojezdového portálu měřicího stroje ve směru osy y mezi stávající kyvnou konzolí (a) a inovovanou konzolou (b). Maximální posunutí portálu měřicího zařízení ve směru osy y ukazuje, že nová konzola vykazuje zlepšení až o 60 % v porovnání se stávající konzolou.



**Obr. 44 Kyvná konzola – a) stávající, b) inovovaná**

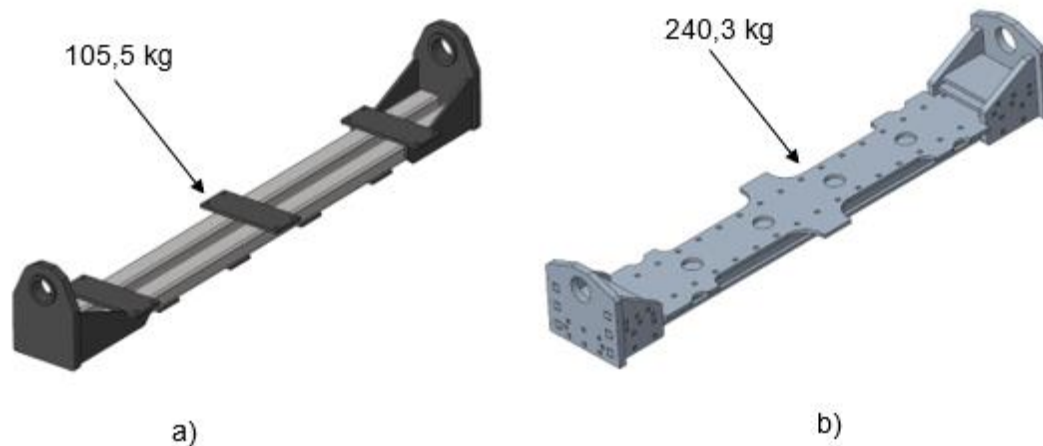


**Obr. 45 Deformace konzolí ve směru osy y – a) stávající, b) inovovaná**

## 4.2 Ekonomické zhodnocení

Konstrukční návrh kyvné konzole není v době odevzdání této diplomové práce ve výrobní fázi, a proto nemohou být doloženy finanční náklady na inovované konstrukční řešení. Z tohoto důvodu se bude ekonomické hodnocení této diplomové práce zaměřovat na analýzu spotřeby materiálu, která je klíčová pro určení

nákladové efektivity projektu. Na obr. 46 jsou proto uvedeny hmotnosti konzolí. Dále jsou z ekonomického hlediska popsány výhody použití zámkového systému (stavebnicová konstrukce) oproti původní konstrukci.



**Obr. 46 Hmotnosti konzolí – a) stávající, b) inovovaná**

Nová konzola je téměř 2,3 krát těžší (o 134,8 kg) než původní verze. S ohledem na aktuální cenu oceli, přibližně 37 korun za kilogram, došlo k navýšení ceny za materiál zhruba o 5000 korun.

Využití výpalků z plechu je ekonomicky výhodné, jelikož jsou obvykle cenově konkurenceschopné nebo dokonce levnější než různé polotovary, které vyžadují další proces zpracování jako je řezání nebo obrábění. Zámkový systém a lokální svařování konstrukce může být nákladnější, nicméně eliminuje potřebu dalších úprav jako je žíhání nebo obrábění kontaktních ploch, což přináší úsporu nákladů. Odborným odhadem lze konstatovat, že dané konstrukční řešení spojené zámkovým systémem bude dražší o několik desítek procent (do 30 %) v porovnání s původním systémem. Tento rozdíl je však s ohledem na úroveň vylepšení přesnosti (tuhosti konstrukce) a celkovou cenu stroje, která se pohybuje zhruba o dva řády výše, přijatelný.

## 5 Závěr

V teoretické části diplomové práce byl nejprve proveden rozbor současného stavu dané problematiky, kde byl proveden popis podstaty stroje a popis stávajícího technického řešení stroje, ve kterém byly detailně popsány jednotlivé části měřicího zařízení jako je rám, kyvná konzola, základní deska, pseudomaketa a portál s konfokálními snímači.

