



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH VAHADLA TLUMIČE HORSKÉHO KOLA POMOCÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE

DESIGN OF ROCKER FOR MOUNTAIN BIKE SHOCK ABSORBER USING TOPOLOGY OPTIMIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Zalibera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vaverka

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Tomáš Zalibera
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ondřej Vaverka
Akademický rok:	2017/18

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:

Návrh vahadla tlumiče horského kola pomocí topologické optimalizace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve snaze o vyrobení dílů s minimální hmotností a zároveň maximální únosností se s úspěchem využívá spojení topologické optimalizace a kovového 3D tisku. Existuje řada softwarů, které se liší svými možnostmi a přístupem k optimalizaci dílů. Na jednotné komponentě uložení tlumiče horského kola mohou být tyto metody porovnány.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je porovnání návrhů topologické optimalizace z různých softwarových nástrojů na komponentě pro horské kolo a výběr nejlepší varianty.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše dostupných softwarových nástrojů,
- topologická optimalizace pomocí několika různých SW nástrojů,
- porovnání návrhů pomocí MKP analýzy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

BRACKETT, D., ASHCROFT, I., HAGUE, R. Topology optimization for additive manufacturing. In Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Solid Freeform Fabrication Symposium edition: 22, Austin, Texas, USA, 8-10 August 2011.

ROZVANY, G. I. N., A critical review of established methods of structural topology optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009, vol. 37, iss. 3, s. 217-237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0. ISSN 1615-1488.

VAVERKA, O. Optimalizace těhlice formule student pro výrobu SLM technologií. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predložená bakalárska práca sa zaoberá rešeršou a následným porovnaním softvérov určených pre topologickú optimalizáciu. Bol daný jednotný komponent, ktorý bol opticky digitalizovaný a prevedený do digitálnej podoby, nasledovala definícia zaťažovacích stavov, pre ktorú bol zostavený kinematický model. Na predmetnom komponente ďalej prebehla topologická optimalizácia v 4 vybraných softvéroch. Výsledky z topologických optimalizácií boli validované v napäťovo-deformačnej analýze pre zistenie možných medzných stavov. Následne bol vybraný najlepší variant, ktorý bol dodatočne upravený pre dosiahnutie vhodnej hodnoty bezpečnosti voči medzným stavom, kde komponent vyhovel. V diskusii a závere sa následne práca venuje konečnému porovnaniu softvérov z rôznych hľadísk a je vybraný najvhodnejší softvér, v ktorom bolo dosiahnuté zníženie deformácie vahadiel o 27% pri miernom znížení ich pôvodnej hmotnosti.

KEÚČOVÉ SLOVÁ

Topologická optimalizácia, Vahadlo, Selective laser melting, Optická digitalizácia, MKP analýza

ABSTRACT

Submitted bachelor thesis deals with research and comparison of topology optimization software. A given component is 3D scanned, after that, kinematics model is done to define possible load cases. Then, topology optimization is done in four selected software. Results from topology optimization are then validated in FE analysis to acquire maximum deformation and stress. After the FEA the best variant is chosen, which is additionally modified to reach sufficient level of safety factor. The discussion and conclusion chapter deals about final comparison of topology optimization software based on FEA results and the most suitable software is chosen, in which decrease of deformation by 27% was achieved with a level of weight a bit lower as with the original rockers.

KEY WORDS

Topology optimization, Rocker, Selective laser melting, 3D scanning, FE analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ZALIBERA, T. *Návrh vahadla tlumiče horského kola pomocí topologické optimalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vaverka.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Ondřeji Vaverkovi za odborné vedenie bakalárskej práce a cenné rady pri jej riešení. Vďaka patrí rovnako aj mojej rodine, priateľke a blízkym, ktorí ma počas celého štúdia vždy podporovali.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto prácu s názvom Návrh vahadla tlumiče horského kola pomocí topologické optimalizace vypracoval samostatne za použitia uvedenej literatúry pod odborným vedením pána Ing. Ondřeje Vaverky.

V Brne dňa 18.5.2018

.....

Tomáš Zalibera

OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	13
2 PREHEAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	14
2.1 Topologická optimalizácia	14
2.1.1 Úvod a metódy topologickej optimalizácie	14
2.1.2 Softvér pre topologickú optimalizáciu	17
2.2 Spôsobu prevodu výsledkov TO na objemové modely	22
2.2.1 Kompletne premodelovanie	22
2.2.2 Využitie funkcií softvérov nato určených	23
2.2.3 Priama konverzia modelov	23
2.3 Aditívne technológie	24
2.3.1 Úvod do aditívnych technológií	24
2.3.2 FDM	26
2.3.3 SLA	27
2.3.4 SLM	28
2.4 Model horského bicykla	29
2.5 Optická digitalizácia	30
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	31
3.1 Analýza problému	31
3.1.1 Porovnanie TO softvérov	31
3.1.2 Konečná voľba TO softvérov	34
3.1.3 Voľba spôsobu prevodu výsledku TO na objemový model	34
3.2 Cieľ práce	35
4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE	36
4.1 Postup návrhu	36
4.1.1 Optická digitalizácia vahadiel	36
4.1.2 Tvorba obálky	37
4.1.3 Zaťažovacie stavy a uloženie vahadiel	38
4.1.4 Zjednotenie okrajových podmienok	42
4.2 Topologická optimalizácia vo vybraných softvéroch	45
4.2.1 Autodesk Inventor 2018	45
4.2.2 Ansys Workbench 18.1	46
4.2.3 Autodesk Fusion 360	47
4.2.4 SolidThinking Inspire 2018	48
4.3 Prevod výsledkov TO na objemové modely	49
4.3.1 Hmotnostné porovnanie	49
4.4 Napätovo-deformačná analýza	50
4.4.1 Výpočtový model	50
4.4.2 Okrajové podmienky a nastavenie analýzy	50
4.4.3 Výsledky napätovo-deformačnej analýzy	54
4.4.4 Zhodnotenie napätovo-deformačnej analýzy	57
4.5 Výber najlepšieho variantu	57
5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	58
5.1 Dodatočné úpravy najlepšieho variantu	58
5.2 Napätovo-deformačná analýza finálnych vahadiel	59
5.2.1 Napätovo-deformačná analýza pre 1. ZS	59

5.2.2 Napät'ovo-deformačná analýza pre 2. ZS	60
6 DISKUSIA	62
7 ZÁVER	64
8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	65
9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	68
10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	69
11 ZOZNAM TABULIEK	71
12 ZOZNAM PRÍLOH	72
Obrázková dokumentácia k MKP analýze finálnych vahadiel	73
Obrázková dokumentácia k MKP analýze pôvodných vahadiel	74

1 ÚVOD

1

V inžinierskej praxi bolo odjakživa zaužívané pracovať čo najefektívnejšie. Konštruktéri, ale aj technológovia, sa vždy snažili produkt navrhovať a vyrábať tak, aby nie len spĺňal svoju funkciu, ale aby bol čo najlacnejší, najľahší, najpevnejší a aby vydržal počas celej doby životnosti bez porúch. Najmä znižovanie hmotnosti a zvyšovanie pevnosti je v dnešnej dobe veľmi aktuálna téma. Nižšia hmotnosť môže napríklad v leteckom alebo vesmírnom priemysle ušetriť nemalé prevádzkové náklady, kedy aj len minimálna úspora hmotnosti šetrí kilogramy paliva. Vyššia pevnosť môže zasa predĺžiť životnosť výrobku, resp. zvýšiť jeho spoľahlivosť.

Metóda, ktorá tejto neľahkej úlohe už niekoľko rokov pomáha, sa nazýva topologická optimalizácia (ďalej len TO), ktorá po definícií okrajových podmienok rozvrhne, resp. vypočíta na základe pôsobenia síl a väzieb najvhodnejšie rozloženie materiálu v súčiastke.

Ako každá technológia, má aj topologická optimalizácia svoje obmedzenia. Samotný tvar, získaný z optimalizácie, obvykle nadobúda zložité organické tvary. Výroba takýchto tvarov je konvenčnými technológiami veľmi zložitá, ba niekedy až nemožná. Problematike výroby takýchto tvarovo zložitých súčiastok sa s úspechom venuje kovová 3D tlač, ktorá funguje na princípe tavenia kovového prášku do požadovaného tvaru.

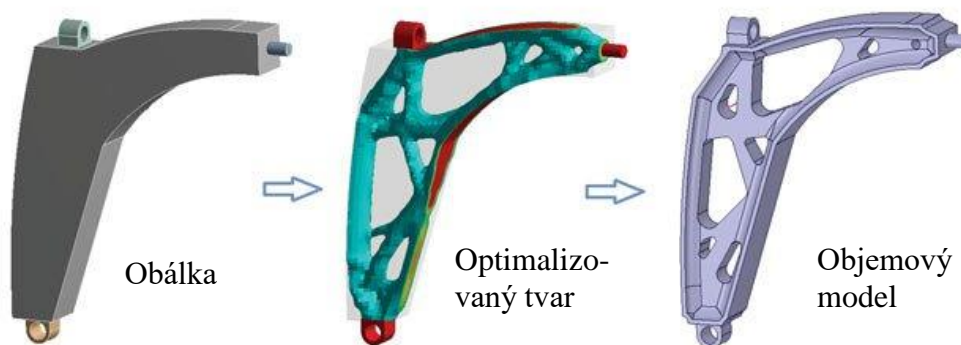
Konkurencia v oblasti inžinierskych softvérov je v dnešnej dobe veľmi vysoká, rovnaká situácia postupne nastáva aj v oblasti softvérov schopných topologickej optimalizácie. Tieto softvéry sa medzi sebou líšia nie len spôsobom distribúcie, užívateľskou jednoduchosťou alebo možnosťami, ale aj výsledkami, ktoré sú schopné produkovať. Na jednotnej úlohe, ktorou je topologická optimalizácia vahadiel horského bicykla, budú tieto softvéry porovnané.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2.1 Topologická optimalizácia

2.1.1 Úvod a metódy topologickej optimalizácie

Cieľom topologickej optimalizácie je určenie optimálneho rozloženia materiálu v danom priestore súčiastky (ďalej len obálka) tak, aby bol dosiahnutý požadovaný cieľ TO, ktorým môže byť napríklad úspora hmotnosti. Okrajové podmienky ako napríklad zaťaženie a jeho smer, mechanické vlastnosti materiálu alebo väzby sú pritom vopred známe. [1]



Obr. 2.1 Priebeh topologickej optimalizácie [2]

V priemyselnej výrobe, kde sa berie zreteľ nie len na samotnú funkčnosť produktu, ale aj na jeho ekonomickú stránku, môže vhodné použitie topologickej optimalizácie teda napríklad ušetriť hmotnosť výrobku a s tým spojené výrobné a prevádzkové náklady.

Ako príklad je vhodné uviesť komponent z dopravného lietadla *Airbus A320*, jedná sa o držiak krytu prúdového motora, ktorých je na takomto lietadlo niekoľko. S využitím topologickej optimalizácie bola dosiahnutá celková úspora 10 kg [3], čo sa nemusí zdať, vzhľadom na váhu prázdneho lietadla, 37 230 kg [4], veľa. Avšak z článku „*Getting to grips with fuel economy*“ od spoločnosti *Airbus* vyplýva, že 10 kg nadbytočnej hmotnosti spôsobí priemerné zvýšenie ročnej spotreby paliva lietadla o 500 kg [5].



Obr. 2.2 Držiak krytu [3, upravené]



Obr. 2.3 Organická štruktúra na tehlici Dragon 7 [6]

Problémovú výrobu organickej štruktúry vhodne rieši práve využitie aditívnych technológií, resp. využitie 3D tlače, ktorá je minimálne ovplyvnená tvarovou zložitou komponentu. Možným problémom pri aditívnej výrobe je výroba prevísajúcich častí, kde musí byť použitý podporná štruktúra, prípadne prvky ktoré sú na hranici rozlíšiteľnosti tlače (napr. malé rádiusy). Problémy môže spôsobovať taktiež nehomogenita materiálu, a s ňou súvisiace mechanické vlastnosti takto vyrobeného dielu.

Metódy topologickej optimalizácie

Matematické základy topologickej optimalizácie, ktoré položil autor Michell sú známe už viac ako jedno storočie. Michell sa vo svojej práci zaoberal stanovením optimálneho rozloženia nosníkov v mostových, resp. prúťových konštrukciách. Rozvoj TO ale nastal až s príchodom výpočtovej techniky, ktorá umožnila rapídne zrýchliť jej výpočet. Metód topologickej optimalizácie je niekoľko, avšak nie všetky sa využívajú z dôvodu nízkej efektivity, resp. vysokého výpočtového výkonu, ktorý je požadovaný [7].

Rozlišujeme napríklad:

- Solid Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP)
- Evolutionary Structural Optimization (ESO)
- Soft-Kill Option (SKO)
- Level-set methods

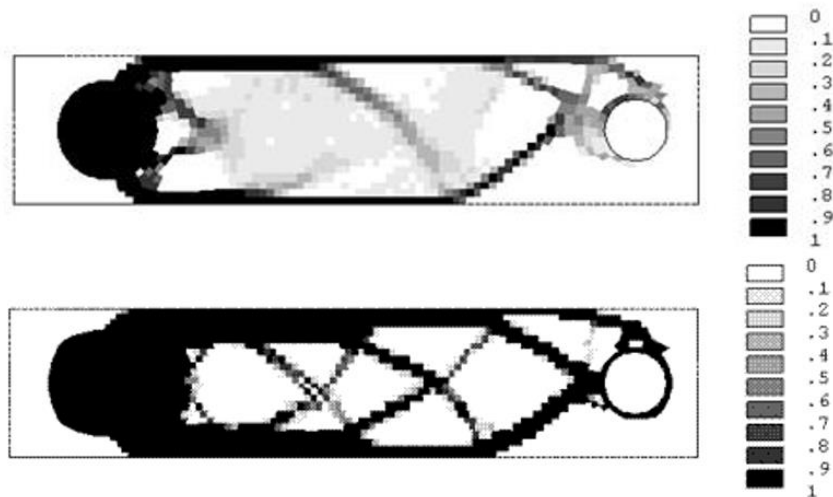
Medzi najpoužívanejšie metódy patria SIMP a ESO [8].

Evolutionary Structural Optimization (ESO)

V tejto metóde je požadované kritérium, napr. redukované napätie alebo deformácia, počítané v každej iterácii riešenia. Z výsledku sú následne odobrané prvky s hodnotou nevyhovujúcou požadovanému kritériu. Je to heuristická metóda, čo znamená, že riešenie je hľadané vo veľkom počte generovaných čísel [7].

SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization)

Tzv. metóda hustôt, je najpoužívanejšou numerickou metódou topologickej optimalizácie. V danej oblasti je jednotlivým konečným elementom priradzovaná hodnota z intervalu 0 až 1, ktorou vyjadrujeme napr. hodnotu hustoty alebo hrúbky materiálu v danom mieste elementu. Následne je ale nutné rozdeliť oblasť na elementy s hodnotou presne 1 alebo 0. K tomuto účelu slúžia tzv. penalizačné metódy ktoré oblasť vyčistia od tzv. „šedých zón“ [7].



Obr. 2.4 Metóda SIMP pred (hore) a po (dole) penalizácii [9]

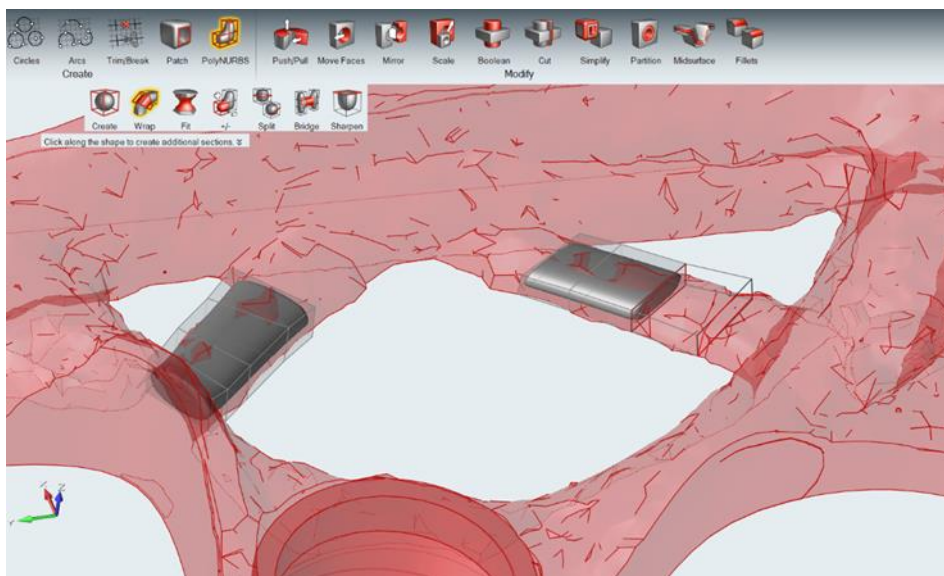
2.1.2 Softvér pre topologickú optimalizáciu

V súčasnosti existuje pre TO veľké množstvo softvérov, ktoré sa líšia svojimi možnosťami a spôsobom distribúcie, či už ako platené verzie, alebo ako voľne šíriteľne resp. open-source verzie, ktoré chápeme ako verzie s verejne prístupným zdrojovým kódom.

Inspire 2018

Softvér, ktorý je určený primárne na topologickú optimalizáciu od spoločnosti *Altair Engineering*. Okrem spomenutej topologickej optimalizácie *Inspire* ponúka mnoho iných nástrojov ako napríklad simulácia tuhnutia odliatku, dynamická analýza a podobne. *Inspire* je možné chápať ako grafickú nadstavbu výpočtového jadra *Altair OptiStruct*, ktoré funguje na metóde SIMP. Je licencovaný ako platený softvér [10].

Jeho výhodou oproti väčšine TO softvérov je prítomnosť nástrojov pre modelovanie polyNURBS geometrie, pomocou ktorých je prevod polygónového modelu získaného z TO na objemový model rýchly a užívateľsky jednoduchý. Funguje na princípe vyberania vhodných rezov na TO súčiastke, ktoré sú následne medzi sebou spájané a tým tvoria geometriu [10].

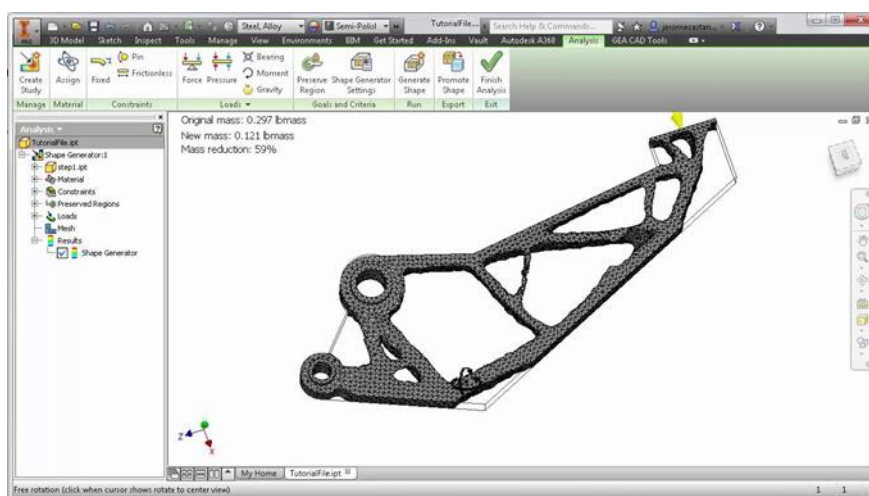


Obr. 2.5 polyNURBS modelár v softvéri Inspire

Inventor 2018

Je parametrický 3D CAD software od firmy *Autodesk* určený hlavne pre navrhovanie súčastí alebo zostavných celkov technického charakteru a tvorbu výkresovej dokumentácie.

Inventor obsahuje TO od vo verzii 2016 R2 [11] pod názvom *Shape generator*. Takáto integrácia topologickej optimalizácie priamo do balíka *Inventor* poskytuje komplexný návrhový aparát, v ktorom je možné jednoducho prejsť fázou vývoja výrobku od koncepcného návrhu, cez simuláciu, optimalizáciu, štruktúrnu analýzu až po výkresovú dokumentáciu. Software využíva výpočtové jadro *Autodesk Nastran*, ktoré pracuje na optimalizačnej metóde SIMP [12].



Obr. 2.6 Prostredie nástroja Shape generator [11]

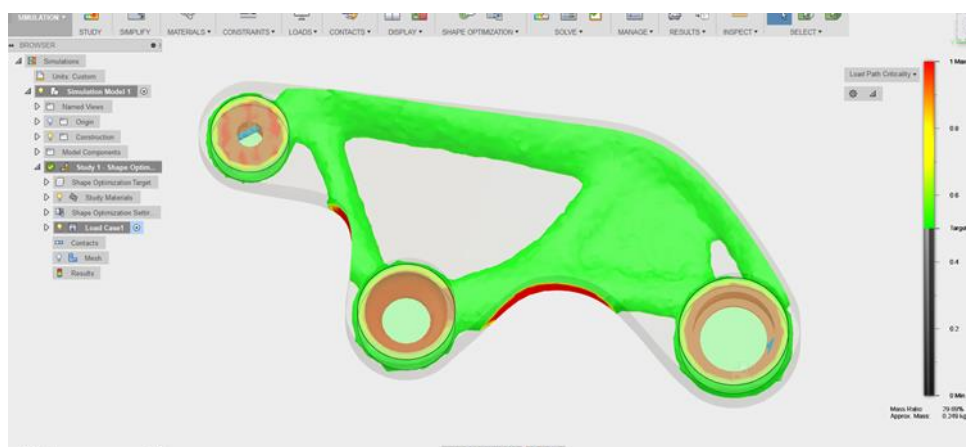
Workbench 18.1

Je jedným z najpoužívanejších inžinierskych systémov určených priamo na MKP výpočty od spoločnosti *Ansys*. Softvér umožňuje simulovať najrôznejšie inžinierske problémy, ako napríklad štruktúrnu, termodynamickú, akustickú, dynamickú analýzu, topologickú optimalizáciu a iné [13].

Prostredie *Workbench* je grafická nadstavba APDL (ANSYS Parametric Design Language) výpočtového jadra. Modul topologickej optimalizácie využíva metódu SIMP. Prívetivé užívateľské rozhranie umožňuje komplexne nastaviť obálku dielu, väzby, zaťažovacie stavy a iné OP. Výsledný zoptimalizovaný diel je možné následne v rovnakom prostredí validovať v štruktúrnej analýze [13].

