

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A

METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE JAKO NÁSTROJ DESIGNU PRO

ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

TOPOLOGY OPTIMIZATION AS A TOOL IN DESIGN FOR ADDITIVE

AUTOR: Lucie Hlavůňková

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

PRAHA 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlavůňková** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **466481**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Topologická optimalizace jako nástroj designu pro aditivní technologie**

Název diplomové práce anglicky:

**Topology optimization as a tool in design for additive**

Pokyny pro vypracování:

Problematika odlehčování dílů ve fázi návrhu  
Proces topologické optimalizace a lattice optimalizace  
Návrh demonstrátoru a jeho realizace  
Výroba a ověření návrhu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zaměřuje na aditivní technologie. Uvádí technologická pravidla při návrhu dílu za použití 3D tisku. Popisuje nové vývojové trendy a oblasti, ve kterých se nalézá její vhodné využití. Zároveň objasňuje jednotlivé druhy strukturální optimalizace a jejich přínosy napříč výrobními odvětvími. Je zde teoreticky popsán celý proces topologické optimalizace, poté i praktická ukázka na artefaktu. Návrh součásti souvisí s možností ukázky celkového procesu a zajištění maximálního pochopení jejího průběhu. Celá práce je zakončena tiskem jednotlivých variant. Poté jsou jednotlivé varianty dílu experimentálně ověřeny a tyto hodnoty jsou porovnány s výsledky simulačního procesu.

## **Klíčová slova**

Topologická optimalizace, Aditivní technologie, ABS

## **Annotation**

This diploma thesis is focused on additive technologies. It demonstrates design rules for additive manufacturing methods. It describes new developing methods and areas, in which their appropriate utilization is found. As well it clarifies types of optimizations and their benefits across manufacturing industries. It characterizes the whole process of topology optimization theoretically, then it shows practical specimen of the artefact. The designing of part relates with a possibility of sample the whole process and its assurance of maximal understanding. It all ends with the printing of the main versions of the part. Then all the versions are experimentally verified, and these results are compared with an outcome from a simulation process.

## **Keywords**

Topology optimization, Additive Manufacturing, ABS

## **Poděkování**

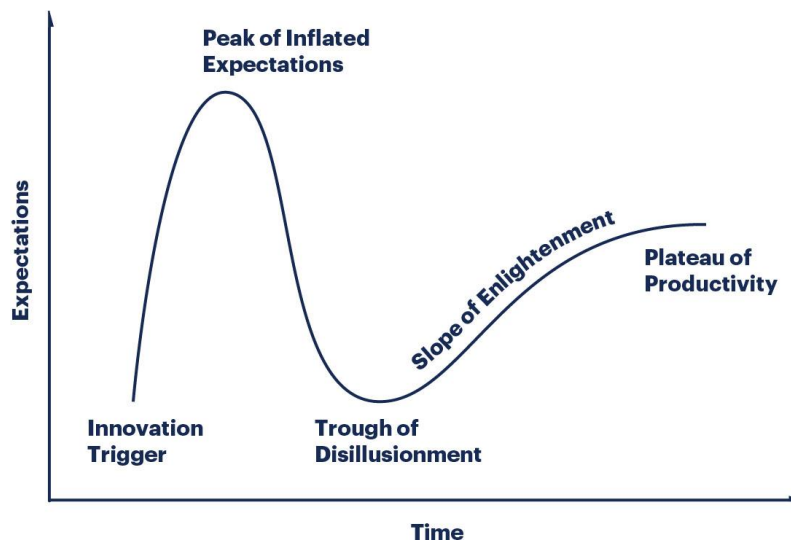
Velmi ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za věnovaný čas, užitečné podněty a většímu slohovému citu. Velké poděkování patří také mé rodině a blízkým přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu on – line studia a přispěli tak k podstatnému zvýšení mé studijní morálky, a tedy i dokončení této práce.

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Aditivní technologie .....	10
3	Strukturální optimalizace .....	17
3.1	Topologická optimalizace .....	18
3.2	Lattice struktura .....	19
3.3	Topografická optimalizace.....	21
4	Užití topologické optimalizace .....	23
5	Proces topologické optimalizace.....	29
5.1	Modelování.....	29
5.2	Síťování .....	29
5.3	Materiál a jeho mechanické vlastnosti.....	31
5.4	Zatížení, omezení a druh analýzy .....	31
5.5	Výpočet.....	32
5.6	Vizualizace .....	32
6	Technologická pravidla návrhu dílu při použití aditivních technologií .....	34
7	Návrh demonstrátoru.....	39
7.1	ABS.....	45
7.2	AlSi10Mg.....	54
8	Získané zkušenosti s procesem topologické optimalizace .....	59
9	Výsledné návrhy a experimentální ověření výsledků simulace .....	64
10	Závěr.....	70
11	Seznam použité literatury .....	73
12	Seznamy .....	79
12.1	Obrázky .....	79
12.2	Tabulky.....	82
12.3	Grafy .....	82
12.4	Zkratky .....	83