Následně se teoretická část zaměřovala na metody tvorby tuhých konstrukcí, což vychází z rešeršního průzkumu. V této části jsou blíže popsány materiály jako jsou kovy, plasty a kompozitní materiály. Dále jsou zde uvedeny informace o polotovarech na konstrukce, které jsou rozděleny na polotovary vyráběné tvářením, odléváním, svařováním, pájením, žárovým dělením a lepením. V neposlední řadě je pozornost věnována tvaru konstrukce, který vychází z požadavků na funkci a mimo jiné pojednává o koncepci strojních konstrukcí a optimalizacích.

V praktické části předložené diplomové práce byl proveden návrh konstrukčního řešení zařízení pro měření tvaru bočních autoskel. V první části proběhla simulační analýza pomocí metody konečných prvků v softwaru Creo a to ve třech pozicích zjednodušeného modelu měřicího zařízení. Po vyhodnocení výsledků byla vybrána druhá pozice konzole ve stroji, protože v ní vznikla největší deformace. Veškeré další simulace byly navrhovány v této pozici měřicího zařízení právě z důvodu vzniklé největší deformace.

Po simulační analýze byly vybrány komponenty zařízení, na které byla optimalizace zaměřena. Jednalo se o optimalizaci kyvné konzole, pro kterou byly zkoumány vhodné tvary profilů. Dále se jednalo o optimalizaci základní desky pomocí zvýšení její tloušťky a optimalizaci pojezdového portálu, u něhož byla snaha o snížení deformace přidáním vyztužujících prvků. Poslední optimalizace byla provedena přidáním pohonu. Z těchto jednotlivých optimalizací se ukázalo, že pouze optimalizace kyvné konzole má výrazný vliv na zvýšení tuhosti celého měřicího zařízení a proto se následující text věnuje pouze jí.

Pro optimalizaci kyvné konzole byla vytvořena finální varianta, ve které došlo ke snížení jak celkové deformace měřicího zařízení, tak ke snížení deformace



portálu ve směru osy y a to přibližně o 60 %. Tímto zlepšením se však zároveň zvýšila hmotnost kyvné konzole, což ji prodraží o cca 20-30 %. Pro finální variantu kyvné konzole byla následně vytvořena výkresová dokumentace, ve které jsou pouze výkresy dílů, u kterých byly provedeny změny. V souladu s požadavky z praxe je u výkresů udávána čistá délka polotovarů. Označení výkresové dokumentace je patrné z obr. 47.



**Obr. 47 Označení výkresové dokumentace**

S ohledem na posloupnost činností před předložením konstrukčního návrhu přináší poslední část diplomové práce technicko-ekonomické zhodnocení dosažených výsledků. V technickém zhodnocení je shrnuta konstrukce kyvné konzole a procentuální zlepšení deformace při jejím použití. V ekonomickém zhodnocení je provedena analýza spotřeby materiálu mezi původní a inovovanou konzolou. Dále jsou zde popsány výhody použití zámkového systému (stavebnicová konstrukce) oproti původní konstrukci kyvné konzole.

Nadále by se v řešení tohoto konstrukčního návrhu měřicího zařízení dalo pokračovat optimalizací během manipulace za účelem překlápění bočního autoskla.