Fusion 360

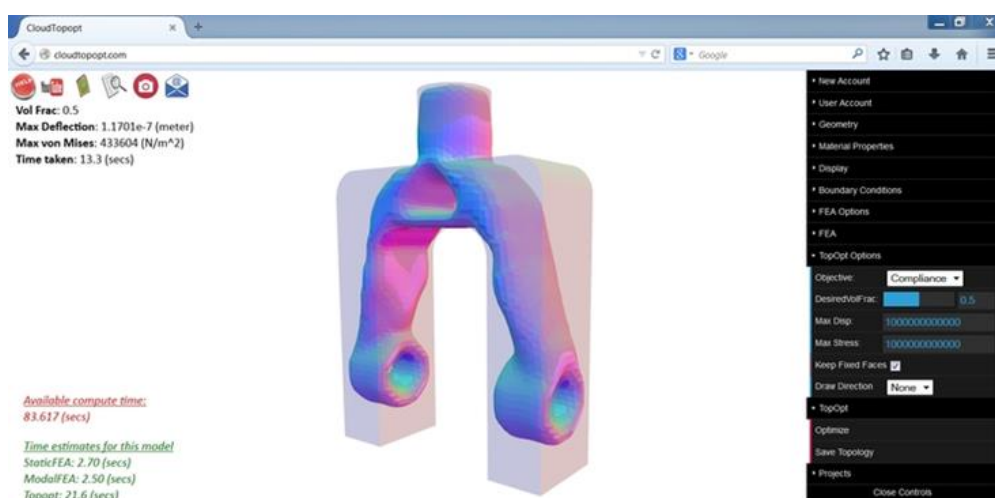
Softvér od spoločnosti *Autodesk* určený hlavne pre malé podniky a nadšencov. Softvér obsahuje okrem základnej CAD funkcionality ďalšie nástroje ako napríklad štruktúrna analýza, topologická optimalizácia, dynamická analýza, CAM rozhranie a iné. Jeho verzia *standard* je označená ako voľne šíriteľná, avšak využitie simulačných nástrojov funguje na princípe predplatného vo forme kreditov [14]. Software využíva výpočtové jadro *Autodesk Nastran*, ktoré pracuje na optimalizačnej metóde SIMP [12]. *Fusion 360* pracuje v cloude a to vrátane numerických výpočtov pri simuláciách, pričom je možné predplatiť si verziu *Fusion 360 Ultimate*, ktorá podporuje výpočty priamo v počítači užívateľa [14].



Obr. 2.7 Prostredie TO v softvéri Fusion 360

CloudTopopt

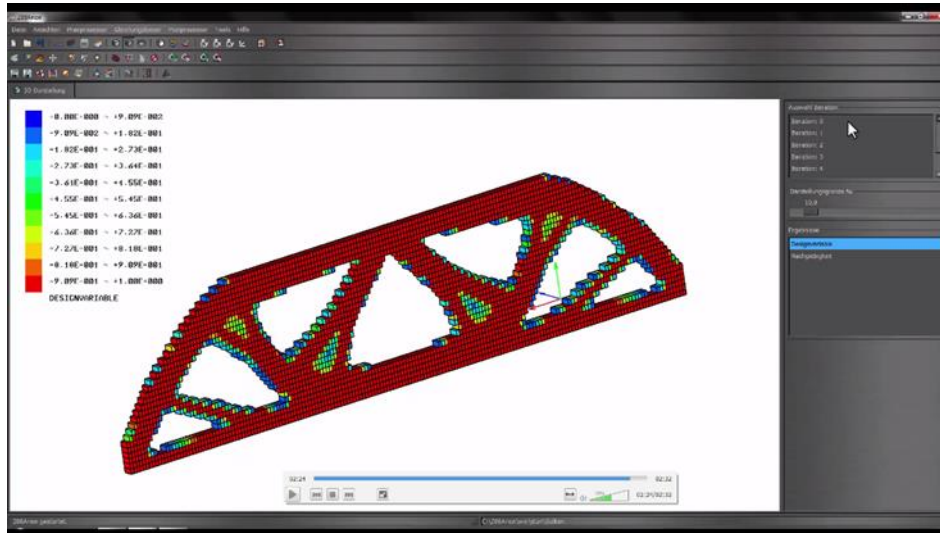
TO softvér od spoločnosti SciArt fungujúci vo webovom rozhraní. Poskytuje základnú funkcionality TO a voľbu okrajových podmienok, avšak jeho voľne šíriteľná verzia je obmedzená len na 100 sekúnd výpočtového času [15].



Obr. 2.8 Webové rozhranie Cloudtopopt [15]

Z88Arion

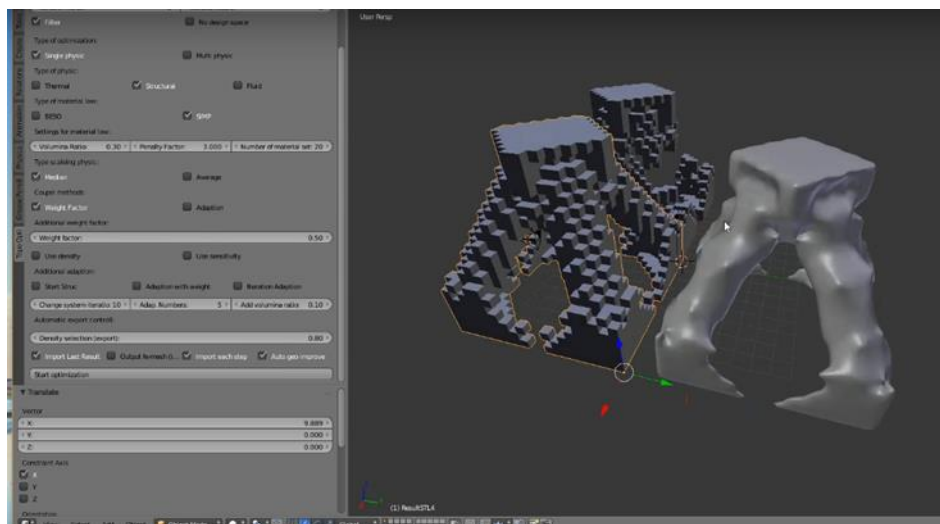
Vznikol na University of Bayreuth. Funguje na výpočtovom jadre Z88. Jeho verzia je označená ako voľne šíriteľná. Softvér ponúka pomerne rozsiahle nastavenia TO vrátane voľby výpočtovej metódy TO [16].



Obr. 2.9 Prostredie softvéru Z88Arion [16]

ToOptiX

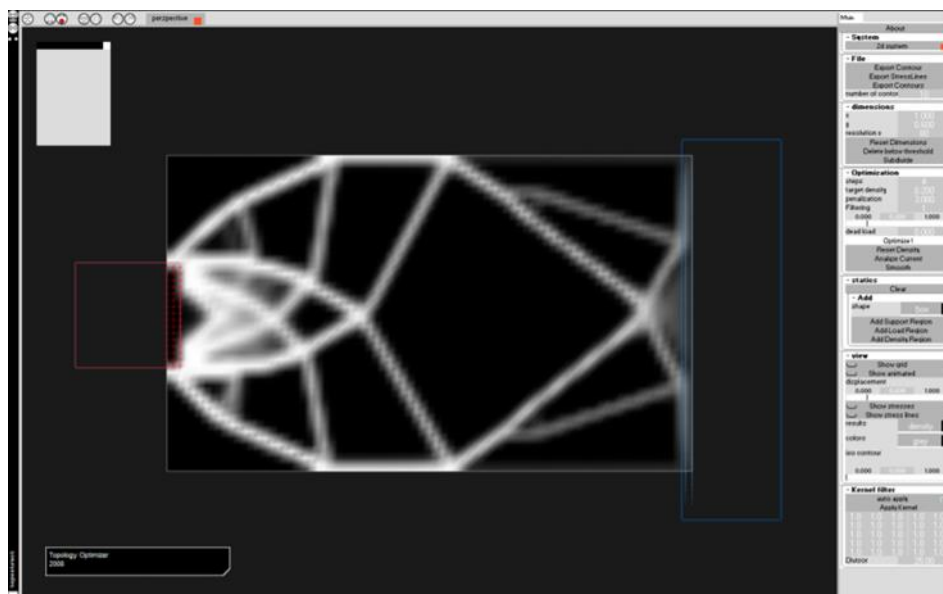
Jedná sa o open-source prídavný modul do 3D modelovacieho softvéru Blender. Jeho hlavnou nevýhodou je absencia definície okrajových podmienok, ktoré je potreba definovať a následne importovať z MKP softvérov [17].



Obr. 2.10 Prostredie modulu v softvéru Blender [17]

Topostruct

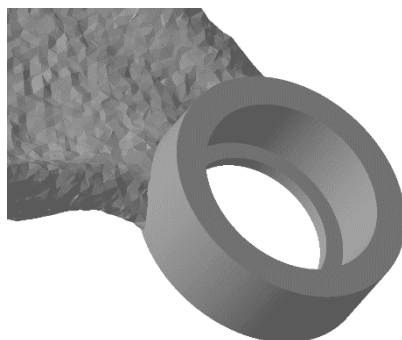
Softvér, ktorý slúži prevažne ako ukážka princípu TO, ma len minimálne množstvo nastavení čo ho nepredurčuje na riešenie inžinierskych problémov. Je distribuovaný ako voľne šíriteľný. [18].



Obr. 2.11 Prostredie softvéru Topostruct [18].

2.2 Spôsoby prevodu výsledkov TO na objemové modely

Výstupom z TO je polygónový model vo formáte STL. Tento formát je ale vzhľadom na ďalší postup práce nevhodný z dôvodu nemožnosti zaväzbiť ho v zostave alebo využiť v napätovo-deformačnej analýze. Taktiež sa v týchto modeloch nachádza veľké množstvo vrubov, ktoré predstavujú koncentrátoary napätia.

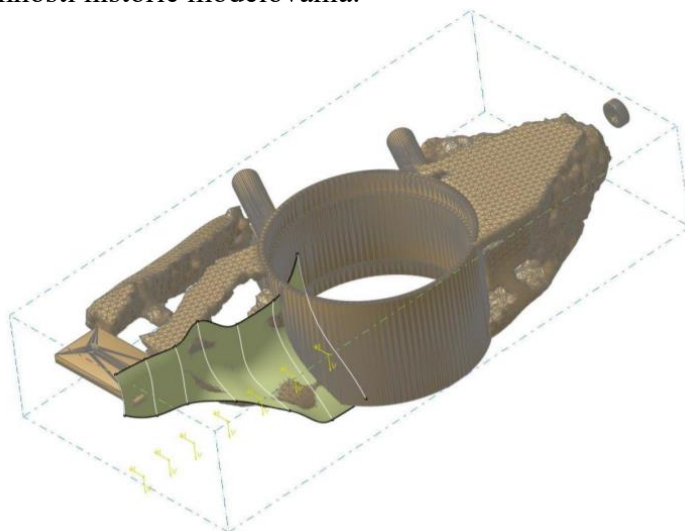


Obr. 2.12 Vruby

Preto je potreba tieto polygónové modely previesť na modely objemové, a ideálne minimalizovať koncentrátoary napätia. Obecne existujú 3 spôsoby ako to urobiť.

2.2.1 Kompletné premodelovanie

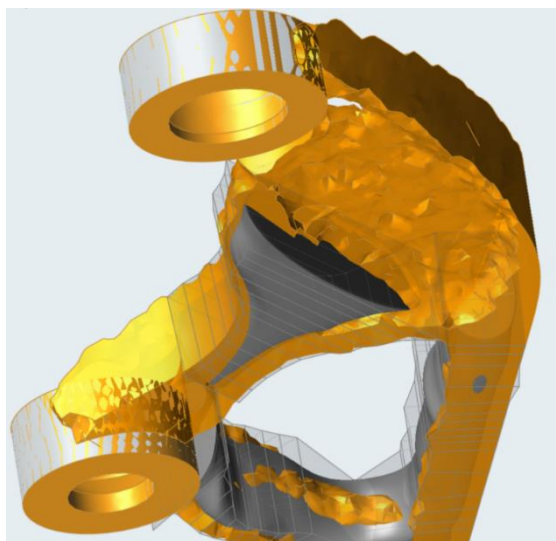
Do CAD softvéru je vložený výsledok z TO, ktorý slúži ako predloha, nasleduje tvorba systému rôzne natočených rovin tak, aby rezy modelom v týchto rovinách čo najlepšie reprezentovali tvar výsledkov z TO. Ďalej nasleduje tvorba náčrtov v týchto rovinách, ktoré sa následne pomocou nástrojov na plošné, resp. klasické modelovanie spoja do jedného celku. Tento spôsob je časovo veľmi náročný a vyžaduje dobré modelovacie schopnosti užívateľa. Softvéry vhodné na takýto spôsob modelovania sú napríklad Autodesk Inventor, Catia, PTC Creo, SolidThinking Evolve a iné. Výhodou tohto spôsobu je úplná kontrola nad výsledným tvarom a možnosť spätného premodelovania z dôvodu prítomnosti histórie modelovania.



Obr. 2.13 Spôsob kompletného premodelovania aplikovaný na výsledok TO tehlice [6]

2.2.2 Využitie funkcií softvérov nato určených

Na trhu existuje niekoľko softvérov, ktoré v sebe obsahujú nástroje priamo určené na prácu s výsledkami z TO. Menovite sú to napríklad SolidThinking Inspire [10] a Catia 3DExperience [19]. Vo svojej podstate funguje modelovanie na rovnakom princípe ako bolo spomenuté pri predchádzajúcom spôsobe, avšak líši sa užívateľskou jednoduchosťou, kedy nie je potrebná komplexná znalosť modelára. Užívateľ vyberá jednotlivé prierezy súčiastky a softvér z nich automaticky vytvára hladké plochy. Nevýhodou je malá kontrola nad výsledným tvarom a vysoká aproximácia výsledku z TO.



Obr. 2.14 Nevhodná aproximácia, žltý - výsledok z TO
sivý – objemový model

2.2.3 Priama konverzia modelov

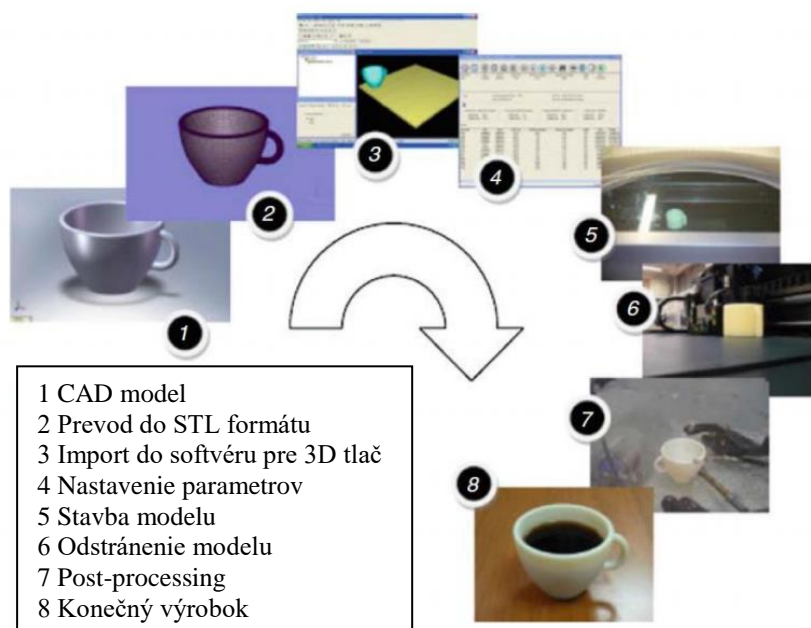
Polygónový, resp. STL model sa skladá z veľkého počtu trojuholníkov, prakticky je teda možné takýto model priamo prekonvertovať do objemového modelu, nástroje na takúto konverziu sú prístupné napríklad v CAD softvéri *Ansys SpaceClaim* [20] pod názvom *Convert to solid*, alebo v softvéri *Autodesk Inventor* pod názvom *Meshenabler* [21]. Samotná konverzia ale rieši len problém kompatibility modelu s MKP softvérom, nerieši problém s ostrými hranami, resp. s vrubmi. Preto je vhodné pred samotnou konverziou použiť vstavané nástroje na vyhladenie meshu tak, aby sa priveľmi nezmenil samotný tvar súčiastky, a aby sa zároveň odstránili vruby. Následne je ešte potrebné ručne domodelovať funkčné plochy, ktoré stratili na kvalite z dôvodu vyhladenia meshu.

Výhodou je časová nenáročnosť a prijateľný výsledok. Nevýhodou tohto spôsobu je veľkosť súboru modelu a s tým spojené nároky na výpočtovú techniku. Ako ďalšiu nevýhodu je možné spomenúť náročnosť spätnej editácie z dôvodu absencie histórie modelovania.

2.3 Aditívne technológie

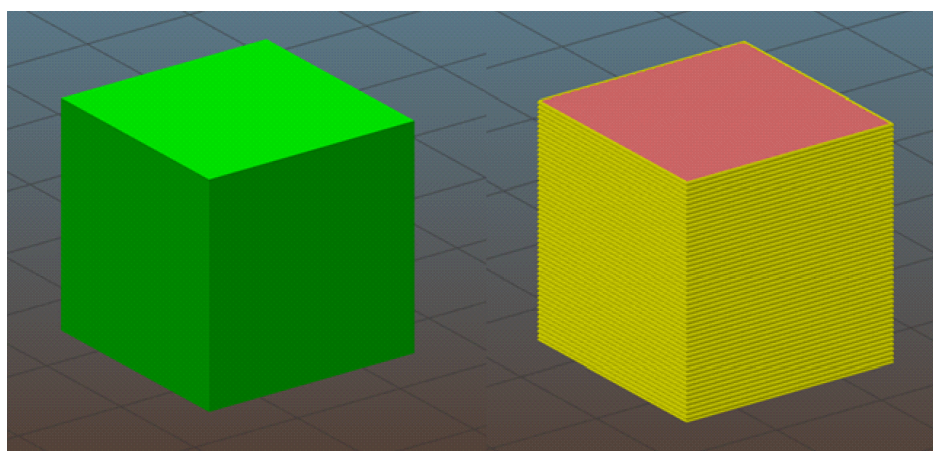
2.3.1 Úvod do aditívnych technológií

Pod týmto pojmom sa chápe súbor technológií, ktoré fungujú na princípe opakovaného nanášania materiálu po jednotlivých vrstvách. Využívajú sa napríklad na rýchlu výrobu prvotných prototypov v procese návrhu produktu, alebo na výrobu už funkčných dielcov obvykle menších sérií, ktoré by nebolo možné vyrobiť konvenčnými metódami výroby, prípadne by ich výroba bola neefektívna [22].



Obr. 2.15 Potrebné kroky v aditívnej výrobe [22, upravené].

Vstupom do procesu 3D tlače je trojrozmerný polygónový model obvykle vo formáte STL. Model následne prechádza pre-processingom, ktorý zahrňuje nastavenia tlače akými sú napríklad: pozícia modelu na podložke, použitie podpornej štruktúry, výška vrstvy alebo rýchlosť tlače. Ďalším krokom je tzv. slicovanie, kde sa model rozdelí na vrstvy, z ktorých sa následne generujú inštrukcie pre pohyby stroja [22].



Obr. 2.16 Vľavo pôvodný model, vpravo naslicovaný model

Technológie aditívnej výroby je možné rozdeliť podľa rôznych kritérií, avšak najbežnejšie rozdelenie je práve podľa stavebného materiálu, z ktorého vzniká výtlačok, respektíve fyzický model.

Rozlišujeme nasledovné technológie [23].

Na báze pevných materiálov:

- FDM – Fused Deposition Modeling
- LOM – Laminated Object Manufacturing
- PLT – Paper Lamination Technology

Na báze tekutých materiálov:

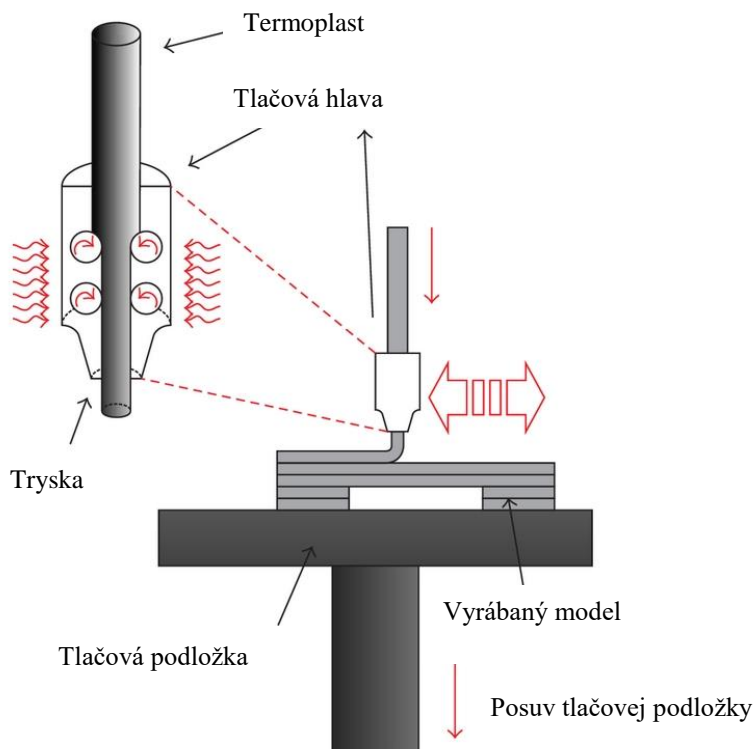
- SLA – Stereolithography
- SCS – Solid Creation System
- SGC – Solid Ground Curing
- MJM – Multi-Jet Modeling
- BPM – Ballistic Particle Manufacturing

Na báze práškových materiálov:

- SLM – Selective Laser Melting
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering
- EBM – Electron Beam Melting
- LENS – Laser Engineered Net Shaping
- MJS – Multiphase Jet Solidification
- 3DP – Three-Dimensional Printing

2.3.2 FDM

Jedná sa o najpoužívanejšiu a najlacnejšiu metódu aditívnej výroby. Termoplast je pretlačovaný cez vyhrievanú trysku pomocou podávača materiálu, ktorá sa pohybuje v priestore stroja. Po dokončení aktuálnej vrstvy sa tryska, prípadne tlačová podložka posunie o jednu výšku vrstvy a proces sa opakuje. Výšky vrstiev sa pohybujú rádovo v desatinách milimetra [22].



Obr. 2.17 Princíp fungovania FDM technológie [24 upravené]

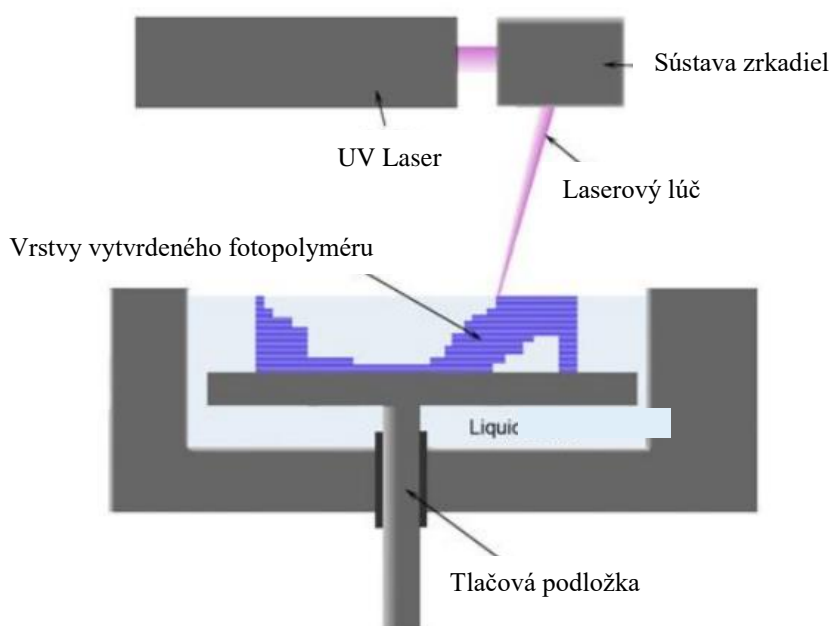
Medzi najpoužívanejšie termoplasty patria ABS a PLA, pričom trendom je ponuku materiálov naďalej rozširovať o materiály ako PETG, Nylon, PET, prípadne o materiály rozpustné vo vode, resp. rozpúšťadlách, napríklad PVA (voda) a HIPS (acetón, lemonsol) [25].