# 1 Úvod

Aditivní technologie patří k neustále se rozvíjející oblasti průmyslu, která je v mnoha odvětvích velmi využívána. Dle křivky „Gartner Hype“, která popisuje technologické cykly, lze aditivní technologii zařadit za fázi deziluze a je na vzestupu k produktivitě. Díky neustálým výzkumům v této oblasti získáváme další znalosti, které slouží k rozšiřování povědomí a znalostech, kde má tato technologie možnou budoucnost a kde nikoliv. Zároveň se neustále prohlubují znalosti o principiálních nevýhodách této technologie, u kterých je snaha o jejich překonání.



Obrázek 1 Křivka technologického cyklu [1]

Cílem této diplomové práce je prohloubení znalostí v oblasti aditivních technologií, jejich procesech a používaných materiálech. Zároveň byla provedena rešeršní část týkající se technologických pravidel návrhu dílu tak, aby bylo v celém procesu minimalizováno množství chyb. Druhým významným tématem je strukturální optimalizace a její jednotlivé možnosti užití. Je zde poukázán hlavně na topologickou optimalizaci. Díky použití výpočtu metody konečných prvků při topologické optimalizaci dochází ke zlepšení rozvržení potřebného materiálu v návrhovém prostoru. Použitím této metody však vznikají geometricky složité díly, které ale na druhou stranu přináší originální design. Topologická optimalizace tak neslouží k vytvoření konečného dílu či funkčního prototypu, ale jako nápověda, jakým směrem postupovat dále při návrhu.

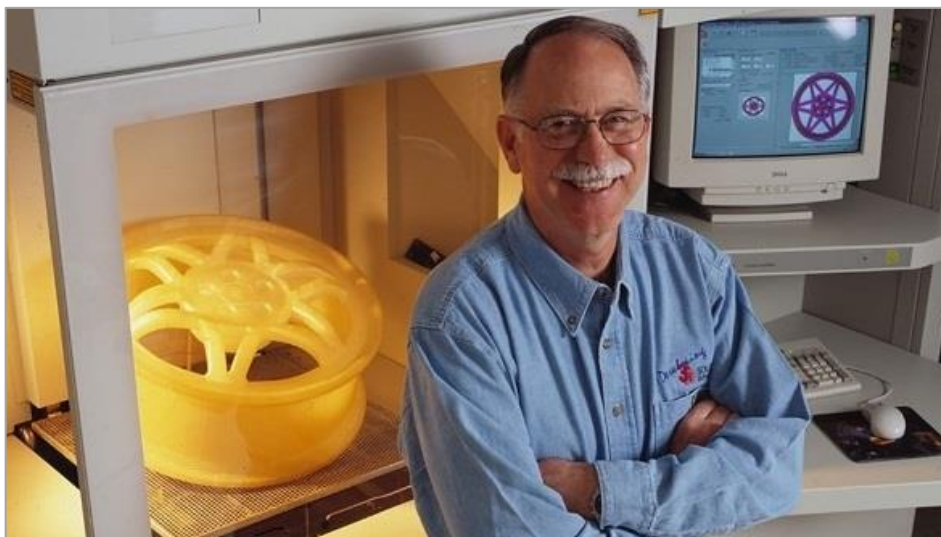


Respektováním těchto výpočtů lze dojít ke snížení hmotnosti dílu, průhybu či kritéria maximálního napětí. Dále byly popsány jednotlivé kroky topologické optimalizace a byl realizován proces topologické optimalizace na modelové součásti pro osvojení si jednotlivých kroků. Praktická část je zaměřena na návrh demonstrátoru, který slouží jako snadno představitelná ukázka celého procesu, včetně možností, které topologická optimalizace nabízí.

Kombinace těchto témat byla navržena nejen z důvodu zájmu. Také jako ukázka, že lze topologicky optimalizovaný díl s komplikovanou geometrií vytisknout pomocí použití technologie 3D tisku.