## Seznam literatury

- [1] VRÁTNÝ, Jan et al. *Zařízení pro bezkontaktní hodnocení tvarové přesnosti automobilových skel*. 01. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2021.
- [2] STARÝ, Michal et al. Způsob bezkontaktního měření automobilových skel, Sklář a keramik. *Vydavatelství ČSSS, s.r.o.* 2021, 51-55 pages. ISSN 0037-637X.
- [3] VÍT, Zdeněk. *Nové konstrukční postupy pro lehkou konstrukci rámu efektorů a periférií robotů*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] HLUCHÝ, Miroslav et al. *Strojírenská technologie 2*. 1. díl. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-117-4.
- [5] HASTRETAIL. Jak se vyznat v materiálech III - KOVY. *HastGroup.cz* [online]. 2023 [vid. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.hastgroup.cz/aktuality/jak-se-vyznat-v-materialech-iii-kovy/>
- [6] ŠKOLNÍ PORTÁL SPŠS STAVEBNÍ A SPŠ ŽIŽKOVA. *Kovové a nekovové konstrukce* [online]. 2020. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/sps\\_2\\_kovove\\_a\\_nekovove\\_konstrukce-UT.pdf](https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/sps_2_kovove_a_nekovove_konstrukce-UT.pdf)
- [7] SLAVÍČEK, Jiří. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] ŠANOVEC, Jan. Lehké konstrukce automobilů – využití hořčíku | MM Průmyslové spektrum. *MM publishing, s.r.o* [online]. 2016, (Vydání 9) [vid. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-vyuziti-horciku>
- [9] PRUDÍKOVÁ, Alena. *Struktura a únavové vlastnosti vybrané titanové slitiny*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení v Brně.
- [10] LENFELD, Petr. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [11] ŠMÍD, Jiří. Termoplasty místo hliníku v konstrukci letadel | Technický týdeník. *Business Media s.r.o.* [online]. 2024 [vid. 2024-05-10]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/termoplasty-misto-hliniku-v-konstrukci-letadel\\_59552.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/termoplasty-misto-hliniku-v-konstrukci-letadel_59552.html)
- [12] JANEČEK, Pavel. *Vliv povrchových úprav skleněných vláken na mechanickou odezvu GF/polyester kompozitu*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] ČERNÝ, Ondřej. *Analýza vlastností polymerních kompozitů se skleněnými a uhlíkovými vlákny v matrici PA*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.

- [14] ZHANG, Fanglan, et al. Using integrated quality function deployment and theory of innovation problem solving approach for ergonomic product design. *Computers & Industrial Engineering*. 2014, **76**, 60-74 pages. ISSN 0360-8352.
- [15] Portálový jeřáb. *GH Cranes* [online]. 2024 [vid. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.ghcranes.com/cs/vyrobky/portalovy-jerab>
- [16] MAREŠ, Tomáš. *Základy konstrukční optimalizace*. Knižnice konstrukční optimalizace. Praha: [Tomáš Mareš], 2006. ISBN 80-239-6508-5.
- [17] FRYC, Jan. *Konstrukční návrh uložení mlhového světloometu*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [18] RŮŽIČKA, Tomáš. *Topologická optimalizace jako nástroj designu pro aditivní technologii*. Praha, 2022. Diplomová práce. České vysoké učení v Praze.
- [19] ŽABKA, Petr. Úvod do numerických simulací. PPT. In: . Technická univerzita v Liberci. 2021.
- [20] ŽABKA, Petr. Tvorba výpočtového modelu. PPT. In: . Technická univerzita v Liberci. 2021.

# Seznam obrázků, tabulek a příloh

## Seznam obrázků

Obr. 1 Popis měřicího zařízení (podklady KSR).....	13
Obr. 2 Rám konstrukce (podklady KSR).....	13
Obr. 3 Kyvná konzola (podklady KSR) .....	14
Obr. 4 Základní deska (podklady KSR) .....	14
Obr. 5 Pseudomaketa (podklady KSR).....	15
Obr. 6 Portál s konfokálními snímači (podklady KSR).....	16
Obr. 7 Princip optiky snímače [1].....	16
Obr. 8 Rozdělení polymerů dle aplikace [9].....	19
Obr. 9 Laserové nanášení vláken [10].....	20
Obr. 10 Plnostěnná konstrukce portálového jeřábu [14] .....	24
Obr. 11 Příhradová konstrukce .....	25
Obr. 12 Skořepinová konstrukce kostry automobilu [5].....	25
Obr. 13 Strukturní optimalizace [17] .....	27
Obr. 14 Definice okrajových podmínek a materiálu.....	29
Obr. 15 Porovnání sítě – a) Automaticky generovaná, b) Manuálně nastavená....	30
Obr. 16 Porovnání deformace – a) Automatická síť, b) Manuálně nastavená síť..	31
Obr. 17 Pozice portálu .....	32
Obr. 18 První pozice portálu současného technického řešení stroje .....	33
Obr. 19 Druhá pozice portálu současného technického řešení stroje.....	35
Obr. 20 Třetí pozice portálu současného technického řešení stroje .....	37
Obr. 21 Přiřazená absolutní tuhost kyvné konzole .....	38
Obr. 22 Přiřazená absolutní tuhost základní desce.....	38
Obr. 23 Původní varianta kyvné konzole s maximální deformací měřicího stroje..	39
Obr. 24 První varianta kyvné konzole se čtvercovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje .....	40
Obr. 25 Druhá varianta kyvné konzole s kruhovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje.....	40
Obr. 26 Třetí varianta kyvné konzole s obdélníkovým průřezem a maximální deformací měřicího stroje .....	41