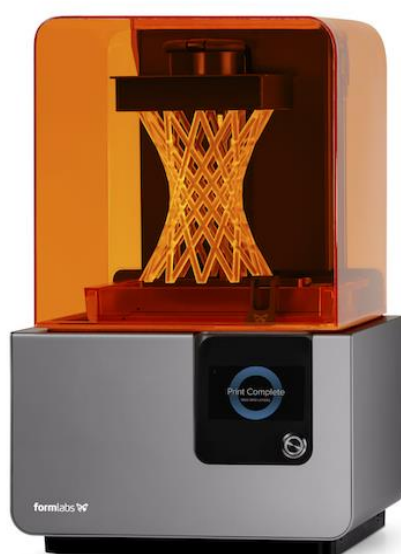
Obr. 2.18 Termoplast v podobe filamentu [26]

2.3.3 SLA

Ide o veľmi presnú metódu aditívnej výroby, ktorej princípom je vytvrdzovanie tekutého fotopolyméru pomocou UV lasera. Fyzický model je vytváraný na tlačovej podložke, ktorá je ponáraná do tekutého fotopolyméru, po vytvrdení aktuálnej vrstvy pomocou UV lasera sa podložka posunie o výšku vrstvy a proces sa opakuje. Výšky vrstiev sa pohybujú v rozmedzí stotín milimetrov. Podobnou technológiu, ktorá využíva rovnaký materiál ako SLA je DLP technológia, ktorá sa od SLA líši v použití DLP monitora a UV zdroja svetla, ktorý je presvecovaný cez monitor, na ktorom sú zobrazované jednotlivé vrstvy [22].



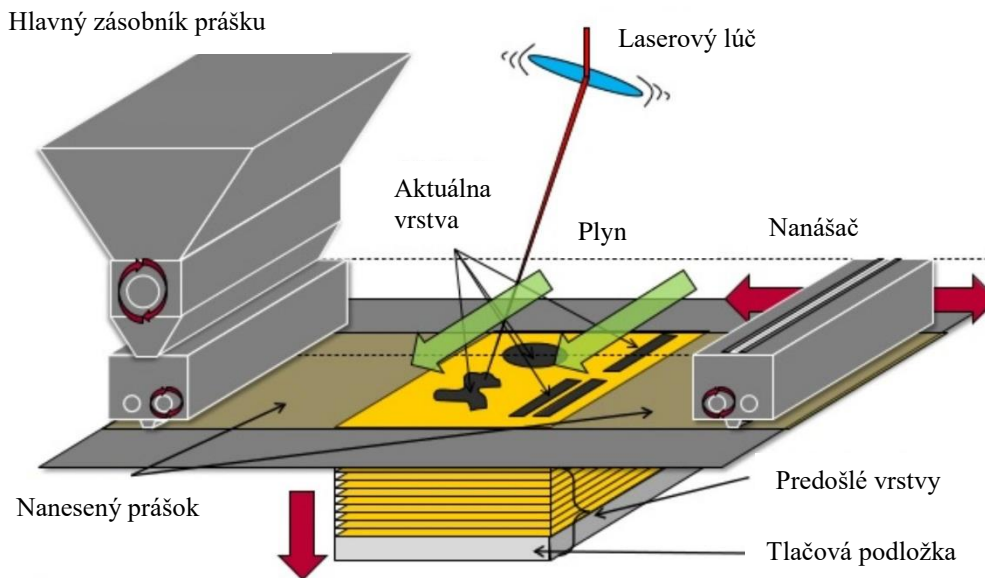
Obr. 2.19 Princíp fungovania SLA technológie [22, upravené]



Obr. 2.20 SLA tlačiareň spoločnosti Formlabs [27]

2.3.4 SLM

Technológia Selective laser melting (ďalej len SLM) využíva pre stavbu fyzického modelu kovový prášok mikrometrickej veľkosti. Prášok je rovnomerne nanášaný na tlačovú platformu, kde sa pomocou laserového lúča roztaví do požadovaného tvaru aktuálnej vrstvy. Tlačová komora je vzduchotesná a je do nej vháňaný inertný ochranný plyn zamedzujúci oxidáciu prášku na vzduchu [22].



Obr. 2.21 Princíp SLM [27, upravené]

V dnešnej dobe je ponuka materiálov pre technológiu SLM veľmi široká. Ako príklad je uvedený prehľad ponúkaných práškových materiálov od spoločnosti SLM Solutions.

Tab. 2.1 Materiály pre SLM

Trieda materiálu	Medza pevnosti (MPa)	Príklady použitia
Hliníkové zliatiny	375 - 415	tehlice závodných monopostov
Nehrdzavejúce ocele	633 - 1194	výmenníky tepla
Niklové zliatiny	772 - 1348	lopatky turbín
Nástrojové ocele	1135 - 1888	výroba foriem a nástrojov
Titánové zliatiny	290 - 1301	bedrové implantáty
Kobaltové zliatiny	1039 - 1062	jadrá zubných korún



Obr. 2.22 Bedrový kĺb z titánu

2.4 Model horského bicykla

Model horského bicykla, ktorého súčasťou bola TO je Canyon Neuron AL.7, modelový rok 2017.



Obr. 2.23 Horský bicykel [30]

Je to celo-odpružený bicykel určený do ťažkého terénu, ktorého pruženie zabezpečujú vzduchové tlmiče vpredu aj vzadu. Zadný vzduchový tlmič je umiestnený v strednej časti hliníkového rámu. Spodná časť tlmiča je uchytaná na nepohyblivú časť rámu a horná časť tlmiča je spojená s dvoma vahadlami.



Obr. 2.24 Detail na vahadlá [30]

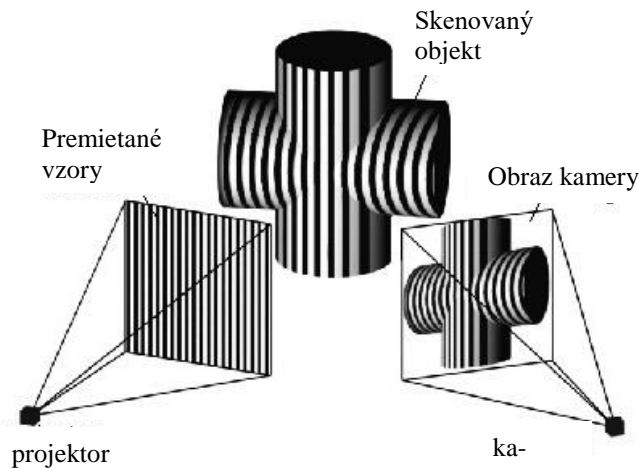
Typ tlmiča použitý na predmetnom bicykli je RockShox Monarch RT3 so zdvihom 57 mm a vzdialenosťou medzi koncami tlmiča 200 mm [31].



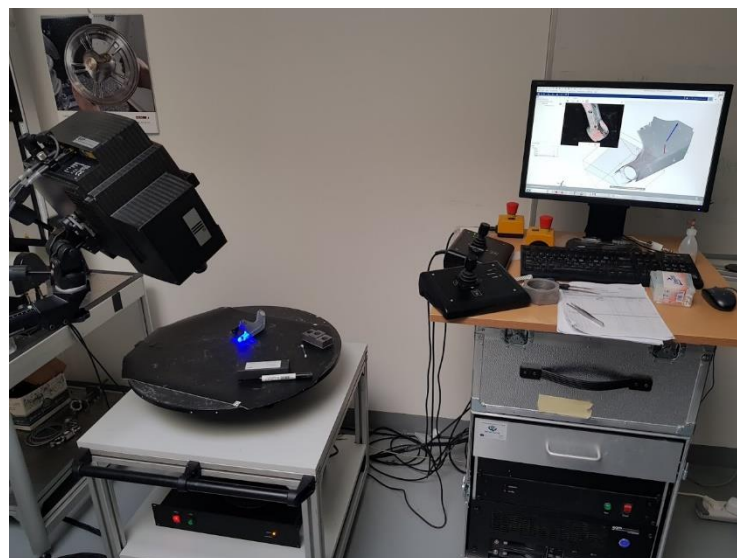
Obr. 2.25 Tlmič RockShox Monarch RT3 [31].

2.5 Optická digitalizácia

Pod týmto pojmom sa rozumie technológia, ktorá umožňuje prevádzať fyzické objekty do 3D modelu. S takýmto modelom je potom možné naďalej pracovať a upravovať ho. Najpoužívanejšou metódou optickej digitalizácie je tzv. štruktúrované svetlo, kde sú na skenovanú súčiastku premietané preddefinované vzory. Tieto vzory, ktoré sa na povrchu skenovaného objektu rôzne deformujú, sú následne snímané kamerou. Finálnu analýzu obrazu a zostrojenie 3D modelu zaisťuje príslušný softvér [32].



Obr. 2.26 Princíp 3D skenovania [32, upravené]



Obr. 2.27 Skenovanie na Atos Triplescan

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3

3.1 Analýza problému

3.1

Z rešeršnej časti práce vyplýva, že v dnešnej dobe je trendom využívanie aditívnych technológií a najrôznejších MKP simulácií. Konštruktéri sa čoraz viac snažia minimalizovať hmotnosť pri zachovaní pevnostných charakteristík, pretože to môže ušetriť výrobné a prevádzkové náklady. Nástrojom, ktorý im v tom môže pomôcť, je aj topologická optimalizácia.

Momentálne existuje na trhu niekoľko softvérov určených na TO. Medzi sebou sa líšia nie len spôsobom distribúcie, ale aj svojimi možnosťami.

Na jednotnom komponente z horského bicykla je možné tieto softvéry z hľadiska výsledkov TO porovnať. Porovnávaným komponentom je zostava dvoch vahadiel, ktoré spájajú zadný vzduchový tlmič so zadným kolesom pomocou niekoľko ďalších častí rámu. Zo zadania vyplynulo, že vahadlá budú namáhané 2 hlavnými zaťažovacími stavmi, pre ktoré boli zadané veľkosti síl a stlačenia tlmiča.

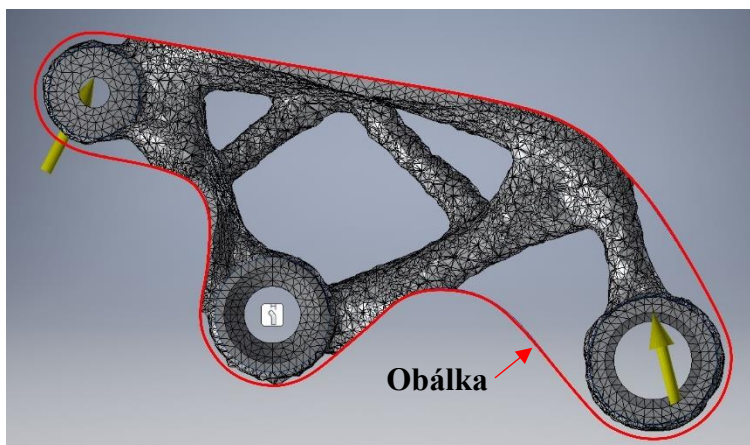
3.1.1 Porovnanie TO softvérov

3.1.1

Na základe rešeršnej časti bolo definované niekoľko porovnávacích kritérií, pomocou ktorých boli zvolené TO softvéry do samotného porovnania.

Definícia vlastnej obálky (Design region)

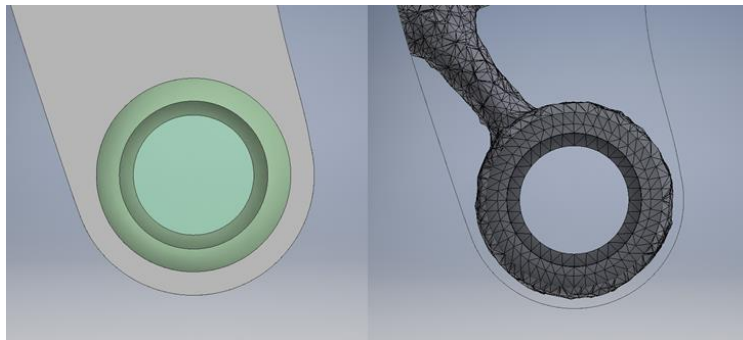
Jedno z najdôležitejších kritérií. Obálkou sa rozumie priestor, v ktorom bude TO prebiehať, resp. v ktorom bude TO hľadať najpriaznivejšie rozloženie materiálu vzhľadom na okrajové podmienky.



Obr. 3.1 Obálka v topologickej optimalizácii

Vylúčenie regiónov (Exclusion region)

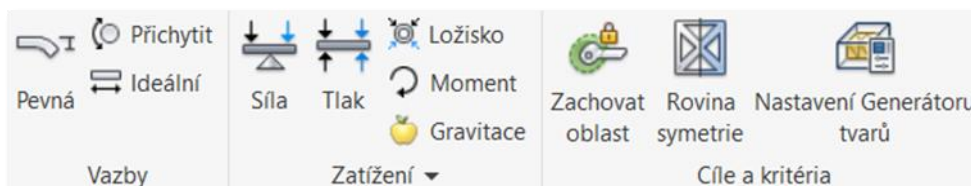
Rozumieme tým definíciu určitých oblastí obálky, ktoré nie sú postihované TO. Tieto časti ostávajú po TO zachované. Obvykle sa jedná o zachovanie funkčných plôch ako napríklad diery a podobne.



Obr. 3.2 Vľavo - obálka s vylúčeným regiónom, vpravo - výsledok TO

Okrajové podmienky

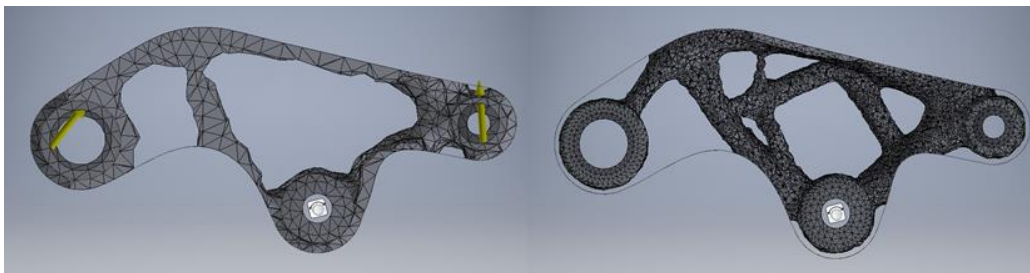
Nastavenie okrajových podmienok je základom každej MKP analýzy. Softvér by mal obsahovať nástroje na definíciu väzieb, síl a podobne. V prípade TO sú hlavnými OP požadovaný cieľ optimalizácie a požadovaná úspora materiálu.



Obr. 3.3 Ukážka OP v softvéri Inventor

Kontrola nad konečno-prvkovou sieťou

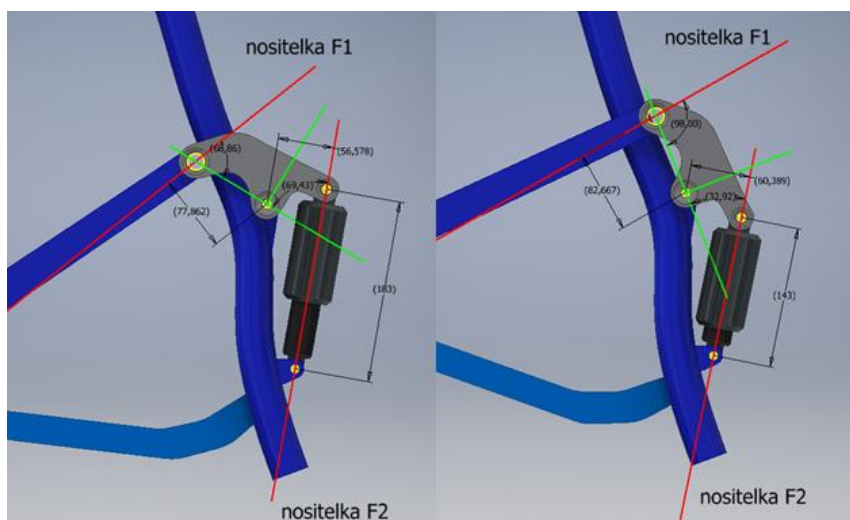
Aby bola MKP analýza úspešná, je potreba skúmané objemové teleso rozdeliť na konečný počet prvkov, pričom je dôležitý ich počet a tvar. Preto je vhodné, aby softvér disponoval nástrojmi, pomocou ktorých je možné generovanie a prípadne úpravy konečno-prvkovej siete ovládať.



Obr. 3.4 Vplyv počtu prvkov na výsledok TO

Viaceré zaťažovacie stavy

V prípade súčiastky, ktorá sa napríklad pohybuje v rámci mechanizmu môže nastať situácia, kedy veľkosti a smery síl pôsobiacich na súčiastku nemusia byť v koncových polohách pohybu rovnaké. V tom prípade je ideálne súčiastku optimalizovať naraz na viac zaťažovacích stavov.



Obr. 3.5 Zmena smeru nositeľiek síl v závislosti na stlačení tmiča

Výsledok porovnania

Po definovaní porovnávacích kritérií boli softvéry z rešeršnej časti vyskúšané na jednoduchej súčiastke a ich hodnotenie zapísané do tabuľky 2.

Tab. 2.2 Výsledok porovnania TO softvérov

Kritéria/softvér	Def.vlastnej obálky	Vylúčenie regiónov	Okrajové podmienky	Kontrola nad KP sieťou	Viaceré zaťažovacie stavy
Workbench	✓	✓	✓	✓	✓
Inspire	✓	✓	✓	✗	✓
Inventor	✓	✓	✓	✓	✗
Fusion 360	✓	✓	✓	✓	✗
Cloudtopopt	✓	✗	✓	✓	✗
Z88 Arion	✓	✓	✓	✓	✗
ToOptix	✓	✗	✓	✗	✓
Topostruct	✗	✗	✓	✗	✗

Kde:

✓ - softvér kritérium obsahuje

✓ - softvér kritérium obsahuje, ale pre náš účel je nedostatočné

✗ - softvér kritérium neobsahuje

3.1.2 Konečná voľba TO softvérov

Pri voľbe softvérov do porovnania sa vychádzalo najmä z tab. 2. Hlavnými sledovanými kritériami boli: definícia vlastnej obálky, vylúčenie regiónov a okrajové podmienky.

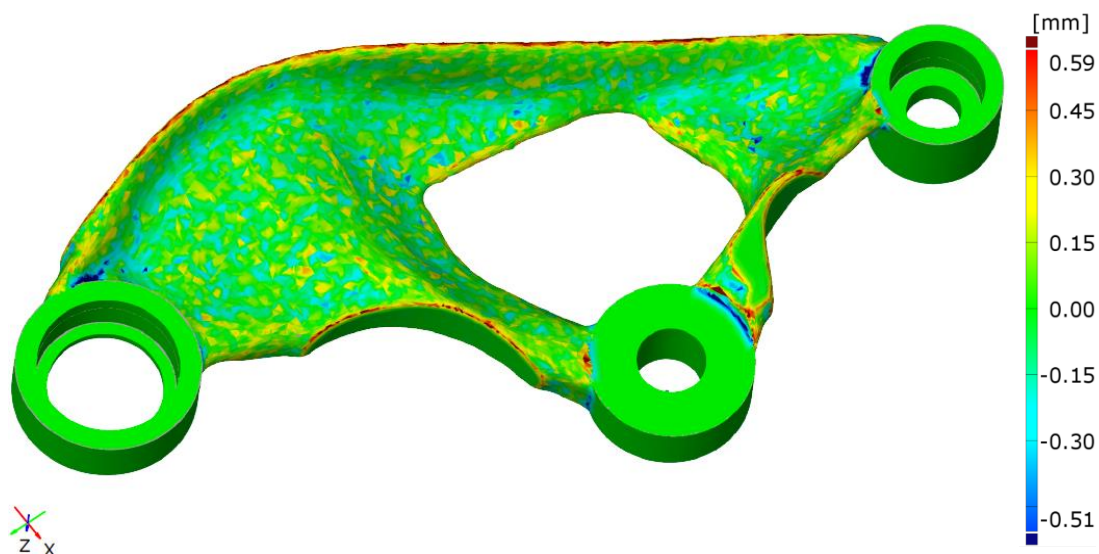
Vybrané softvéry do porovnania:

- Workbench
- Inspire
- Inventor
- Fusion 360

3.1.3 Voľba spôsobu prevodu výsledku TO na objemový model

V kapitole 2.2 boli obecné zhrnuté 3 spôsoby prevodu výsledkov z TO na objemový model. Každý spôsob má svoje výhody a nevýhody, bolo teda potrebné vybrať jednotný spôsob, pomocou ktorého sa efektívne prekonvertuje 8 výsledkov vahadiel z TO. Použitím spôsobu kompletného premodelovania by sa síce dosiahol kvalitný model s minimálnym počtom vrubov a s možnosťou spätnej editácie, avšak tento spôsob bol vylúčený z dôvodu veľkej časovej náročnosti. Následne sa zvažovalo využitie softvéru SolidThinking Inspire a jeho vstavaného NURBS modelára, avšak po niekoľkých testoch sa zistilo, že objemový model stráca dôležité časti zo svojich detailov ako to je možné vidieť na obr. 2.14.

Ako finálne riešenie bol zvolený spôsob priamej konverzie na objemový model hlavne z dôvodu, že tento spôsob je časovo nenáročný a prakticky automatický, pretože je najmenej ovplyvnený vstupmi od užívateľa, ktoré by nemuseli byť medzi jednotlivými prevodmi rovnaké. Je teda predpoklad, že týmto spôsobom sa dosiahne najvierohodnejšie porovnanie výsledkov z TO. Nastala ale otázka, ako veľmi sa zmení tvar, resp. rozmery modelu po takejto konverzii. Preto sa pristúpilo k overeniu jedného takto prekonvertovaného modelu pomocou softvéru GOM Inspect, kde cez seba boli preložené 2 modely, výsledok z TO, tj. polygónový model, a skonvertovaný objemový model.



Obr. 3.6 Rozmerové porovnanie výsledku z TO so skonvertovaným objemovým modelom

Z porovnania je vidieť, že sa rozmery zmenili len minimálne, v radoch desiatín mm. Je teda možné konštatovať, že takýto spôsob prevodu je pre účely práce dostatočný.

3.2 Cieľ práce

3.2

Cieľom bakalárskej práce je topologická optimalizácia sústavy dvoch vahadiel vo vybraných softvéroch, pričom obálka dielu a okrajové podmienky budú v každom softvéri rovnaké. Po samotnej TO bude nasledovať MKP analýza koncepčných variantov, výber najlepšieho variantu a konštrukčné riešenie.