## 2 Aditivní technologie

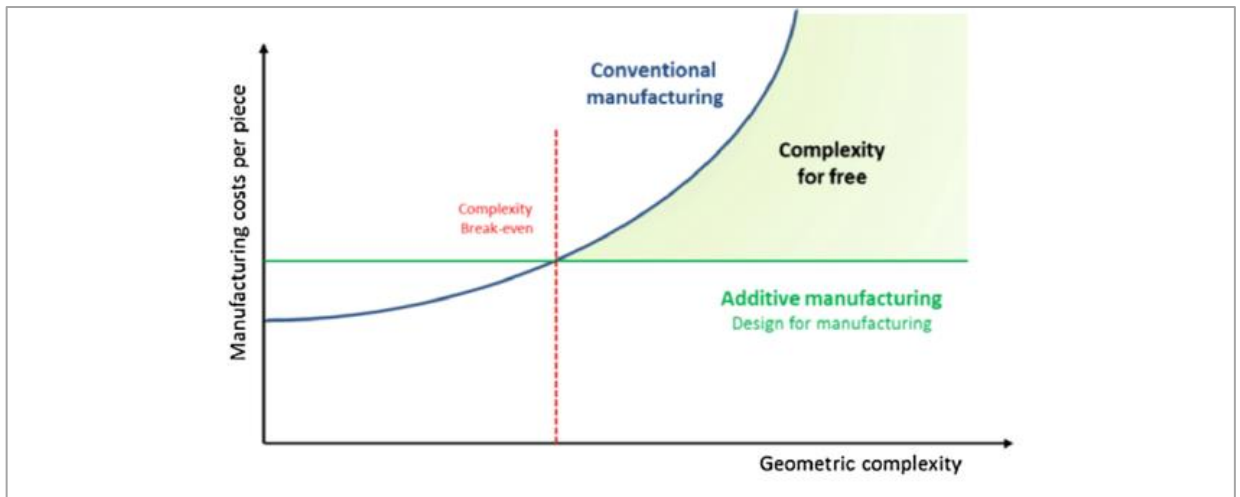
Technologie aditivní výroby také známá jako 3D tisk je výrobní proces, při kterém je objekt tvořen skládáním jednotlivých vrstev na sebe. Tuto technologii vyvinul Charles Hull v roce 1986 známou jako stereolitografii (SLA) a na jejích základech navázal pozdější vývoj. 3D tisk zahrnuje různé metody, používané materiály a zařízení, které se v průběhu let vyvíjí. Aditivní výroba je široce používána v biomechanice, leteckém a automobilovém průmyslu či stavebnictví. [2,4]



*Obrázek 2 Charles Hull [3]*

V posledních pár letech se neustále objevují kvalitnější materiály či technologie, jejichž rozmach úzce souvisí s vypršením platnosti dřívějších patentů. Nedávný vývoj také snížil náklady na 3D tiskárny, čímž prudce rozšířil jejich aplikaci. Například do škol, domácností a laboratoří. Je též důležité zmínit, že kvalita tiskárny a samotného výtisku značně ovlivňuje pořizovací náklady na stroj a materiál.

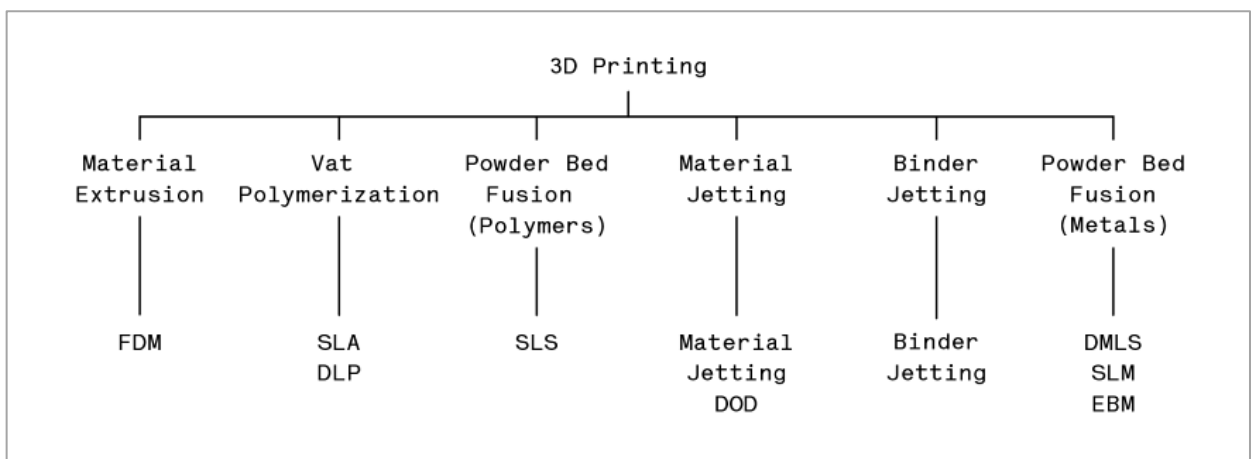
Mezi značné výhody aditivní technologie patří: výroba složité geometrie dílu, u kterého je zachována vysoká přesnost, maximální úspora materiálu či snadná změna designu dle individuálních potřeb zákazníka. Využití AT roste napříč odvětvími. Velký potenciál aditivní technologie je obzvláště využíván při výrobě mřížkových struktur, kde by výroba konvenčními technologiemi byla velmi nákladná či úplně nemožná. [4]