Obr. 27 Čtvrtá varianta kyvné konzole s obdélníkovým průřezem s vyztužujícími žebry a maximální deformací měřicího stroje .....	42
Obr. 28 Specifikace zámkového systému – výstupek, otvor a spojení [2] .....	43
Obr. 29 Návrhy – a) nižší, b) vyšší počet zámků, c) odlehčená verze .....	44
Obr. 30 Maximální deformace měřicího zařízení pro varianty – a), b) a c) .....	44
Obr. 31 Exploze kyvné konzole .....	45
Obr. 32 Řez kyvnou konzolí.....	45
Obr. 33 Posunutí konfokálních snímačů v ose y (podklady KSR).....	46
Obr. 34 Posunutí snímačů ve směru osy y mezi konzolou (a) a (b).....	47
Obr. 35 Optimalizace základní desky .....	48
Obr. 36 Upravované oblasti portálu .....	49
Obr. 37 Upravovaná oblast 1 .....	49
Obr. 38 Upravovaná oblast 2 .....	49
Obr. 39 Posunutí ve směru osy y neupraveného pojezdového portálu .....	50
Obr. 40 Posunutí ve směru osy y upraveného pojezdového portálu .....	50
Obr. 41 Přidání nového pohonu.....	51
Obr. 42 Optimalizace přidáním pohonu .....	52
Obr. 43 Stávající technické zařízení (podklady KSR).....	53
Obr. 44 Kyvná konzola – a) stávající, b) inovovaná .....	54
Obr. 45 Deformace konzolí ve směru osy y–a) stávající, b) inovovaná .....	54
Obr. 46 Hmotnosti konzolí – a) stávající, b) inovovaná .....	55
Obr. 47 Označení výkresové dokumentace .....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 1) .....	39
Tabulka 2: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 2) .....	40
Tabulka 3: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 3) .....	41
Tabulka 4: Změna deformace v závislosti na změně tloušťky (varianta 4) .....	41

## **Seznam příloh**

### **Výkresová dokumentace**

3-DP-S22000233-00-00.drw  
2-DP-S22000233-01-00.drw  
2-DP-S22000233-01-01.drw  
2-DP-S22000233-01-02.drw  
2-DP-S22000233-01-03.drw  
3-DP-S22000233-01-04.drw  
4-DP-S22000233-01-05.drw  
4-DP-S22000233-01-06.drw  
3-DP-S22000233-01-07.drw  
4-DP-S22000233-01-08.drw  
4-DP-S22000233-01-09.drw  
3-DP-S22000233-01-10.drw  
2-DP-S22000233-02-00.drw  
3-DP-S22000233-02-01.drw  
4-DP-S22000233-02-02.drw  
3-DP-S22000233-03-01.drw

### **CAD data**

kyvna-konzola\_asm.stp  
kryt\_asm.stp  
patka.stp

## **DXF soubory**

2-dp-s22000233-01-02.dxf

2-dp-s22000233-01-03.dxf

3-dp-s22000233-01-04.dxf

4-dp-s22000233-01-05.dxf

4-dp-s22000233-01-06.dxf

3-dp-s22000233-01-07.dxf

4-dp-s22000233-01-08.dxf

4-dp-s22000233-01-09.dxf

3-dp-s22000233-01-10.dxf

3-dp-s22000233-02-01.dxf

3-dp-s22000233-03-01.dxf