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

4.1 Postup návrhu

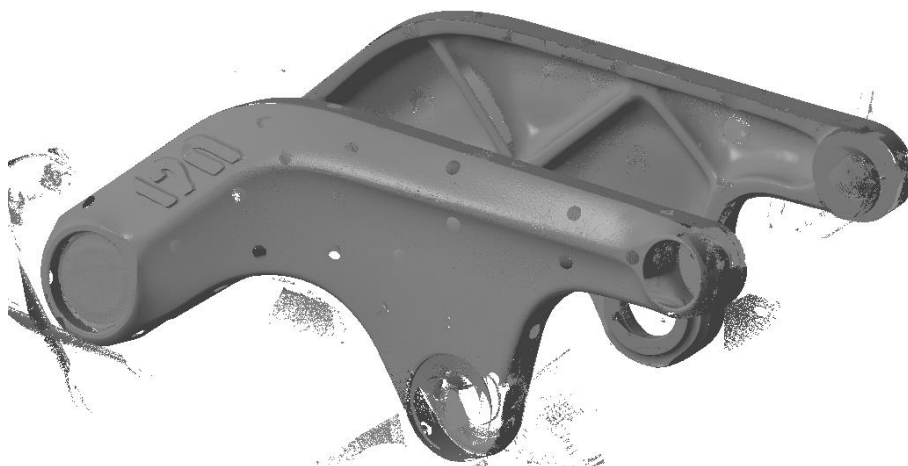
4.1.1 Optická digitalizácia vahadiel

Prvým krokom pre topologickú optimalizáciu je tvorba obáľkového dielu, na ktorom následne prebehne TO. Z dôvodu tvarovej zložitosti pôvodných vahadiel boli vahadlá naskenované. Použitým prístrojom bol 3D skener ATOS Triple Scan.

Pred 3D skenovaním bolo potrebné povrch oboch vahadiel nastriekať kriedovým sprejom typu MR 2000 Anti-Reflex L z dôvodu zaistenia nízkej odrazivosti premietaných vzorov od skenovaných objektov. Ďalej nasledovalo nalepenie pozičných značiek, ktoré slúžia na zarovnanie jednotlivých skenov. Pripraviť na skenovanie bolo potrebné obe vahadla, pretože nie sú symetrické. Samotné 3D skenovanie pozostávalo z naskenovania oboch vahadiel a následného exportu skenov zo softvéru Atos Professional do súboru STL.



Obr. 4.1 Priebeh skenovania

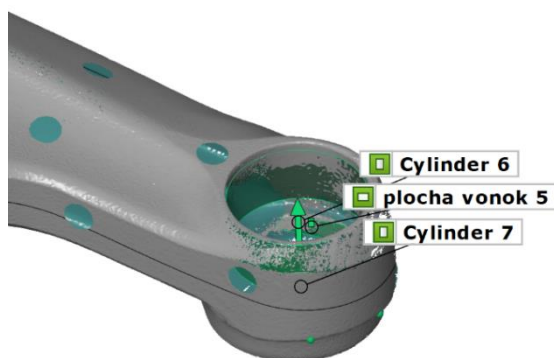


Obr. 4.2 Výsledok skenovania

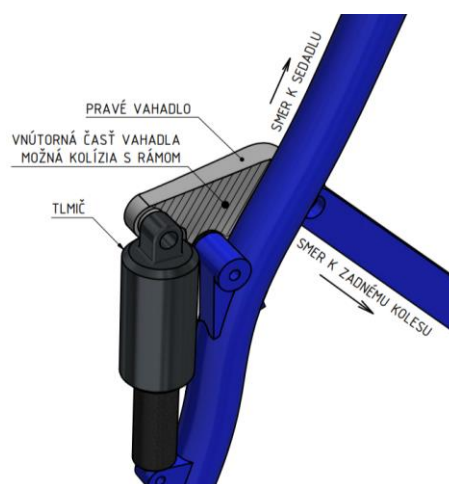
4.1.2 Tvorba obálky

Jedným z hlavných vstupov do softvéru na topologickú optimalizáciu je objemový, respektíve tzv. solid model, v ktorom následne topologická optimalizácia prebieha. Priame použitie STL modelov naskenovaných vahadiel teda nebolo možné nie len z dôvodu absencie objemového modelu, ale aj kvôli predpokladu, že pri návrhu pôvodných vahadiel konštruktéri pravdepodobne už použili nejakú formu tvarovej optimalizácie, a ďalšia optimalizácia by bola kontraproduktívna. Bolo teda potrebné obálky vymodelovať na novo, pričom bolo dôležité zachovať funkčné prvky a aspoň približný tvar vahadiel, aby nenastala kolízia s rámom bicykla.

Pri tvorbe obálky vahadiel bol najprv využitý softvér GOM Inspect, v ktorom boli pomocou dostupných nástrojov aproximované hlavné funkčné časti skenu základnými geometrickými prvkami ako napr. valec, kužeľ, rovina a podobne.

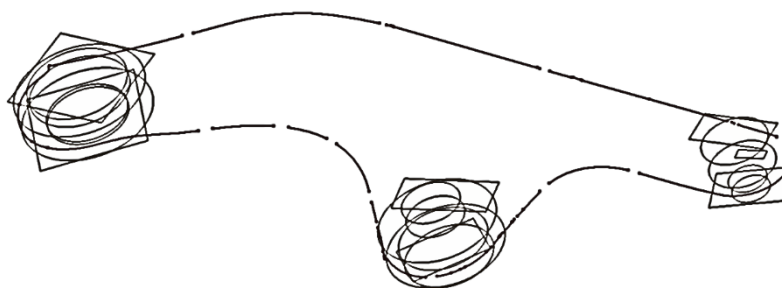


Obr. 4.3 Aproximácia valcom a rovinou



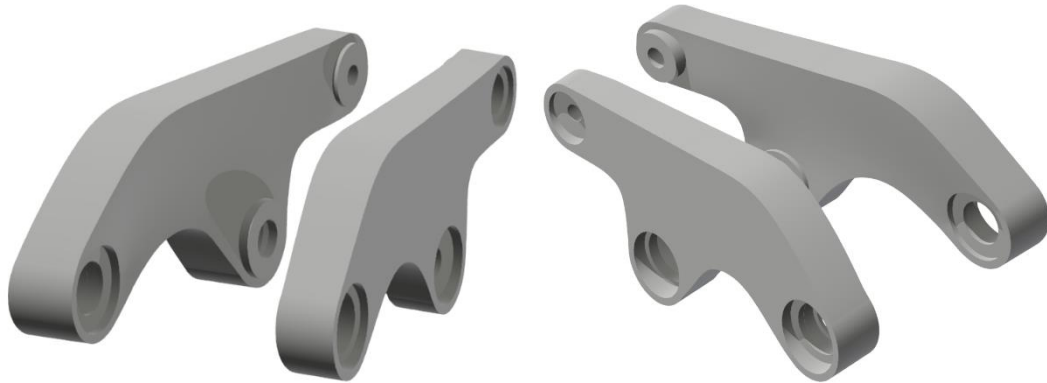
Obr. 4.4 Vnútorá časť vahadla

Zvýšenú pozornosť bolo potreba venovať vnútornej časti vahadiel, resp. časti, ktorá je bližšie k rámu. Pri nevhodne zvolenom prístupe modelovania by mohlo dôjsť ku kolíziám obálok vahadiel s rámom bicykla. Keďže spomínaný vnútorný tvar nebol rovinný, bolo potrebné cez neho preložiť vhodnú polynomicкую plochu .



Obr. 4.5 Výstup z GOM Inspect

Po následnom importe týchto geometrických prvkov do softvéru *Autodesk Inventor 2018* sme pomocou nástrojov na úpravu povrchov vymodelovali objemový model obálok oboch vahadiel.



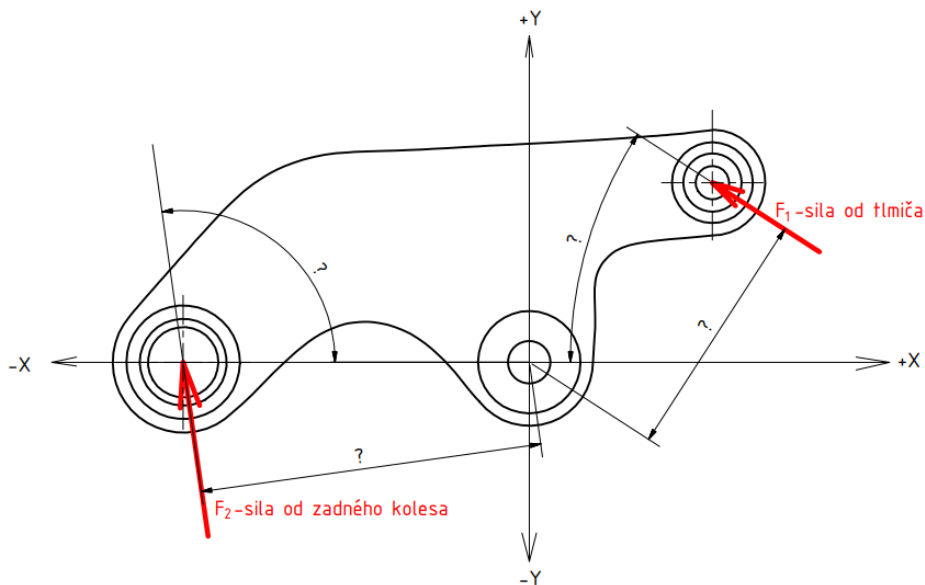
Obr. 4.6 Obálky vahadiel pripravené na TO

4.1.3 Zaťažovacie stavy a uloženie vahadiel

Dôležitou podmienkou úspešnej MKP analýzy je definícia okrajových podmienok, resp. definícia síl, väzieb a podobne. V prípade predmetných vahadiel boli zadané 2 zaťažovacie stavy, resp. sily pôsobiace od zadného tlmiča prislúchajúce dvom stlačniam tlmiča, pričom smery a prípadné reakcie síl bolo potrebné určiť.

Hľadané parametre

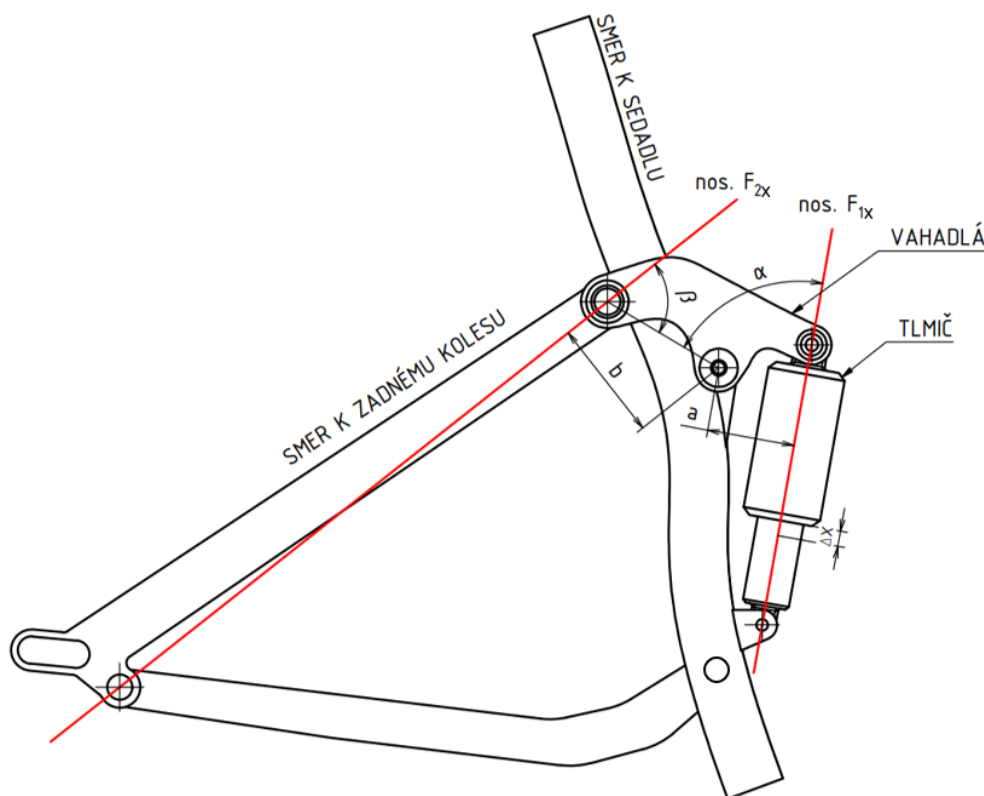
Hľadanými parametrami sú nositeľky síl od tlmiča a od zadnej časti rámu, resp. ich uhly voči niektorej z osí súradnicového systému a veľkosť reakčnej sily na opačnom konci vahadiel, ktorá bude vypočítaná z momentovej rovnováhy k bodu otáčania.



Obr. 4.7 Hľadané parametre

Kinematický model

Aby bolo možné určiť všetky hľadané parametre, bolo potrebné vymodelovať zjednodušený kinematický model rámu, ktorý bude simulovať reálnu pozíciu a natočenie vahadiel v závislosti na stlačení tlmiča. S pomocou nákresov získaných od výrobcu bicykla a fyzických meraní bol vymodelovaný parametrický model zadnej časti rámu, ktorého súčasti sa náležite medzi sebou zaväzbili tak, aby ich pohyb odpovedal skutočnosti.

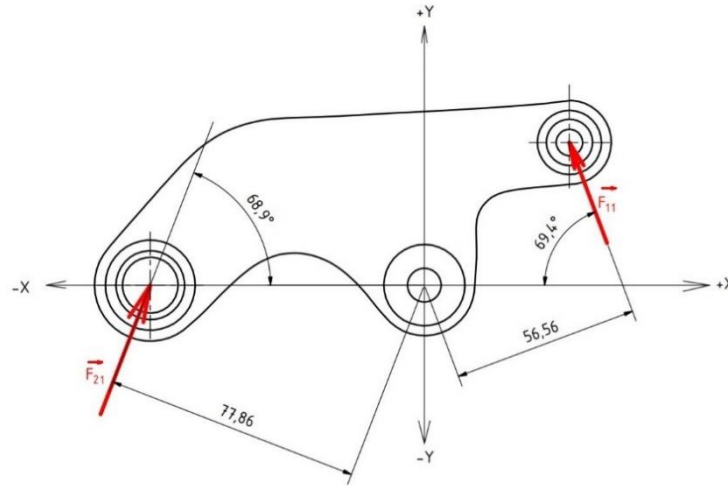


Obr. 4.8 Kinematický model rámu

Premenným parametrom v modeli bola hodnota stlačenia tlmiča, kde po jej nastavení na hodnoty prislúchajúce jednotlivým zaťažovacím stavom (ďalej len ZS) mohli byť odčítané potrebné hľadané parametre.

Prvý zaťažovací stav

Nastáva bezprostredne po nasadnutí jazdca na bicykel. Hodnoty pre tento ZS sú: sila na obe vahadlá $F_{11} = 1557 \text{ N}$, stlačenie tlmiča $\Delta X_I = 17 \text{ mm}$. Druhý index v označení síl vyjadruje zaťažovací stav.



Obr. 4.9 Smery síl v 1. ZS

Pre silu F_{21} z momentovej rovnováhy k stredu SS platí

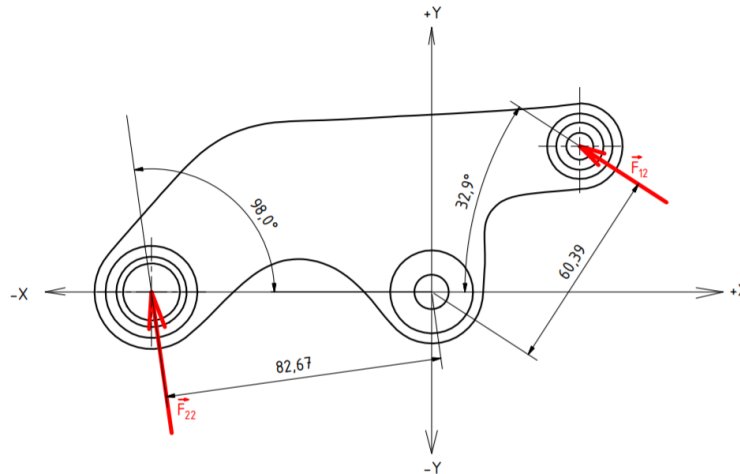
$$F_{21} = \frac{F_{11} \cdot a_1}{b_1} = \frac{1557 \text{ N} \cdot 56,56 \text{ mm}}{77,86 \text{ mm}} = 1131,1 \text{ N} \quad (4.1)$$

kde:

F_{21}	N	-reakčná sila od zadnej časti rámu
F_{11}	N	-sila pôsobiaca od tlmiča
a_1	mm	-rameno sily F_{11}
b_1	mm	-rameno sily F_{21}

Druhý zaťažovací stav

Nastáva pri dynamickej jazde v ťažkom teréne, kedy dosahujú tlmiče častokrát svoje maximum, tj. sú stlačené na maximálny zdvih. Hodnoty pre tento ZS sú: sila na obe vahadlá $F_{12} = 8007 \text{ N}$, stlačenie tlmiča $\Delta X_2 = 57 \text{ mm}$.



Obr. 4.10 Smery síl v 2. ZS

Pre silu F_{22} z momentovej rovnováhy k strediu SS platí:

$$F_{22} = \frac{F_{12} \cdot a_2}{b_2} = \frac{8007 \text{ N} \cdot 60,39 \text{ mm}}{82,67 \text{ mm}} = 5849,1 \text{ N} \quad (4.2)$$

kde:

F_{22}	N	-reakčná sila od zadnej časti rámu
F_{12}	N	-sila pôsobiaca od tlmiča
a_2	mm	-rameno sily F_{12}
b_2	mm	-rameno sily F_{22}

Zhodnotenie ZS

Zo smerov a veľkostí síl vyplýva, že druhý ZS je oveľa viac nepriaznivý, preto sa budú vahadlá optimalizovať len pre tento ZS a vplyv prvého ZS sa overí v napätovo-deformačnej analýze finálnej zostavy vahadiel.

Uloženie vahadiel

Vahadlá sú medzi sebou spojené pomocou skrutkového spoja so závitom M12, ktorý je následne uložený v dvoch ložiskách na ráme bicykla, táto časť slúži ako rotačná podpora. Horné oko tlmiča je pomocou ďalšieho skrutkového spoja veľkosti M8 spojené s prednou časťou vahadiel, toto spojenie zároveň dodáva vahadlám tuhosť v smere osi skrutky. Zadné časti vahadiel sú spojené so zadným rámom pomocou dvoch ložísk a skrutkových spojov.

Uloženie je koncipované tak, aby boli čo najviac minimalizované nežiadúce ohybové momenty od skrutkových spojov pôsobiace na uloženie, resp. na ložiská. Toto tvrdenie podporuje aj fakt, že ložiská použité v predmetných vahadlách sú jednoradové guľôčkové, ktoré neumožňujú naklápanie vnútorného krúžku a sú teda pre takýto druh namáhania nevhodné.

4.1.4 Zjednotenie okrajových podmienok

Pretože skoro každý porovnávaný softvér je od iného výrobcu, medzi vybranými softvéri sú pochopiteľne odlišnosti. Týka sa to hlavne rozdielov v možnostiach definície síl, väzieb a práce s konečno-prvkovou sieťou. Po preskúmaní jednotlivých softvérov bolo potrebné pristúpiť k zjednoteniu nastavení, resp. okrajových podmienok ktoré budú čo najviac zachované počas celého porovnávania.

Zat'azujúce sily

V kapitole 4.1.3 boli riešené veľkosti síl a ich uhly voči SS v oboch zaťažovacích stavoch pôsobiace na obe vahadlá. Niektoré softvéry ale nepodporujú definíciu síl pod uhlom, resp. je takáto definícia zbytočne zložitá a vyžaduje vytvorenie nového súradnicového systému. V MKP softvéroch je viac bežná definícia jednotlivých zložiek síl vzhľadom na SS, ktoré boli vypočítané pomocou základných goniometrických funkcií a podelené dvomi pre získanie sily na jednom vahadle.

Tab. 4.1 Zložky síl oboch ZS

	X (N)	Y (N)
F_{11}	-273,9	728,7
F_{21}	203,6	527,6
F_{12}	-3361,4	2174,6
F_{22}	-406,9	2895,8

Väzby

Uloženie vahadiel v ráme bicykla je možné modelovať ako rotačnú väzbu. Ďalšou uvažovanou väzbou je obecná väzba podpora, ktorá zabráňuje axiálnemu posuvu dier na vahadle.

Takéto uloženie má ale jeden stupeň voľnosti, čo je pre MKP analýzu nevhodné a použitie len týchto väzieb by nemuselo viesť ku konvergencii riešenia kvôli pravdepodobnej numerickej nestabilite výpočtu z dôvodu pohyblivosti telesa.

Prvým riešením k tomuto problému by bolo využiť v nastaveniach solvera príkaz, ktorý výpočet matice tuhosti stabilizuje. Táto možnosť sa ale nachádza len v softvéri Ansys Workbench s názvom tzv. „weak springs“.

Druhým riešením bolo dodať väzbu, ktorá zamedzí pohyb telesa v smere niektorej z nositeľiek síl na koncoch vahadla, pričom v tomto prípade by už nebolo treba uvažovať druhú reakčnú silu, pretože veľkosť tejto sily by sa prejavila ako reakcia v spomínanej väzbe. Pridaním tejto väzby by sme telesu odobrali posledný stupeň voľnosti. Toto riešenie sa ale ukázalo ako problémové z dôvodu potreby tvorby nového SS, ktorého jedna z osí bude rovnobežná s niektorou z nositeľiek síl. Tvorba takéhoto SS a definícia takejto väzby bola opäť možná len v Ansys Workbench pomocou nástroja Remote displacement.

Tretím a finálnym riešením bolo nastaviť rotačnú väzbu tak, že jej bol obmedzený pohyb v tangenciálnom smere, čím z nej v podstate vznikla väzba votknutie. Toto riešenie nie je z hľadiska mechaniky telies ideálne, avšak je to jediný spôsob, ako zachovať jednotné nastavenia okrajových podmienok v každom softvéri a tým reálne porovnať ich výsledky.

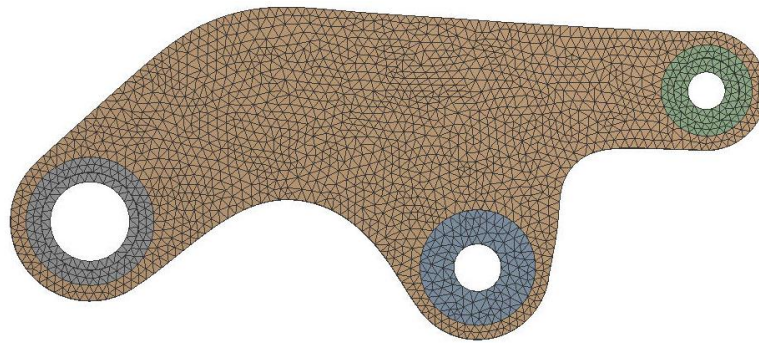


Obr. 4.11 Zjednotené OP, vahadlo zaťažené 2. ZS

Konečno-prvková sieť

Počet elementov úzko súvisí s výsledným tvarom vygenerovaným topologickou optimalizáciou. Snahou preto bolo zvoliť jednotné nastavenie medzi softvérmi tak, aby bol tvar, veľkosť a počet prvkov čo najviac podobný. Zvoleným tvarom elementov bol štvorsten z dôvodu jeho podpory v každom TO softvéri.