Obrázek 3 Srovnání aditivní a konvenční výroby [5]

Zpočátku byl 3D tisk využíván hlavně pro svoji rychlost tvořit prototypy či různé architektonické vizualizace. Výrobci tiskáren se proto museli přizpůsobit poptávce, která se odvíjí od možnosti tisknout menší výrobky po menších sériích za nižší cenu. Tato možnost je obzvláště využívána v biomedicíně, kde je každý výrobek originální pro jasně stanovené potřeby pacienta.

Na následujícím obrázku je možné vidět rozdělení metod vzniku výrobku pomocí 3D tisku. Jednotlivé metody se tak liší ve využívané technologii, základním materiálu, přesnosti tisku, a dalších charakteristikách.



Obrázek 4 Rozdělení metod aditivních technologií [6]

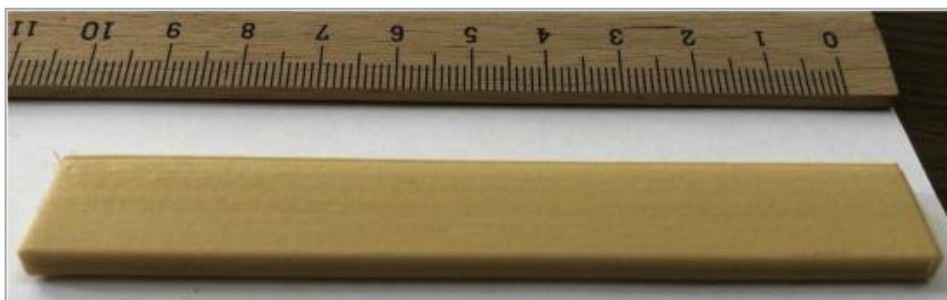
Ruku v ruce s vývojem technologie jde i vývoj materiálů, které jsou používány. PLA (kyselina polymléčná) či ABS (akrylonitril-butadien-styren) patří mezi nejvíce používané polymery pro 3D tisk komponent. V leteckém a kosmickém průmyslu jsou používány nejvíce kovy a jejich slitiny. Nižší mechanické vlastnosti a anizotropní chování stále velmi

komplikuje implikovat 3D tisk velkoplošně. Pro 3D tisk lze použít materiály ve formě vláken, drátu, prášku, pasty, listů či inkoustu.

Polymery jsou považovány za nejběžnější materiál, mezi ně patří: termoplastické polymery, jako je například ABS, PA, PC nebo PLA a prášky, mezi které patří polystyren, polyamidy a fotopolymerní pryskyřice, která patří mezi reaktoplasty. Základní stav materiálu je ve formě drátu, prášku, fólie nebo kapaliny. Tyto materiály jsou používány hlavně pro rychlé prototypování. V posledních letech však bylo zavedeno vyztužení polymerů vláknem a nanomateriály, s cílem zlepšení jejich mechanických vlastností. [4]

Polymerní materiály mohou být zpracovávány několika způsoby. Mezi nejběžnější způsob patří extruze, při které je materiál dodáván v podobě plastové struny a pomocí trysky nataven a nanesen na tiskovou plochu. Tyto tiskárny vykazují nejnižší náklady na pořízení. Kvalita výsledného tisku souvisí se znalostí operátora. Další způsob vzniku součásti je princip vytvrzování tekutého polymeru pomocí laserového záření – stereolitografie (SLA). Jedná se o jednu z nejpřesnějších technologií 3D tisku. Nevýhodou však zůstává vysoká pořizovací cena stroje a materiálu. Poslední zmiňovanou metodou je technologie laserového spékání práškových materiálů, nejčastěji plastových, kovových či keramických. Hlavní výhodou je absence podpor díky neustálému obklopení výtisku zbytkovým materiálem. [7]