Ďalej nasledovalo určenie rozlíšenia, resp. veľkosti siete. Po prvotných testoch v softvéri Ansys Workbench sa dospelo k záveru, že veľkosti elementov menšie ako 2 mm vplyvajú na výsledný tvar len minimálne, pričom sa rapídne predlžuje výpočtový čas. Preto sa rozhodlo zvoliť veľkosť 2 mm ako základ vo všetkých softvéroch.



Obr. 4.12 Náhľad KP siete

Cieľ topologickej optimalizácie

Bola zvolená hodnota úspory materiálu 30% pri maximalizovaní tuhosti. Je treba poznamenať, že táto hodnota sa vzťahuje na hmotnosť, resp. objem obálok vahadiel a nie na pôvodné vahadlá. Keďže sa táto práca primárne venuje porovnaniu jednotlivých TO softvérov, voľba tejto hodnoty nebola podmienená zadaním. Volila sa ale tak, aby výsledné optimalizované vahadlá mali približne rovnakú hmotnosť ako vahadlá pôvodné.

4.2 Topologická optimalizácia vo vybraných softvéroch

4.2

Obecný postup topologickej optimalizácie je možné zhrnúť do týchto bodov:

1. Definovanie objemového modelu obálky (Design region)
2. Definícia okrajových podmienok
3. Nastavenie cieľa topologickej optimalizácie
4. Definícia vylúčených oblastí (Exclusion region)
5. Nastavenie konečno-prvkovej siete
6. Výpočet
7. Export výsledku

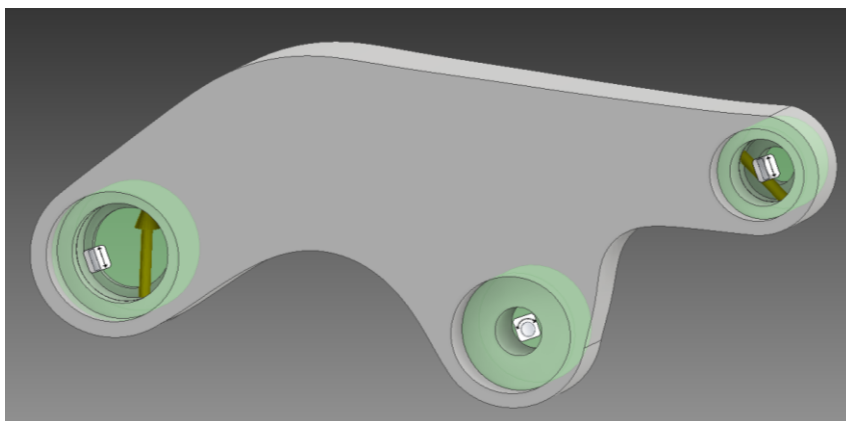
Tento obecný postup bol následne aplikovaný na obe obálky vahadiel, pričom pri niektorých softvéroch nastali mierne odlišnosti v definícii zjednotených OP, ktoré budú spomenuté pri príslušnom softvéri.

4.2.1 Autodesk Inventor 2018

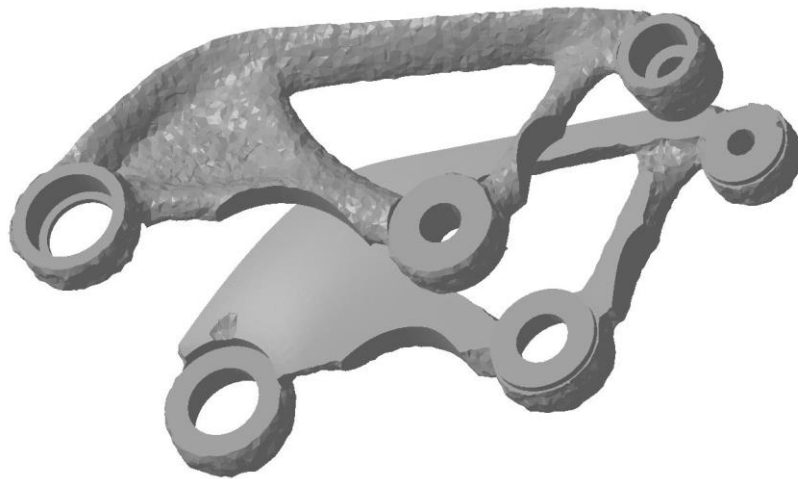
4.2.1

Topologická optimalizácia sa v tomto softvéri nachádza pod záložkou „*Shape generator*“. Odlišnosť od zjednotených OP nastala pri nastavení konečno-prvkovej siete, ktorú bolo možné definovať len ako interval medzi hodnotami 10 a 0.5, kde hodnota 10 odpovedala hrubej sieti, a hodnota 0.5 sieti jemnej. Tieto hodnoty pritom nezodpovedali veľkosti elementu v milimetroch. Po niekoľkých testoch s rôznymi nastaveniami sa dospelo k bezrozmernej hodnote 1, kedy nižšie hodnoty už len pridávali výpočtový čas a optimalizovaný tvar sa menil len minimálne.

Definícia vylúčenia regiónov, resp. „*Exclusion region*“ funguje na princípe označenia plochy obálky, v prípade vahadiel označenia valcovej plochy diery, a jej radiálne a axiálne rozšírenie podľa potreby.



Obr. 4.13 OP v softvéri Inventor

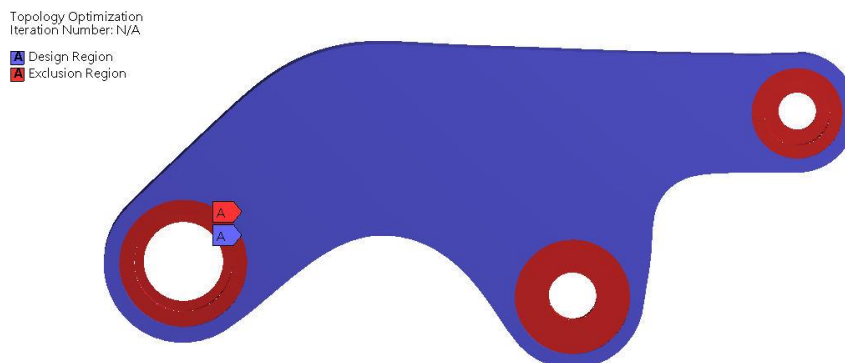


Obr. 4.14 Výsledok TO zo softvéru Inventor

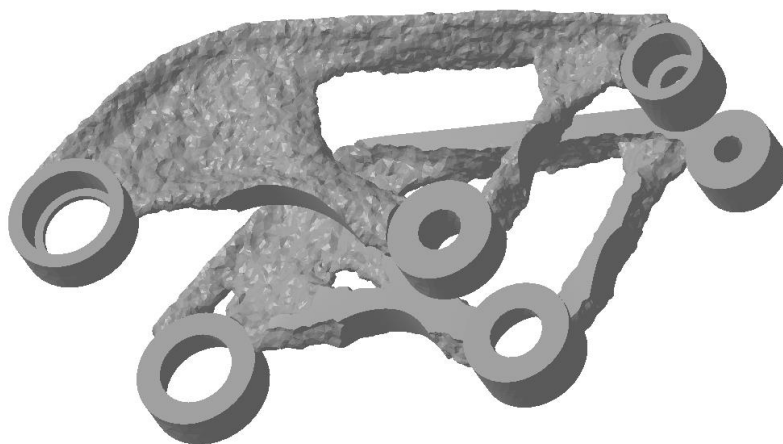
4.2.2 Ansys Workbench 18.1

Workbench je primárne MKP softvér, preto v tomto prípade nebol problém definovať všetky potrebné parametre podľa zjednotených OP. Malým rozdielom bola definícia požadovanej úspory materiálu, ktorá sa v softvéri *Workbench* nevzťahuje na celý objem obálky, ale len na tzv. Design region tj. na objem ktorý je menší o Exclusion region, čo sú prvky, ktoré chceme počas TO zachovať. Aby sa teda zachovala daná úspora materiálu 30%, bolo potreba *Workbench* nastaviť na hodnotu nižšiu. Jednoduchým výpočtom pomocou porovnania objemov bola získaná hodnota 22%. Náhľad nastavenia OP je na obr. 45.

Za zmienku stojí spôsob definície vylúčenia regiónov, resp. Exclusion region, ktorý je odlišný od spôsobu popísaného v softvéri *Autodesk Inventor*. Pred samotným načítaním modelu obálky bolo model potreba upraviť rozdelením na jednotlivé časti. V prípade vahadiel bolo potreba modely obálok rozdeliť na 4 časti, kde sa následne 3 časti predstavujúce funkčné plochy nastavili ako Exclusion region, a jedna časť ako Design region.



Obr. 4.15 Nastavenie vylúčenia regiónov

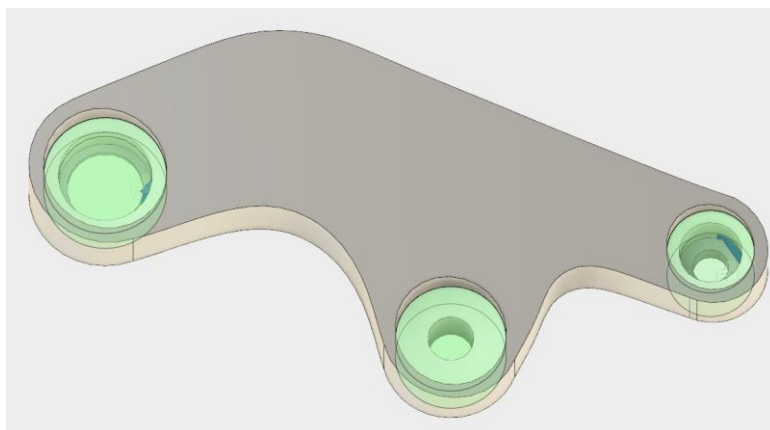


Obr. 4.16 Výsledok TO zo softvéru Workbench

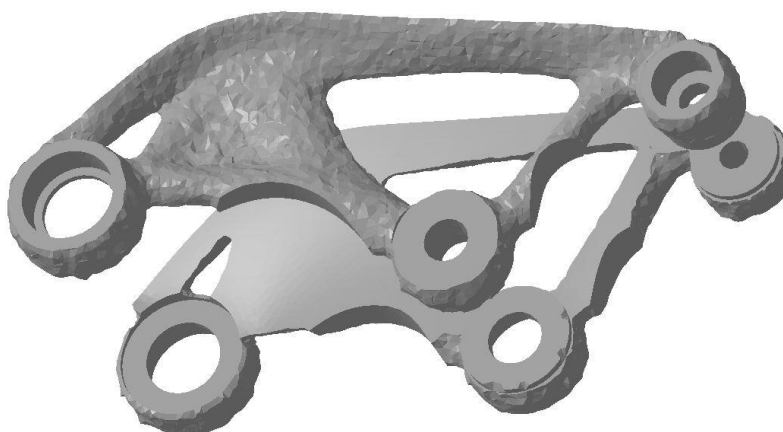
4.2.3 Autodesk Fusion 360

4.2.3

TO v tomto softvéri je pod záložkou „*Shape optimization*“. Nastavenie TO prebehlo bez problémov podľa zjednotených OP. Nastavenie vylúčenia regiónov prebehlo rovnako ako v softvéri *Autodesk Inventor*.



Obr. 4.17 Nastavenie OP v softvéri Fusion 360

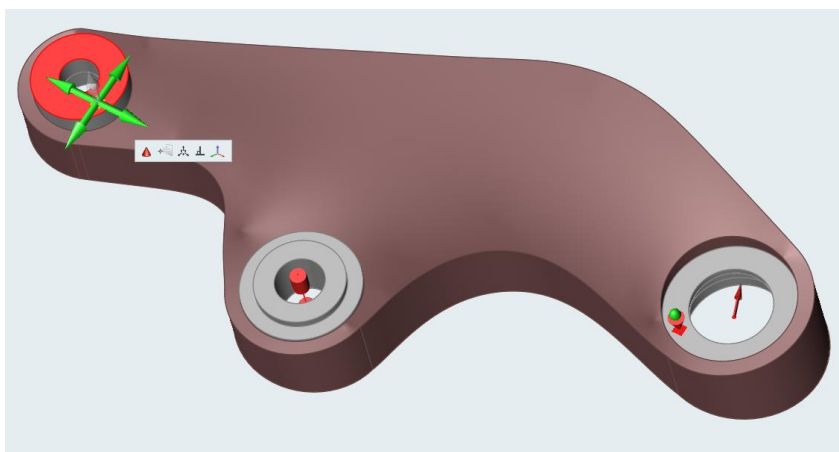


Obr. 4.18 Výsledok TO zo softvéru Fusion 360

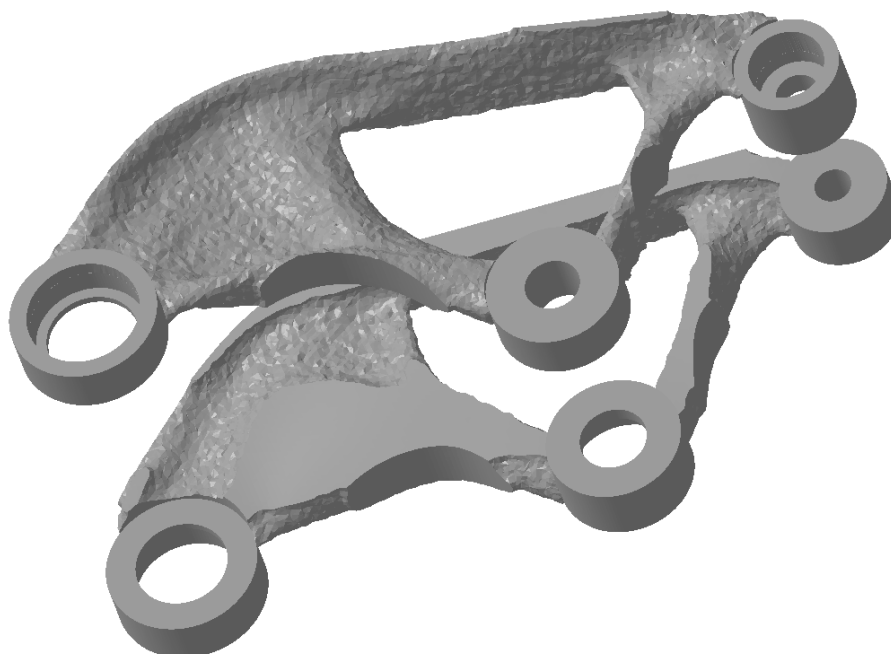
4.2.4 SolidThinking Inspire 2018

Čo sa týka nastavení TO, je tento softvér veľmi podobný softvéru *Ansys Workbench*. Vstupný model musel byť taktiež rozdelený na jednotlivé časti a požadovaná úspora materiálu sa vzťahovala na Design region.

Problém nastal v nastavení veľkosti KP siete, kde *Inspire* nedisponoval žiadnymi nástrojmi na jej kontrolu, po bližšom skúmaní optimalizovaného vahadla sa ale zistilo, že priemerná veľkosť elementov nastavených softvérom pri analýze bola približne 1,2mm, čo môžeme označiť za dostatočnú sieť. Je predpoklad, že *Inspire* nastavuje veľkosť siete automaticky na základe veľkosti vstupného modelu.



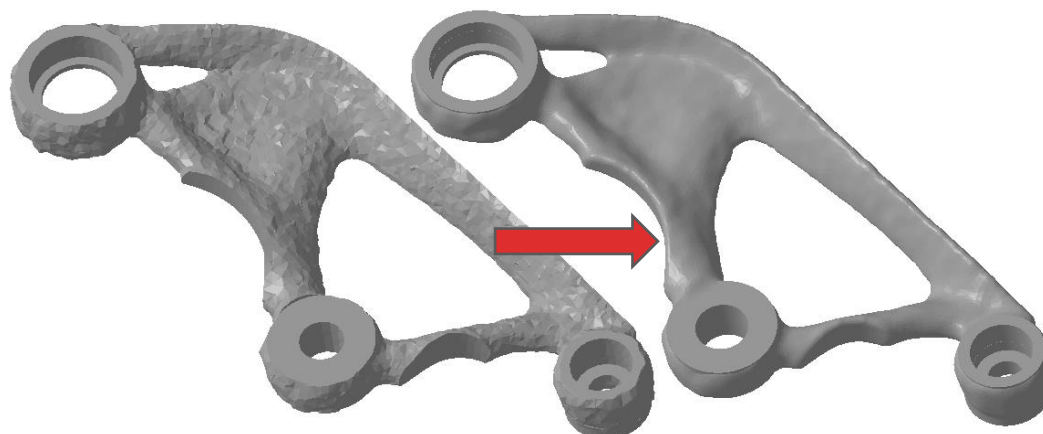
Obr. 4.19 Nastavenie OP v softvéri Inspire



Obr. 4.20 Výsledok TO zo softvéru Inspire

4.3 Prevod výsledkov TO na objemové modely

Všetkých 8 výsledkov z TO bolo v softvéri *Ansys SpaceClaim* podrobených rovnakému postupu, ktorý pozostával z vyhladenia meshu, zníženia počtu polygónov, prevodu na objemový model a z finálneho domodelovania funkčných plôch.



Obr. 4.21 Skonvertovaný objemový model TO vahadiel zo softvéru Fusion 360

4.3.1 Hmotnostné porovnanie

Odmeraním objemu a hmotnosti pôvodného vahadla sa zistilo, že jeho hustota odpovedá hliníkovej zliatine. Preto bol ako materiál objemového modelu nastavený hliník s hustotou $\rho = 2700 \text{ kg.m}^{-3}$.

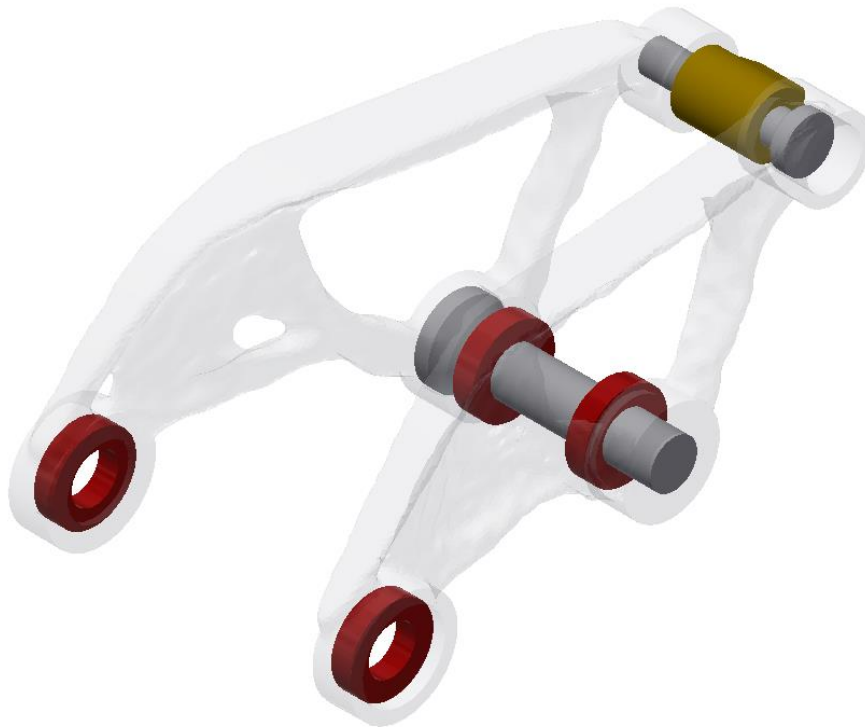
Tab. 4.2 Hmotnosti vahadiel

	Ľavé (g)	Pravé (g)
<i>Inventor</i>	80	77
<i>Workbench</i>	79	79
<i>Fusion 360</i>	82	77
<i>Inspire</i>	83	78
<i>Pôvodné</i>	81	81

4.4 Napät'ovo-deformačná analýza

4.4.1 Výpočtový model

Aby výsledky z napät'ovo-deformačnej analýzy čo najviac odpovedali realite, pristúpilo sa k rozhodnutiu zaťažovať vahadlá ako zostavu. Preto bolo potrebné domodelovať pripojovacie časti vahadiel akými sú napr. skrutky, ložiská, a časť tmiča. Keďže cieľom analýzy bola len kontrola vahadiel, stačilo tieto časti vymodelovať čo najjednoduchšie, čím sa vyhlo prípadným problémom s konvergenciou výsledku a zbytočným kontaktom medzi niektorými telesami.



Obr. 4.22 Zostava do MKP analýzy, žltá – horné oko tmiča, červená – ložiská, sivá - skrutky

4.4.2 Okrajové podmienky a nastavenie analýzy

Kapitola 4.1.4 sa zaoberala trom možným nastaveniam väzieb, ktoré mohli byť použité pri výpočte TO. Vtedy sme ale muselo pristúpiť k zjednodušeniu väzieb, aby bolo možné previesť TO vo všetkých vybraných softvéroch.

Keďže na napät'ovo-deformačnú analýzu všetkých výsledkov z TO bude použitý len softvér *Ansys Workbench*, nie je treba pristupovať k zjednodušeniu OP, pretože *Workbench* umožňuje pokročilé nastavenie OP, dostatočné pre vierohodnú analýzu.

Materiál telies

V jednotlivých skúmaných zostavách je 9 komponentov, 2 vahadlá, 2 skrutky, 4 ložiská a horná časť tlmiča. Týmto telesám bol priradený materiál z tabuľky 5.

Materiál	Youngov modul (GPa)	Medza kĺzu (MPa)	Poissnovo číslo (-)	Použitie
AlSi10Mg	68	240	0,33	vahadlá, skrutky
Structural Steel	210	250	0,3	ložiská

Tab. 4.3 Použitý materiál v MKP analýze

Voľbe materiálu vahadiel predchádzala rozvaha o tom, že na pôvodných vahadlách bol použitý neznámy druh hliníkovej zliatiny, a že materiál bežne spracúvaný na SLM stroji na *Ústave konštruovania* je AlSi10Mg.

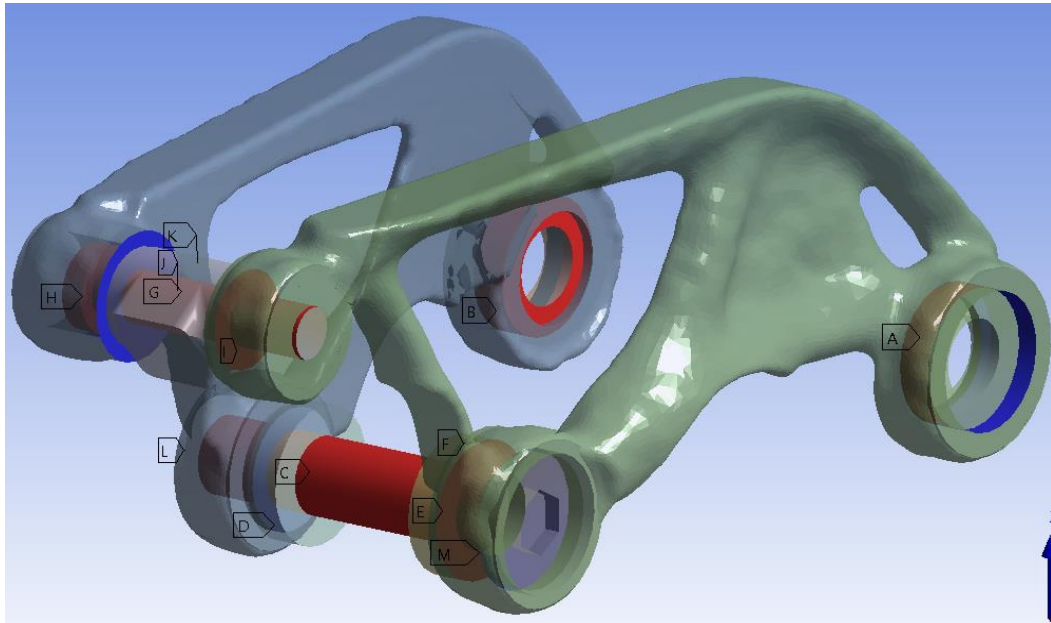
Keďže v MKP analýze skrutky a ložiská vyhodnocované neboli a presné materiálové charakteristiky ložísk a skrutiek neboli známe, ich materiál sa volil obecné len vzhľadom na základný druh materiálu, z ktorého boli vyrobené. Cieľom tejto voľby bolo hlavne postihnúť deformačné charakteristiky daných súčastí, ktoré sú závislé na obecných charakteristikách hliníkových zliatin, resp. konštrukčných ocelí, boli to: *Youngov modul* a *Poissnovo číslo*, hodnota medze kĺzu v tomto prípade nebola dôležitá, pretože skrutky a ložiská neboli kontrolované na medzný stav pružnosti.

Kontakty

Po importe zostavy vahadiel do softvéru bolo potrebné nastaviť kontakty medzi telesami. V zostave sa nachádza 13 kontaktov zobrazených na obr. 4.23:

1. A, B sú kontakty *bonded* a predstavujú nalisované ložiská vo vahadlách.
2. C, E sú kontakty *frictionless* a predstavujú otáčanie skrutky M12 v ložiskách.
3. D, F sú kontakty *frictionless* a predstavujú styk čela vahadla a vnútorného krúžku ložísk.
4. G je kontakt *frictionless* a predstavuje otáčanie skrutky M8 v ložisku horného oka tlmiča.
5. H,I je kontakt *frictionless* a predstavuje styk čiel vahadiel a vnútorného krúžku ložiska.
6. J je kontakt *rough* a predstavuje styk hlavy M8 skrutky s vnútorným zahĺbením v pravom vahadle.
7. K, L sú kontakty *bonded* a predstavujú závitové spoje M8, resp. M12.
8. M je kontakt *bonded* a predstavuje styk kužeľovej diery a skrutky M12 s kužeľovou hlavou.

Kontakty D,F,H,I sú modelované zjednodušene bez vnútorného krúžku ložiska a predpokladá sa, že sa vnútorný krúžok otáča spolu s vahadlom. V kontakte M sa predpokladá predpätie skrutky M12 dostatočne veľké tak, že vzájomný pohyb ľavého vahadla a skrutky bude nulový.



Obr. 4.23 Nastavenie kontaktov

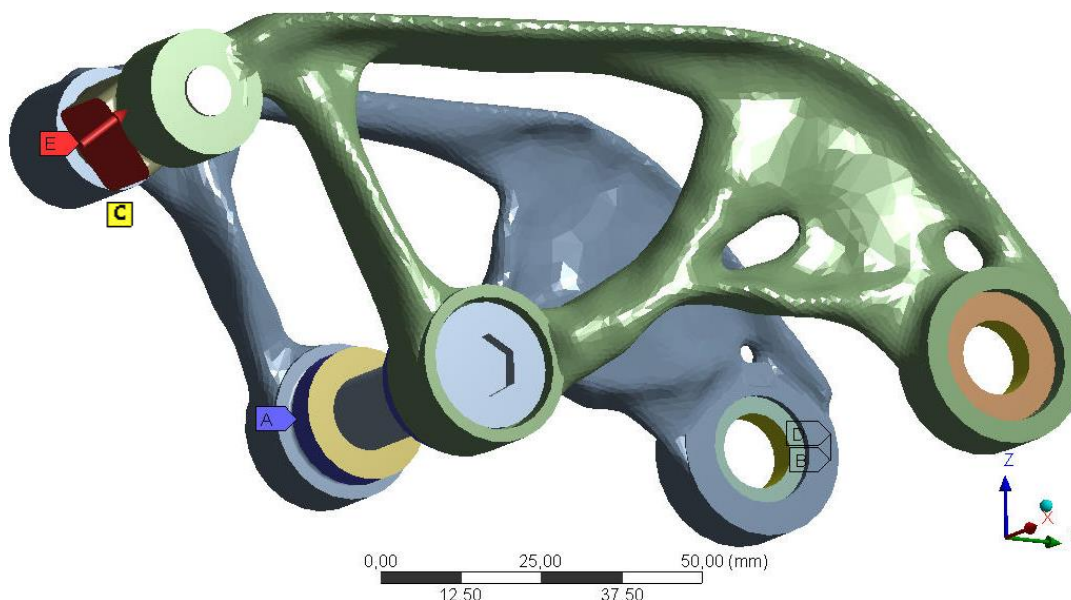
Väzby a zaťaženie

Sila F_{12} bola definovaná na horné oko tlmiča, pričom samotná pozícia a natočenie horného oka tlmiča boli už pri tvorbe zostavy nastavené tak, aby súhlasili s nositeľkou tejto sily vyjadrenou v kap. 4.1.3.

Na vonkajšie krúžky ložísk, v ktorých je uložená skrutka M12 s kužeľovou hlavou, bola použitá väzba votknutie, ktorá simuluje uloženie týchto ložísk v ráme bicykla. Na horné oka tlmiča bola z dôvodu nestability riešenia definovaná väzba *Remote displacement* s nastavením ktoré umožňuje posunutie len v smere nositeľky sily F_{12} .

Na zadné ložiská boli definovali väzby B, D typu *Remote displacement*, pre ktoré bol definovaný nový súradnicový systém tak, že jedna z jeho hlavných osí bola rovnobežná s nositeľkou sily F_{22} , následne bolo pre tento smer nastavené nulové posunutie, ktoré simuluje reakciu od zadnej časti rámu. Súčasne s tým boli na rovnaké plochy nastavené nulové posunutia v smere osi týchto dier a nulové natočenia okolo osí Y a Z globálneho SS, ktoré zabraňujú nereálnym natočeniam a posunutiam koncov vahadiel, v skutočnosti týmto natočeniam zabraňuje zadný rám bicykla.

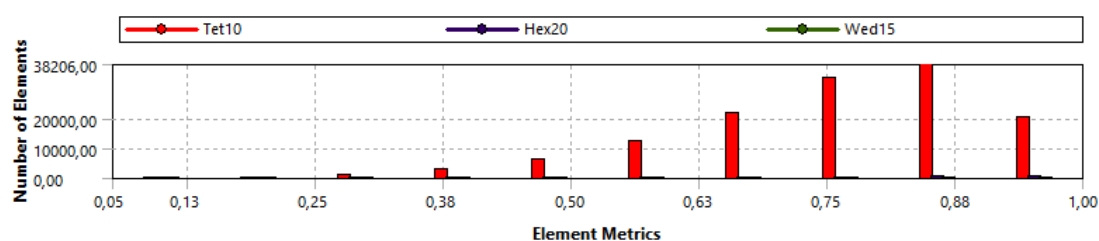
- A** Fixed Support, votknutie na vonk. kruzkoch lozisk
- B** Remote Displacement, nulovy posun v smere nositelky F2
- C** Remote Displacement, tuhost od tlmica
- D** Remote Displacement, nulovy posun v smere nositelky F2 2
- E** Force: 8007, N



Obr. 4.24 Nastavenie OP v MKP analýze zostavy vahadiel

Konečno-prvková sieť a nastavenie analýzy

Bol zvolený adaptívny štýl generovania meshu a agresívna kontrola tvaru prvkov. Následne bolo využité nastavenie *Body sizing*, kde bola definovaná jednotná veľkosť elementu 2 mm pre všetky telesá. Kvalita takto vygenerovaného meshu bola overená pomocou nástroja *Mesh metrics*, ktorý jednotlivým prvkom priradzuje hodnotu od 0 do 1, kde hodnota 1 je ideálny element, a hodnota 0 je nepoužiteľný element. Obecne sa odporúča, aby väčšina prvkov ležala za hranicou 0,5, čo bolo v tomto prípade splnené, a KP sieť je možné označiť ako dostatočnú s predpokladom výsledkov s dobrou presnosťou [33].



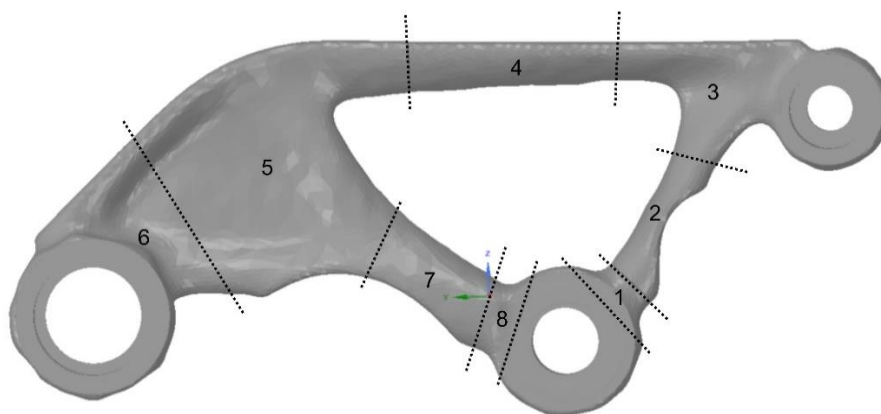
Obr. 4.25 Kvalita KP siete v nástroji Mesh metrics

Ďalším použitým nastavením bolo *Automatic mesh based defeaturing* nastavené na hodnotu 0,5 mm, ktoré automaticky ignoruje geometrické prvky menšie ako nastavená hodnota, týmto nastavením bola eliminovaná väčšina potenciálnych vrubov spôsobených chybnou geometriou, ktorý vznikla pri konverzii modelu [34]. Pre overenie správnosti výsledkov bolo využité 10% konvergenčné kritérium pre deformáciu vahadiel.

4.4.3 Výsledky napät'ovo-deformačnej analýzy

Napät'ovo-deformačnej analýze popísanej v predošlej kapitole boli podrobené všetky 4 zostavy vahadiel z jednotlivých TO softvérov.. Hlavnými sledovanými parametrami boli:

1. maximálne redukované napätie, ktoré sa sledovalo v ôsmich predom definovaných podoblastiach vahadiel
2. celková maximálna deformácia oboch vahadiel



Obr. 4.26 Vahadlá rozdelené na podoblasti

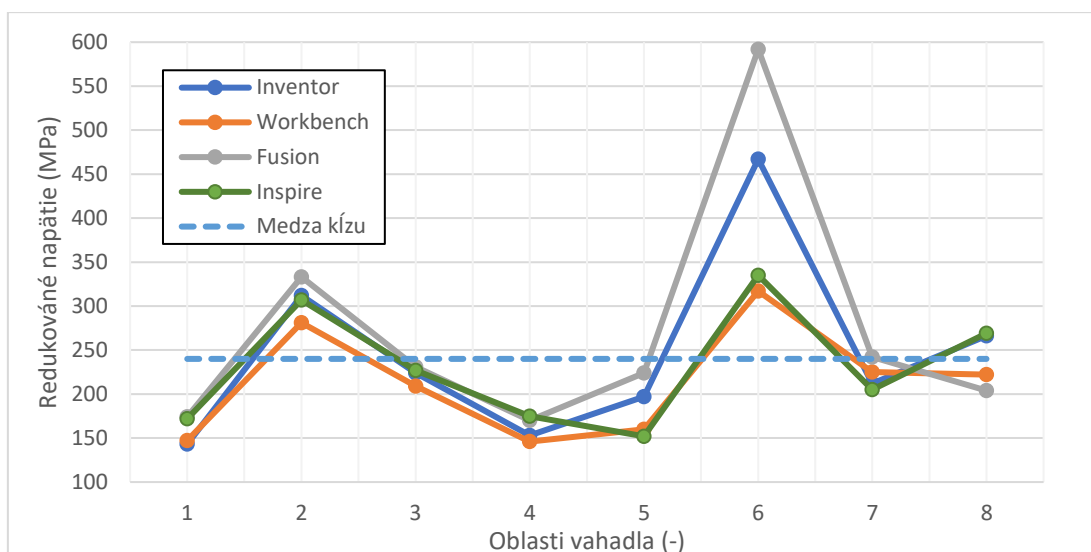
Pre účely porovnania boli rovnakej analýze podrobené aj pôvodné vahadlá.

Napätia podoblastí a deformácia vahadiel zo skúmaných TO softvérov sú v tabuľke 6. Hodnoty redukovaných napätí vyznačené červenou farbou indikujú prekročenie medze klúzu, ktorej hodnota je 240 MPa.

		1	2	3	4	5	6	7	8	Max.	Deform.
		Redukované napätie (MPa)									(mm)
Inventor	Ľavé	143	283	205	145	197	419	212	266	467	0,612
	Pravé	136	312	224	153	197	467	192	200		
Workbench	Ľavé	147	281	202	143	160	317	225	222	317	0,554
	Pravé	127	263	209	146	127	271	209	164		
Fusion	Ľavé	174	269	181	142	224	592	193	204	592	0,612
	Pravé	167	333	231	170	188	397	242	194		
Inspire	Ľavé	172	277	219	150	152	335	205	269	335	0,592
	Pravé	147	307	227	175	128	310	189	201		
Pôvodné vahadlá		-	-	-	-	-	-	-	-	266	0,736

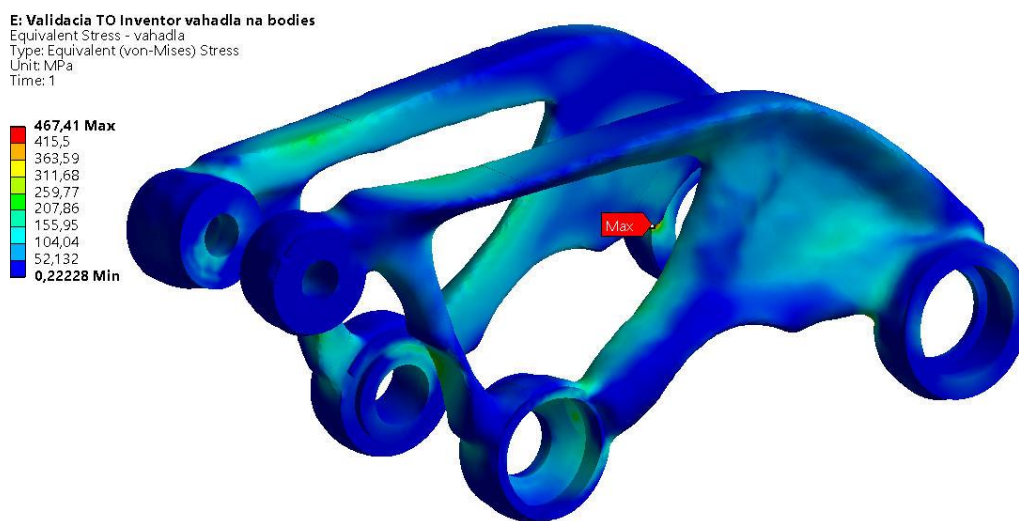
Tab. 4.4 Redukované napätia v podoblastiach vahadiel

Obr. 4.27 zobrazuje grafický priebeh redukovaných napätí cez všetky podoblasti, pričom hodnoty jednotlivých bodov sú maximom z dvojice napätí ľavého alebo pravého vahadla príslušného TO softvéru.



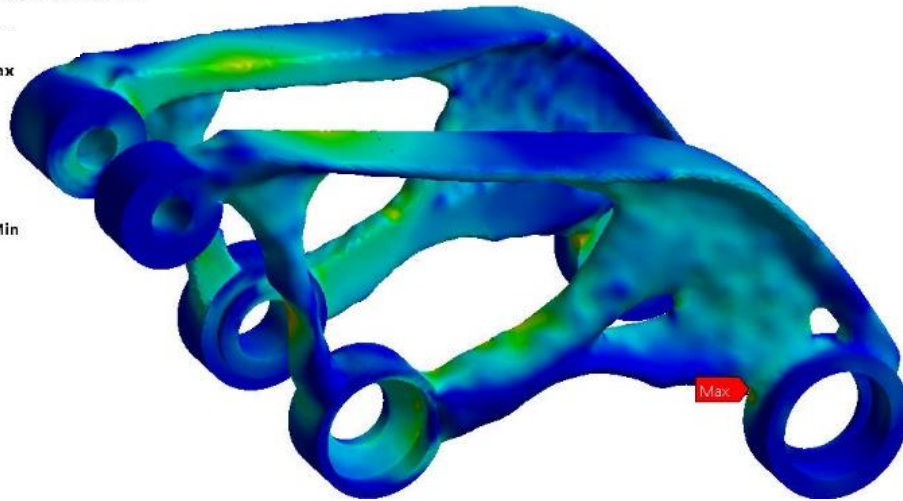
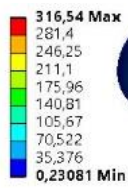
Obr. 4.27 Graf závislosti napätí v jednotlivých softvéroch na podoblastiach vahadiel

Grafické výstupy z napät'ovo-deformačnej analýzy



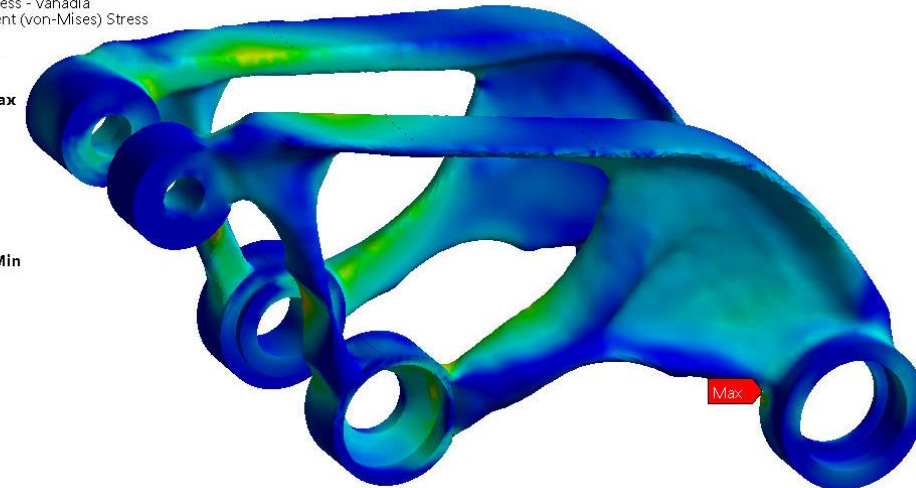
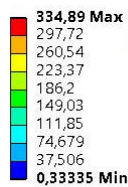
Obr. 4.28 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Inventor

K: Validacia TO Workbench vahadla na bodies
 Equivalent Stress 17
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1



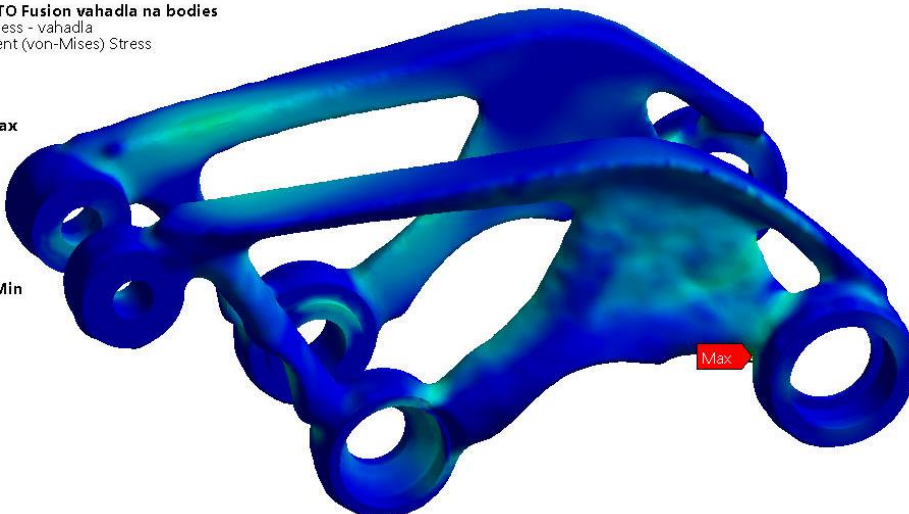
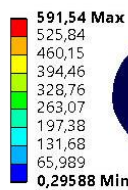
Obr. 4.29 Redukované napätie v TO vahadlách zo Workbench

G: Validacia TO Inspire vahadla na bodies
 Equivalent Stress - vahadla
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1



Obr. 4.30 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Inspire

F: Validacia TO Fusion vahadla na bodies
 Equivalent Stress - vahadla
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

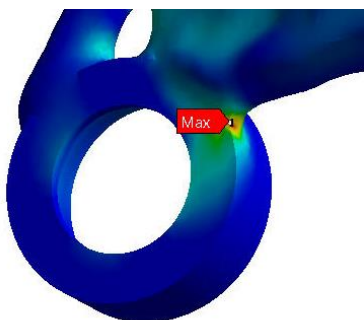


Obr. 4.31 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Fusion 360

4.4.4 Zhodnotenie napät'ovo-deformačnej analýzy

4.4.4

Z porovnania výsledkov analýzy vyplýva, že všetky štyri zostavy vahadiel majú rovnaké miesto najvyššieho napätia, ktorým je podoblasť č. 6, presnejšie napojenie tela vahadla na funkčnú plochu uloženia ložiska. Rovnako je táto podoblasť miestom, kde je možné pozorovať najvyššie rozdiely medzi jednotlivými TO softvérmi, najväčší vzájomný rozdiel v tejto oblasti dosahujú softvéry *Autodesk Fusion 360* s redukovaným napätím 592 MPa a softvér *Ansys Workbench* s redukovaným napätím 317 MPa.



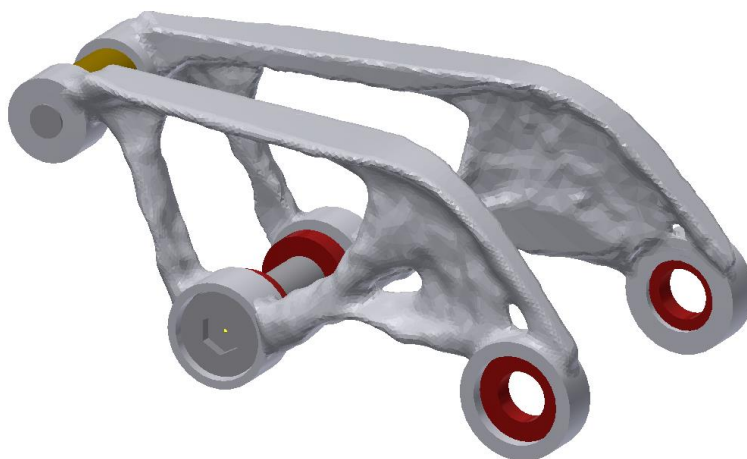
Obr. 4.32 Miesto maximálneho napätia

Porovnaním veľkostí napätí z MKP analýzy voči medzi kľúzu bolo zistené, že všetky vahadlá z hľadiska medzného stavu pružnosti nevyhovujú. Po preskúmaní výsledkov celkových deformácií je možné konštatovať, že ich veľkosť nie je tak veľká aby ovplyvnila samotnú funkčnosť vahadiel. Tieto hodnoty deformácií je ale potreba brať s rezervou, keďže napätia vo vahadlách sú už mimo oblasť pružnej deformácie materiálu, čo vedie na nelineárne riešenie úlohy s nastavením nelineárneho materiálu, ktorý v tejto analýze nebol uvažovaný. Pre účely vzájomného porovnania deformácií ale je možné lineárny materiál brať ako dostatočný.

4.5 Výber najlepšieho variantu

4.5

Z predošlej kapitoly jednoznačne vyplýva, že najlepšie výsledky vzhľadom na redukované napätia a deformácie majú optimalizované vahadlá zo softvéru *Ansys Workbench*.

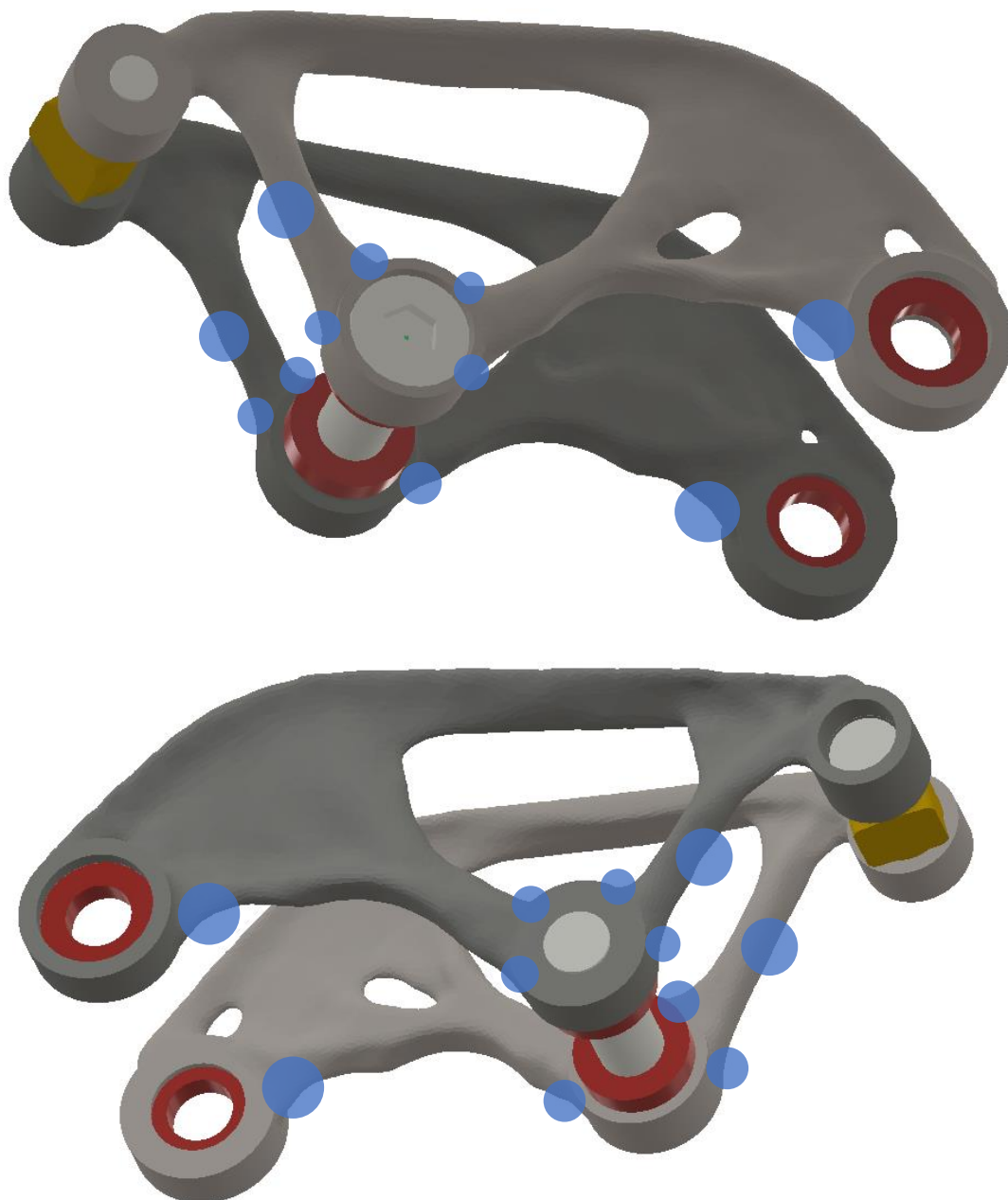


Obr. 4.33 Zostava vahadiel najlepšieho variantu

5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

5.1 Dodatočné úpravy najlepšieho variantu

Prebehli v softvéri Autodesk Meshmixer. V miestach najvyšších napätí bol v niekoľkých iteráciách pridávaný materiál a zároveň sa sledovalo čo najhladšie napojenie funkčných plôch na samotný tvar vahadiel.



Obr. 5.1 Upravený najlepší variant vahadiel, modré oblasti – pridaný materiál

5.2 Napät'ovo-deformačná analýza finálnych vahadiel

Dodatočne upravené vahadlá boli znova podrobené napät'ovo deformačnej analýze, avšak už pre oba zaťažujúce stavy spomenuté v kapitole 4.1.3, s cieľom zistiť bezpečnosti voči možným medzným stavom. Mimo uvažovaný medzný stav pružnosti bola do analýzy pridaná aj kontrola na medzný stav vzpernej stability, ktorý by sa mohol prejaviť v podoblasti č. 4 zobrazenej na obr. 60. Táto podoblasť je pomerne štíhla a tvarovo pripomína prut.

5.2.1 Napät'ovo-deformačná analýza pre 1. ZS

MS pružnosti (MSP)

Nastáva, keď napätie dosiahne hodnotu medze klzu materiálu. Výsledkom analýzy je maximálne redukované napätie 124 MPa. Deformácia vahadiel dosahuje hodnotu 0,196 mm.

Pre bezpečnosť voči MSP pre 1. ZS platí:

$$k_{MSP1} = \frac{Re}{\sigma_{red1}} = \frac{240 \text{ MPa}}{124 \text{ MPa}} = 1,94 \quad (5.1)$$

kde:

k_{MSP1} - bezpečnosť voči MSP pre 1. ZS

Re MPa -medza klzu materiálu vahadiel

σ_{red1} MPa -maximálne redukované napätie v 1. ZS

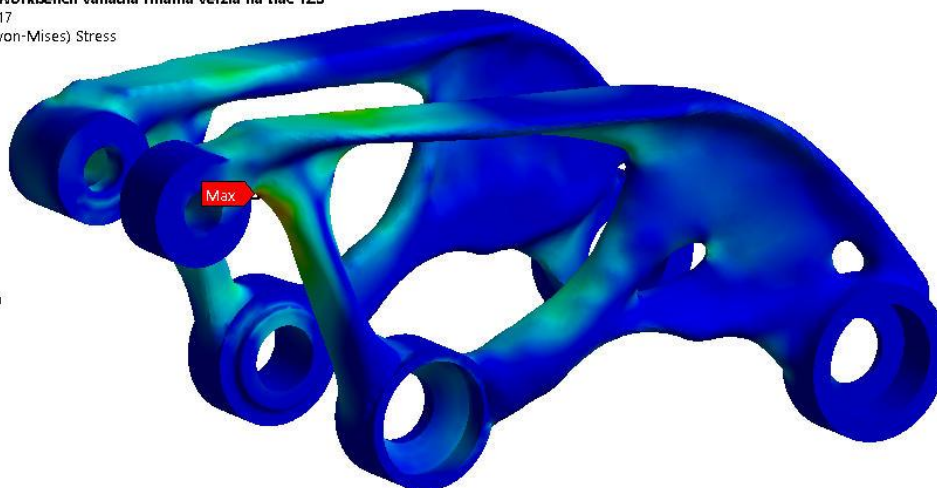
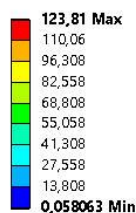
M: Validacia TO Workbench vahadla finalna verzia na tlac 1ZS

Equivalent Stress 17

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1



Obr. 5.2 Redukované napätie pre 1. ZS finálnych vahadiel

MS vzpernej stability (MSVS)

Nastáva, keď zaťažujúca sila dosiahne hodnotu kritickej sily. Z analýzy vyplýva, že hodnota kritickej sily je približne 91 kN.

Pre bezpečnosť voči MSVS pre 1. ZS platí:

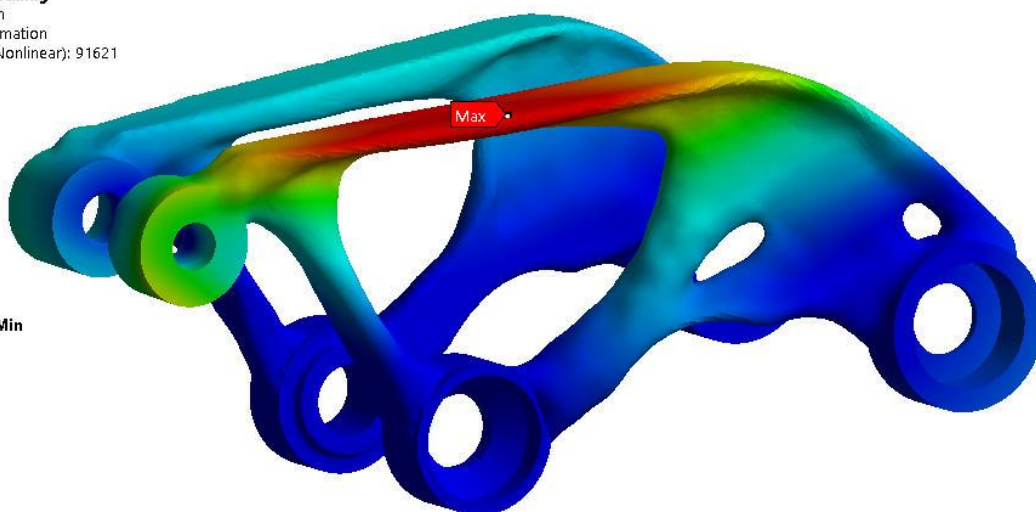
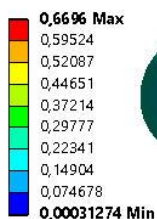
$$k_{MSVS1} = \frac{F_{krit1}}{F_{11}} = \frac{91621 \text{ N}}{1557 \text{ N}} = 58,84 \quad (5.2)$$

kde:

- k_{MSVS1} - -bezpečnosť voči MSVS pre 1. ZS
- F_{krit1} N -kritická sila pre 1. ZS získaná z analýzy
- F_{11} N -silá pôsobiaca od tlmiča z 1. ZS

N: Eigenvalue Buckling

Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 91621
Unit: mm
14.5.2018 15:49



Obr. 5.3 Analýza MSVS pre 2. ZS

5.2.2 Napät'ovo-deformačná analýza pre 2. ZS

MS pružnosti (MSP)

Výsledkom analýzy je redukované napätie 204 MPa. Totálna deformácia vahadiel dosahuje hodnotu 0,536 mm.

Pre bezpečnosť voči MSP pre 2. ZS platí:

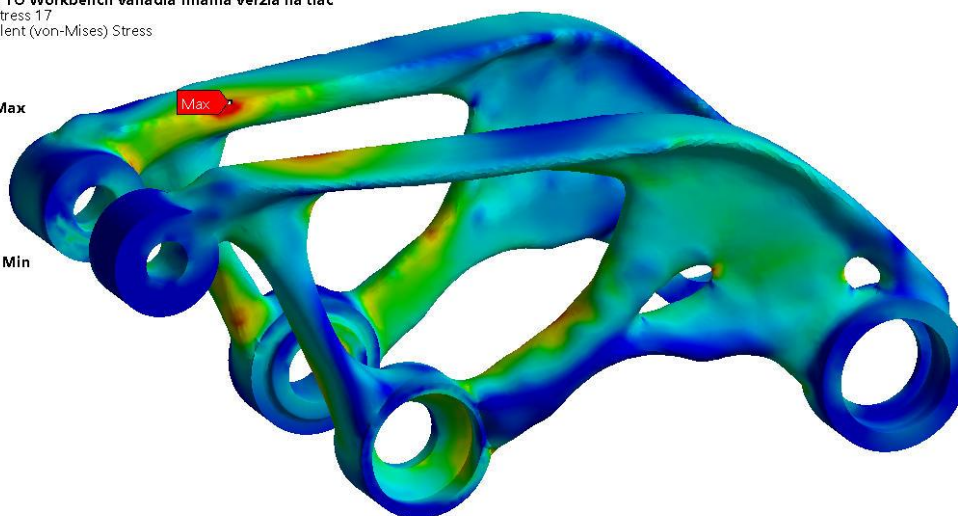
$$k_{MSP2} = \frac{Re}{\sigma_{red2}} = \frac{240 \text{ MPa}}{204 \text{ MPa}} = 1,18 \quad (5.3)$$

kde:

- k_{MSP2} - -bezpečnosť voči MSP pre 2. ZS
- Re MPa -medza kĺzu materiálu vahadiel
- σ_{red2} MPa maximálne redukované napätie v 2. ZS

L: Validacia TO Workbench vahadla finalna verzia na tlac
 Equivalent Stress 17
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

203,68 Max
 181,08
 158,47
 135,87
 113,26
 90,661
 68,057
 45,453
 22,849
 0,24541 Min



Obr. 5.4 Redukované napätie pre 2. ZS finálnych vahadiel

MS vzpernej stability (MSVS)

Z analýzy vyplýva, že hodnota kritickej sily je približne 190 kN. Pre bezpečnosť voči MSVS pre 2. ZS platí:

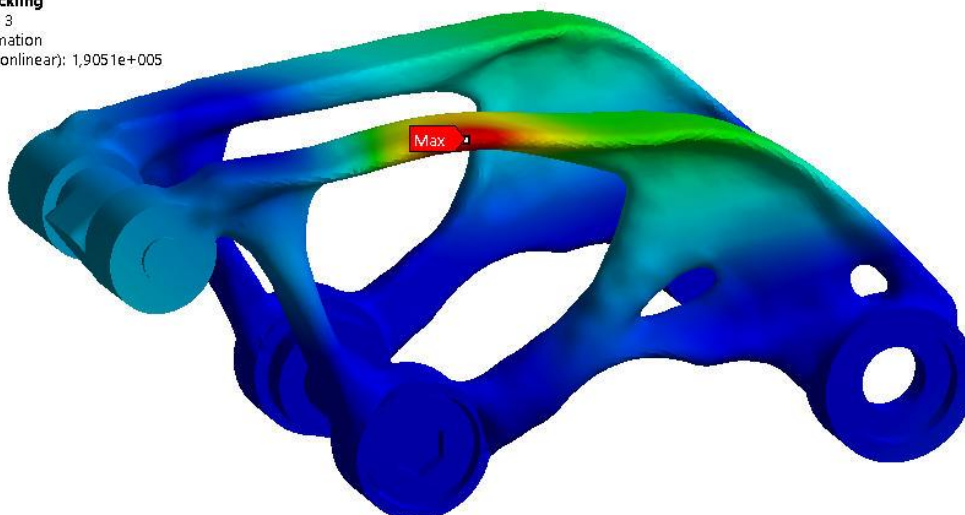
$$k_{MSVS2} = \frac{F_{krit2}}{F_{12}} = \frac{190\,510\,N}{8007\,N} = 23,79 \quad (5.4)$$

kde:

- k_{MSVS2} - -bezpečnosť voči MSVS pre 2. ZS
- F_{krit2} N -kritická sila pre 2. ZS získaná z analýzy
- F_{12} N -silá pôsobiaca od tmiča z 2. ZS

N: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation 3
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1,9051e+005
 Unit: mm

1,0787 Max
 0,95888
 0,83902
 0,71916
 0,5993
 0,47944
 0,35958
 0,23972
 0,11986
 0 Min



Obr. 5.5 Analýza MSVS pre 2. ZS

6 DISKUSIA

Úvod práce bol venovaný základnému predstaveniu ôsmych TO softvérov, pre ktoré boli následne definované porovnávacie kritéria na zistenie komplexnosti a vhodnosti softvérov pre optimalizáciu predmetných vahadiel. Analýzou softvérov sa zistilo, že nie všetky softvéry boli pre účely bakalárskej práce vhodné. Preto bolo predbežne zvolených 5 softvérov, ktoré vykazovali všetky potrebné kritéria pre úspešnú TO vahadiel.

Menovite to boli: *Inventor*, *Fusion 360*, *Inspire*, *Workbench* a *Z88Arion*. Posledný menovaný softvér bol ale z porovnania vyradený aj keď sa spočiatku javil ako konkurent komerčným softvérom, pretože poskytoval obsiahle možnosti nastavení, bol ale veľmi nestabilný čo sa týka behu softvéru, kde po importovaní modelu obálky a nasieťovaní softvér zhavaroval. Táto chyba sa ale prejavovala len s modelmi obálok vahadiel, ktoré sú pomerne zložitého tvaru. Čo sa týka zvyšku softvérov, dôvody pre ich vyradenie z porovnania boli rôzne. Avšak najväčšou slabinou boli nedostatočné možnosti definície okrajových podmienok a nemožnosť definovať vylúčený región.

Pre definíciu zaťažujúcich stavov, resp. pôsobiacich síl a ich nositeliek bol pomocou fyzických meraní a nákresov od výrobcu zostavený kinematický 3D model rámu bicykla. Tento spôsob ale nebol ideálny z dôvodu možných odchýliek spôsobených nesprávnym meraním, resp. málo presnými nákresemi od výrobcu. Presnejšej zhody by sa dosiahlo optickou digitalizáciou celého rámu bicykla a nie len digitalizáciou vahadiel. Dá sa ale konštatovať, že pre účely porovnania softvérov sú takto získané hodnoty dostatočné.

Ďalej nasledovala definícia väzieb, ktorá sa ukázala ako problematická, pretože nie všetky TO softvéry poskytovali rovnaké nastavenia. Ideálnym prístupom by bolo použiť rotačnú väzbu s 1 stupňom voľnosti a následne zamedziť pohyb vahadla v smere jednej z jeho nositeliek, ktorý bude predstavovať reakciu od rámu. Takéto nastavenie OP ale bolo možné len v softvéri *Workbench*, preto sa pristúpilo k zjednodušeniu OP, kde bol rotačnej väzbe zamedzený pohyb v tangenciálnom smere, t.j. jej bol odobraný posledný stupeň voľnosti. Tento spôsob definície už bol možný v každom vybranom softvéri. Nasledovalo overenie takto nastavených väzieb s ideálnym prístupom z *Workbenchu*, ktoré vykazovalo dobrú zhodu výsledných modelov z TO. Ďalším použitým zjednodušením bola optimalizácia len pre 2. ZS, ktorý je viac nepriaznivý. Takéto rozhodnutie padlo z dôvodu zachovať OP rovnaké pri každom porovnávanom softvéri a tým ich reálne porovnať. Po nastavení všetkých potrebných parametrov do každého porovnávaného softvéru nasledovala samotná TO a následný export ôsmich výsledkov TO vahadiel.

Po prevode výsledkov TO na objemové modely sa mohlo pristúpiť k MKP analýze koncepčných variantov. Prebiehala v softvéri *Workbench*. Hlavnými vyhodnocovanými parametrami boli redukované napätia v 8 podoblastiach a deformácia vahadiel. Ukázalo sa, že ani jeden koncepčný variant nevyhovuje MSP. Najnižšie redukované napätia a deformácie vykazovali vahadlá zo softvéru *Workbench* s max. hodnotami 317 MPa a 0,554 mm.

Keďže z koncepčného riešenia vyšli najlepšie optimalizované vahadlá zo softvéru *Workbench*, padlo rozhodnutie tieto vahadlá ďalej modifikovať tak, aby vyhoveli z hľadiska medzných stavov. Na základe MKP analýzy koncepčných variantov bol do miest s najvyšším napätím pridaný materiál a vahadlá boli znova podrobené MKP analýze avšak už pre oba zaťažujúce stavy.

Výsledkom sú bezpečnosti voči MSP pre 1. ZS (menej nepriaznivý) 1,94 a pre 2. ZS (viac nepriaznivý) 1,18. Je vidieť že bezpečnosť voči MSP 1. a 2. ZS sú odlišné. Tento rozdiel je možné prisúdiť faktu, že vahadlá boli optimalizované len pre 2. ZS. Ak by sa teda vahadlá optimalizovali pre oba ZS, bezpečnosti by boli veľmi podobné.

Tab. 6.1 Výsledky TO vahadiel v porovnaní s pôvodnými vahadlami pre viac nepriaznivý ZS

	Red. napätie (MPa)	Bezpečnosť voči MSP (-)	Deformácia (mm)	Hmotnosť oboch vahadiel (g)
TO vahadlá	204	1,18	0,536	158
Pôvodné vahadlá	266	-	0,736	162

Z tabuľky je možné pozorovať zníženie deformácie TO vahadiel o 27% za súčasného mierneho zníženia hmotnosti voči pôvodným vahadlám.

Čo sa týka užívateľského prostredia v porovnávaných softvéroch, ako najviac intuitívny, resp. najjednoduchší z hľadiska samotného ovládania sa javil softvér *Fusion 360*. Za ním nasledovali softvéry *Inventor*, *Inspire* a *Workbench*, ktorý bol zo všetkých porovnávaných softvérov na ovládanie najzložitejší. Zložitosť *Workbenchu* ale samozrejme súvisí s jeho komplexnosťou a možnosťami prevádzať najrôznejšie analýzy, definovať pokročilé OP a podobne.

7 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce bolo porovnať vybrané softvéry pre TO na jednotnom komponente z horského bicykla. Prvá časť práce obsahovala rešerš samotnej TO a niekoľkých softvérov pre TO. Ďalej nasledoval stručný úvod do aditívnych technológií a optickej digitalizácie. Po následnej analýze daného problému boli vybrané 4 softvéry do porovnania. Ďalším krokom bola optická digitalizácia vahadiel horského bicykla s cieľom vymodelovať obálku pre TO pomocou metód reverzného inžinierstva. Samotnej optimalizácii v 4 vybraných softvéroch predchádzala definícia okrajových podmienok a zaťažovacích stavov.

Po TO boli koncepčné riešenia prekonvertované na objemový model, aby mohli byť následne validované v MKP analýze, ktorej výsledkom bolo, že ani jedno riešenie nevyhovuje z hľadiska MSP. Z toho sa dá vyvodiť, že TO nie je konečný proces, a jeho výstupom obvykle nebýva finálny tvar komponentu, ale len určitá koncepcia tvaru. Po MKP analýze táto koncepcia ale poskytne cenné informácie, použiteľné pri tvorbe finálneho konštrukčného návrhu, ktorý bude dosahovať požadované hodnoty bezpečností.

Ako najlepší softvér z hľadiska výsledkov napätí a deformácií po TO sa ukázal byť *Ansys Workbench*, kde po modifikácií jeho koncepčných výsledkov prebehla znova MKP analýza s pozitívnym výsledkom. Bola získaná bezpečnosť voči MSP s hodnotou 1,18. Keďže ale medza klízu materiálu pôvodných vahadiel nebola známa, nie je možné získať bezpečnosť vzájomne porovnať s pôvodnými vahadlami. Dá sa ale konštatovať, že táto bezpečnosť TO vahadiel je dostačujúca na ich správnu funkciu aj v prípade mierneho prekročenia zadanej zaťažovacej sily. Bolo by ale otázne, či by vahadlá v priebehu svojej životnosti nevykazovali iné MS, napríklad únavu materiálu z dôvodu relatívne nízkej dosiahnutej hodnoty bezpečnosti. Riešením otázky únavy by ale mohlo byť napríklad zaradenie častejších servisných intervalov počas životnosti výroby.

Porovnaním deformácie TO vahadiel a pôvodných vahadiel sa dosiahlo jej zníženie o 27% voči vahadlám pôvodným. Toto zistenie indikuje, že použitím TO bola zvýšená tuhosť komponentu pri miernom znížení hmotnosti.

Voľba *Workbenchu* ako najlepšieho softvéru nedokazuje, že koncepčné varianty z ostatných TO softvérov by boli nepoužiteľné. Je vysoko pravdepodobné, že ostatné koncepčné riešenia by mohli byť rovnako modifikované pre dosiahnutie požadovanej bezpečnosti, avšak čas nato potrebný by bol pravdepodobne oveľa vyšší z dôvodu vyšších napätí.

Z hľadiska užívateľskej jednoduchosti bol ako najlepší softvér zvolený *Fusion 360*, ktorého intuitívne užívateľské rozhranie vyžadovalo len minimálny čas medzi vstupom obáľkového dielu, definíciou OP a exportom TO dielu.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BRACKETT, D., I. ASHCROFT a R. HAGUE. *Topology optimization for additive manufacturing* [online]. 2011, , 15 s [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>
- [2] Topology optimization applied to the design of an automobile upper control-arm [online]. In: . [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.pad-tinc.com/blog/tag/topology-optimization>
- [3] EOS and Airbus Team on Aerospace Sustainability Study for Industrial 3D Printing [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2014/02/04/eos-and-airbus-team-on-aerospace-sustainability-study-for-industrial-3d-printing/>
- [4] Airbus A320 [online]. [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a320_en.php
- [5] *Getting to grips with fuel economy* [online]. 2004, , 83 s [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://ansperformance.eu/references/library/airbus-fuel-economy.pdf>
- [6] VAVERKA, O. Optimalizace těhlice Formule Student pro výrobu SLM technologií. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 94 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [7] ROZVANY, G. I. N., A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009, vol. 37, iss. 3, s. 217-237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0. ISSN 1615-1488.
- [8] CAZACU, R. a L. GRAMA. Overview of structural topology optimization methods for plane and solid structured. *Fascicle of Management and Technological Engineering* [online]. 2014, 2014(3), 6 s [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: <http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/>
- [9] HSU, Ming-Hsiu a Yeh-Liang HSU. Generalization of two- and three-dimensional structural topology optimization. *Engineering Optimization* [online]. Taylor, 2005, 37(1), 83-102 [cit. 2018-03-12]. DOI: 10.1080/03052150412331271208. ISSN 0305-215X.
- [10] SolidThinking Inspire 2018 [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://solidthinking.com/inspire2018.html>
- [11] What's New for Inventor 2016 R2 [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Inventor-WhatsNew/files/GUID-E56EC2F6-631D-4228-932A-312223C191F6-htm.html>

- [12] WEINBERG, D. a M. SMELL. Generative Design with Autodesk Nastran Topology Optimization [online]. In: . [cit 2018-03-12]. Dostupné z: <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/2016/nastran/sim15442#>
- [13] DROZDA, J.. Příručka ANSYS Workbench . 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012 [cit. 2018-03-12]. 105 s. ISBN 978-80- 01-05175-7.
- [14] EICHMILLER, P., A. MAGNIN a B. HEVENTHAL. Introducing Fusion 360 [online]. , 21 s [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://aucache.autodesk.com/au2016/sessionsFiles/18157/11492/handout_18157_PD18157-Eichmiller-AU2016.pdf
- [15] Cloudtopopt [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.sciartsoft.com/cloudtopopt/>
- [16] RIEG, F. Z88Arion [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://en.z88.de/z88arion/>
- [17] DENK, M. ToOptiX [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://github.com/DMST1990/ToOptiX>
- [18] MICHALATOS, P. a S. KAIJIMA. Topostruct [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://www.sawapan.eu/>
- [19] Catia 3Dexperience [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/catia/products/3dexperience/>
- [20] Ansys SpaceClaim [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://www.spaceclaim.com/en/Solutions/ReverseEngineering.aspx>
- [21] Mesh Enabler for Inventor [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: https://apps.autodesk.com/INVNTOR/en/Detail/In-dex?id=6950391119076900441&appLang=en&os=Win32_64
- [22] HODEK, J. Aditivní technologie [online]. 2013, , 25 s [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivnitechologie/85/>
- [23] BENIAK, J., Systémy Rapid Prototyping, edícia vysokoškolských učebníc, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [24] A. TSOUKNIDAS. Friction Induced Wear of Rapid Prototyping Generated Materials: A Review. *Advances in Tribology*[online]. Hindawi Limited, 2011, [cit. 2018-03-12]. DOI: 10.1155/2011/746270. ISSN 1687-5915.

- [25] *FDM 3D Printing materials compared* [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>
- [26] *3D Printer Filament* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.metalonmarketing.in/3d-printer-filament-2697726.html>
- [27] *Formlabs Form 2 SLA 3D Printer* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.voxelfactory.com/products/formlabs-form-2-sla-3d-printer>
- [28] ENGEL, Carsten. Selective Laser Melting versus Electron Beam Melting, [online], [cit. 2017-16-4], Dostupné z: <https://www.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting>
- [29] *SLM® Metal powder* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slmr-metal-powder7>
- [30] *Canyon Neuron AL.7* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.canyon.com/sk/mtb/neuron/2018/neuron-al-7-0.html>
- [31] *RockShox Monarch RT3* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://hollandbikeshop.com/sram/rockshox/rockshox-rear-suspension/>
- [32] *3D scanning through structured light projection* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/structured-light-projection-3d-scanning/>
- [33] *Mesh metrics* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_metrics.html
- [34] *Automatic Mesh Based Defeaturing* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_auto_defeat.html

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

3D	Trojrozmerný
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
CAD	Computer aided drawing
CAM	Computer aided machining
DLP	Digital Light Processing
ESO	Evolutionary Structural Optimization
HIPS	High impact polystyrene
KP	Konečno prvková sieť
MKP	Metóda konečných prvkov
NURBS	Non-uniform rational basis spline
OP	Okrajové podmienky
PET	Polyethylene terephthalate
PETG	Polyethylene terephthalate glycol
PLA	Polylactic acid
PVA	Polyvinyl alcohol
SIMP	Solid Isotropic Microstructure with Penalization
SKO	Soft-Kill Option
STL	Stereolitography
SS	Súradnicový systém
TO	Topologická optimalizácia

a_1	mm	- rameno sily F_{11}
a_2	mm	- rameno sily F_{12}
b_1	mm	- rameno sily F_{21}
b_2	mm	- rameno sily F_{22}
F_{11}	N	- sila pôsobiaca od tlmiča
F_{21}	N	- reakčná sila od zadnej časti rámu
F_{12}	N	- sila pôsobiaca od tlmiča
F_{22}	N	- reakčná sila od zadnej časti rámu

10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2.1 Priebeh topologickej optimalizácie [2]	14
Obr. 2.2 Držiak krytu	14
Obr. 2.3 Organická štruktúra na tehlici Dragon 7 [6]	15
Obr. 2.4 Metóda SIMP pred (hore) a po (dole) penalizácii [9]	16
Obr. 2.5 polyNURBS modelár v softvéri Inspire	17
Obr. 2.6 Prostredie nástroja Shape generator [11]	18
Obr. 2.7 Prostredie TO v softvéri Fusion 360	19
Obr. 2.8 Webové rozhranie Cloudtopopt [15]	19
Obr. 2.9 Prostredie softvéru Z88Arion [16]	20
Obr. 2.10 Prostredie modulu v softvéri Blender [17]	20
Obr. 2.11 Prostredie softvéru Topostruct [18].	21
Obr. 2.12 Vruby	22
Obr. 2.13 Spôsob kompletného premodelovania aplikovaný na	22
Obr. 2.14 Nevhodná aproximácia, žltý - výsledok z TO	23
Obr. 2.15 Potrebné kroky v aditívnej výrobe [22, upravené].	24
Obr. 2.16 Vľavo pôvodný model, vpravo naslicovaný model	24
Obr. 2.17 Princíp fungovania FDM technológie [24 upravené]	26
Obr. 2.18 Termoplast v podobe filamentu [26]	26
Obr. 2.19 Princíp fungovania SLA technológie [22, upravené]	27
Obr. 2.20 SLA tlačiaren of spoločnosti Formlabs [27]	27
Obr. 2.21 Princíp SLM [27, upravené]	28
Obr. 2.22 Bedrový kĺb z titánu	28
Obr. 2.23 Horský bicykel [30]	29
Obr. 2.24 Detail na vahadlá [30]	29
Obr. 2.25 Tlmič RockShox Monarch RT3 [31].	29
Obr. 2.26 Princíp 3D skenovania [32, upravené]	30
Obr. 2.27 Skenovanie na Atos Triplescan	30
Obr. 3.1 Obálka v topologickej optimalizácii	31
Obr. 3.2 Vľavo - obálka s vylúčeným regiónom, vpravo - výsledok TO	32
Obr. 3.3 Ukážka OP v softvéri Inventor	32
Obr. 3.4 Vplyv počtu prvkov na výsledok TO	32
Obr. 3.5 Zmena smeru nositeľiek síl v závislosti na stlačení tlmiča	33
Obr. 3.6 Rozmerové porovnanie výsledku z TO so skonvertovaným objemovým modelom	34
Obr. 4.1 Priebeh skenovania	36
Obr. 4.2 Výsledok skenovania	36
Obr. 4.3 Aproximácia valcom a rovinou	37
Obr. 4.4 Vnútoraná časť vahadla	37
Obr. 4.5 Výstup z GOM Inspect	37
Obr. 4.6 Obálky vahadiel pripravené na TO	38
Obr. 4.7 Hľadané parametre	38
Obr. 4.8 Kinematický model rámu	39
Obr. 4.9 Smery síl v 1. ZS	40
Obr. 4.10 Smery síl v 2. ZS	41
Obr. 4.11 Zjednotené OP, vahadlo zat'azené 2. ZS	43
Obr. 4.12 Náhl'ad KP siete	44
Obr. 4.13 OP v softvéri Inventor	45

Obr. 4.14 Výsledok TO zo softvéru Inventor	46
Obr. 4.15 Nastavenie vylúčenia regiónov	46
Obr. 4.16 Výsledok TO zo softvéru Workbench	47
Obr. 4.17 Nastavenie OP v softvéri Fusion 360	47
Obr. 4.18 Výsledok TO zo softvéru Fusion 360	47
Obr. 4.19 Nastavenie OP v softvéri Inspire	48
Obr. 4.20 Výsledok TO zo softvéru Inspire	48
Obr. 4.21 Skonvertovaný objemový model TO vahadiel zo softvéru Fusion 360	49
Obr. 4.22 Zostava do MKP analýzy, žltá – horné oko tlmiča, červená – ložiská, sivá - skrutky	50
Obr. 4.23 Nastavenie kontaktov	52
Obr. 4.24 Nastavenie OP v MKP analýze zostavy vahadiel	53
Obr. 4.25 Kvalita KP siete v nástroji Mesh metrics	53
Obr. 4.26 Vahadlá rozdelené na podoblasti	54
Obr. 4.27 Graf závislostí napätí v jednotlivých softvéroch na podoblastiach vahadiel	55
Obr. 4.28 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Inventor	55
Obr. 4.29 Redukované napätie v TO vahadlách zo Workbench	56
Obr. 4.30 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Inspire	56
Obr. 4.31 Redukované napätie v TO vahadlách zo softvéru Fusion 360	56
Obr. 4.32 Miesto maximálneho napätia	57
Obr. 4.33 Zostava vahadiel najlepšieho variantu	57
Obr. 5.1 Upravený najlepší variant vahadiel, modré oblasti – pridaný materiál	58
Obr. 5.2 Redukované napätie pre 1. ZS finálnych vahadiel	59
Obr. 5.3 Analýza MSVS pre 2. ZS	60
Obr. 5.4 Redukované napätie pre 2. ZS finálnych vahadiel	61
Obr. 5.5 Analýza MSVS pre 2. ZS	61
Obr. 12.1 Deformácia finálneho variantu vahadiel pri 1. ZS	73
Obr. 12.2 Deformácia finálneho variantu vahadiel pri 2. ZS	73
Obr. 12.3 Redukované napätie pôvodných vahadiel pri 2. ZS	74
Obr. 12.4 Deformácia pôvodných vahadiel pri 2. ZS	74

11 ZOZNAM TABULIEK**11**

Tab. 2.1 Materiály pre SLM	29
Tab. 2.2 Výsledok porovnania TO softvérov	34
Tab. 4.1 Zložky síl oboch ZS	43
Tab. 4.2 Hmotnosti vahadiel	50
Tab. 4.3 Použitý materiál v MKP analýze	52
Tab. 4.4 Redukované napätia v podoblastiach vahadiel	55
Tab. 6.1 Výsledky TO vahadiel v porovnaní s pôvodnými vahadlami pre viac nepriaznivý ZS	64

12 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Obrázková dokumentácia k MKP analýze finálnych vahadiel

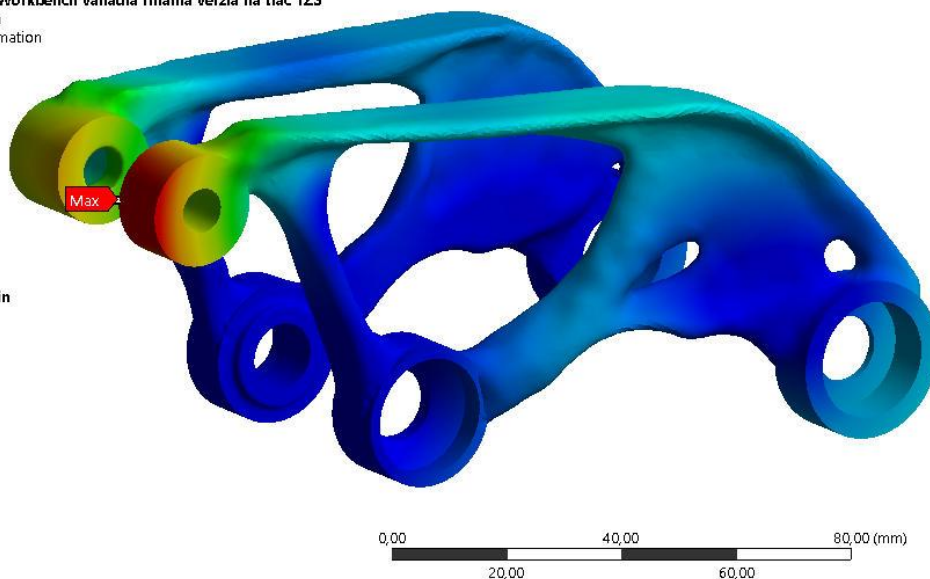
Príloha 2: Obrázková dokumentácia k MKP analýze pôvodných vahadiel

Obrázková dokumentácia k MKP analýze finálnych vahadiel

M: Validácia TO Workbench vahadla finalna verzia na tlac 1ZS

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

0,19646 Max
0,17506
0,15366
0,13227
0,11087
0,089469
0,06807
0,046672
0,025273
0,0038748 Min

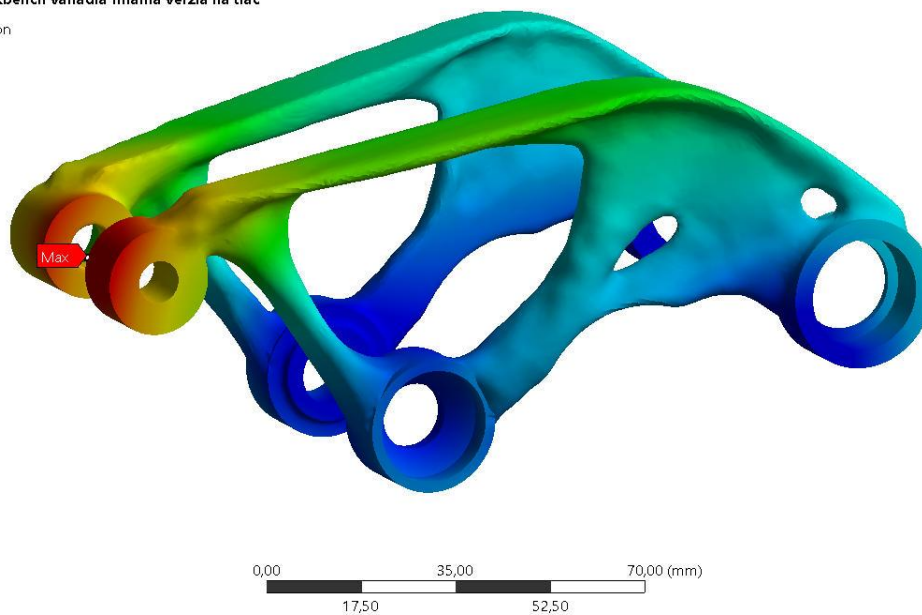


Obr. 12.1 Deformácia finálneho variantu vahadiel pri 1. ZS

L: Validácia TO Workbench vahadla finalna verzia na tlac

Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
11.5.2018 12:21

0,5361 Max
0,4788
0,42149
0,36419
0,30688
0,24958
0,19227
0,13497
0,07766
0,020354 Min

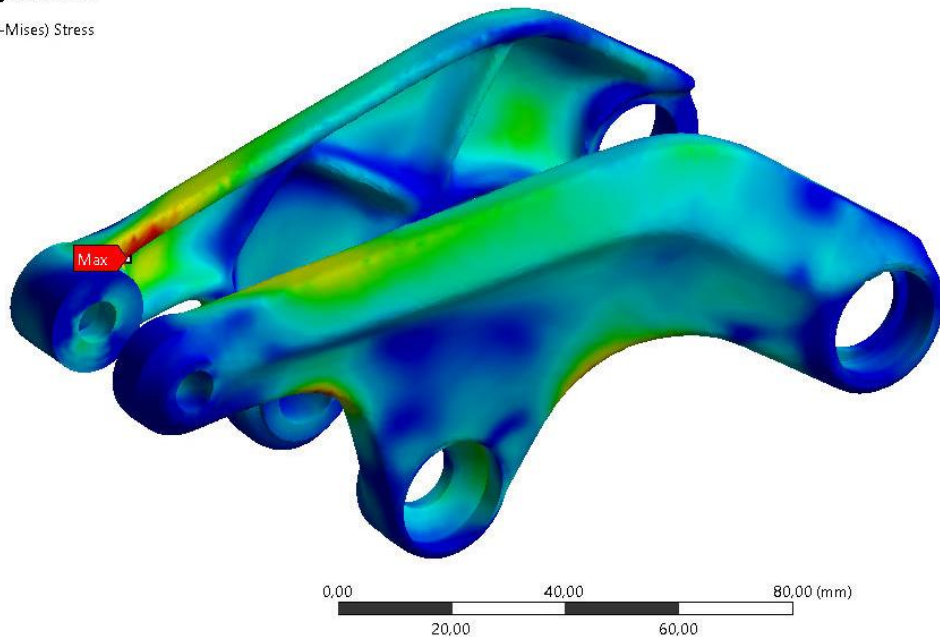


Obr. 12.2 Deformácia finálneho variantu vahadiel pri 2. ZS

Obrázková dokumentácia k MKP analýze pôvodných vahadiel

J: Validacia povodnych vahadiel
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 24.4.2018 0:45

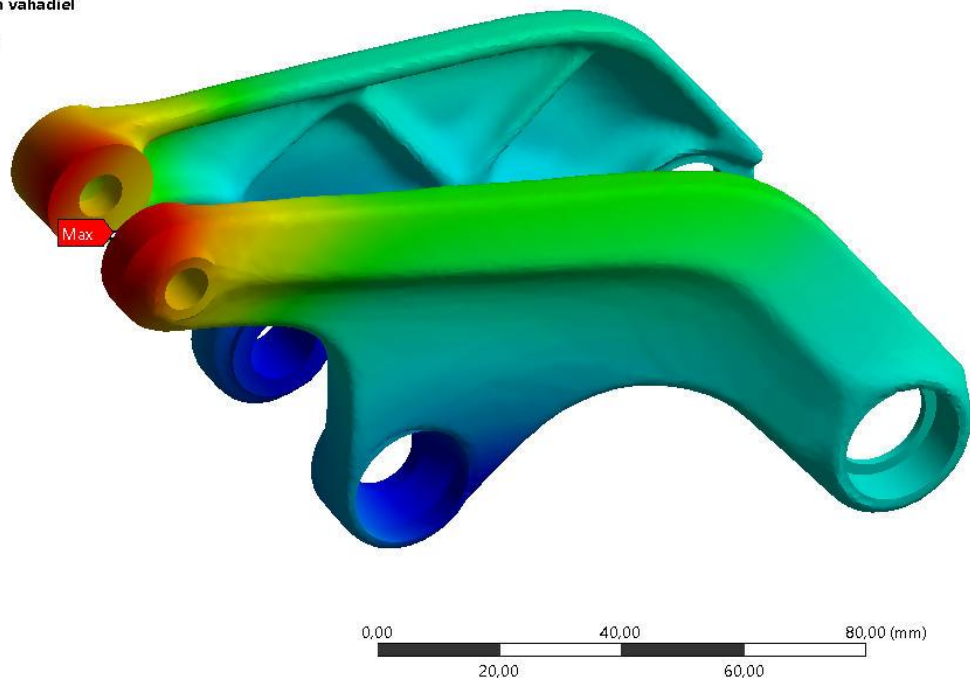
266,29 Max
 236,76
 207,23
 177,71
 148,18
 118,65
 89,127
 59,6
 30,074
 0,54686 Min



Obr. 12.3 Redukované napätie pôvodných vahadiel pri 2. ZS

J: Validacia povodnych vahadiel
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 18.5.2018 2:11

0,73559 Max
 0,65552
 0,57545
 0,49538
 0,41531
 0,33524
 0,25517
 0,17511
 0,095038
 0,01497 Min



Obr. 12.4 Deformácia pôvodných vahadiel pri 2. ZS