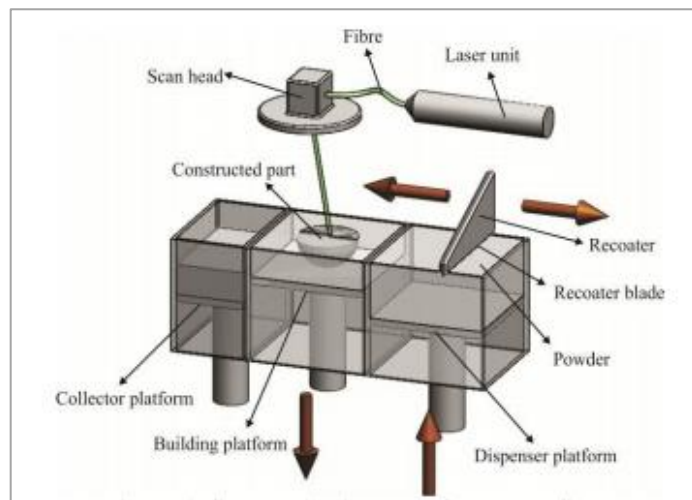
Spojením PLA a velmi snadno dostupných zbytků dřeva vznikají také filamenty. Malé kousky dřeva, třísky a malé částice lze mlít na menší frakce, aby se získal jemný dřevěný prášek. Ten je poté přidáván jako výztužný materiál při tisku tradičními polymerními materiály, jedná se o kombinaci 70/30 ve prospěch PLA. Dle značky, která tento filament nabízí je k dostání dřevěné vlákno na bázi bambusu, břízy, cedru, korkovníku, olivovníku nebo dokonce kokosu. Takto vzniklá struna vykazuje dobrou obrobitelnost, částečnou obnovitelnost zdrojů a snazší likvidaci. [8]



Obrázek 5 3D tištěný zkušební vzorek dřeva/ PLA [8]

Kovový tisk je spojen hlavně s technologií DMLS – Direct Metal Laser Sintering. Díl je tvořen postupným vrstvením kovového prášku, kdy je materiál taven pomocí koncentrovaného laserového paprsku. Proces umožňuje rychle reagovat na poptávku a urychlit tak celý vývoj nových dílů. Tato technologie dokáže vyrábět velmi geometricky přesné díly, bez potřeby dalších přípravků a nástrojů.

Pole působnosti technologie DMLS je velmi široké a dochází k neustálému rozšiřování, hlavně z důvodu, že se jedná o poměrně mladou technologii. [9]



Obrázek 6 Schéma technologie DMLS [10]

Podpůrné struktury jsou budovány současně ze stejného materiálu. Je nutné jejich pozdější manuální odstranění. Po dokončení tisku je nutné tepelné zpracování. Možnost kovového tisku přináší do procesu hlavně výhodu ve zkrácení výrobního cyklu dílu. Rovněž je eliminována fáze montáže a snižuje se riziko lokálního napětí v procesu montáže. Možnosti 3D tisku kovů neustále omezují vady, mezi které patří pórovitost, variabilita vlastností a tvaru dílu v závislosti na jejich orientaci. [3,11]

Aplikace kovového tisku je v dnešní době soustředěna převážně v leteckém a biomedicínském průmyslu. Jedná se o odvětví, u kterého si zákazník dokáže připlatit za možnost snížení hmotnosti dílu. Základním kamenem úrazu většího rozšíření jsou počáteční náklady na stroj a materiál.

Nejprodávavější kovové tiskárny používají velmi výkonné lasery, jejichž cena se může odvíjet od částky okolo 5 milionů Kč (jedná se o menší tiskárny. Střední třída se může pohybovat okolo 20 mil. Kč, velké tiskárny i více.) Nepředpokládá se tedy výrazné

snižování. Výzkumy pak řeší celkové zlepšení výsledného povrchu dílu nebo rozšíření pracovní komory. [12]

Beton je umělý materiál, který je nepoužívanější převážně ve stavebním průmyslu. 3D tisk betonu je zatím stále v začátcích, ale oplývá nespornými výhodami, např. automatizace stavby, nulová potřeba bednění a možnost rychlé změny designu. Extruze je hlavní metodou používanou u 3D tisku betonem. Je však potřeba řešit problémy, které betonový tisk představuje. Jedná se o rozdílný vzhled jednotlivých vrstev, anizotropní mechanické vlastnosti a špatná adheze mezi vrstvami. Jednou z představ betonového tisku je možnost stavby nového domu během pracovní doby. Na ukázce je 3D tištěný betonový dům, u kterého je zatím zcela neporovnatelný čistý čas tisku a čas určený k vyladování neustálých problémů během tisku. Jedná se například o správný poměr betonové směsi či náhlý pád jedné z vnitřní části stěny. [4]



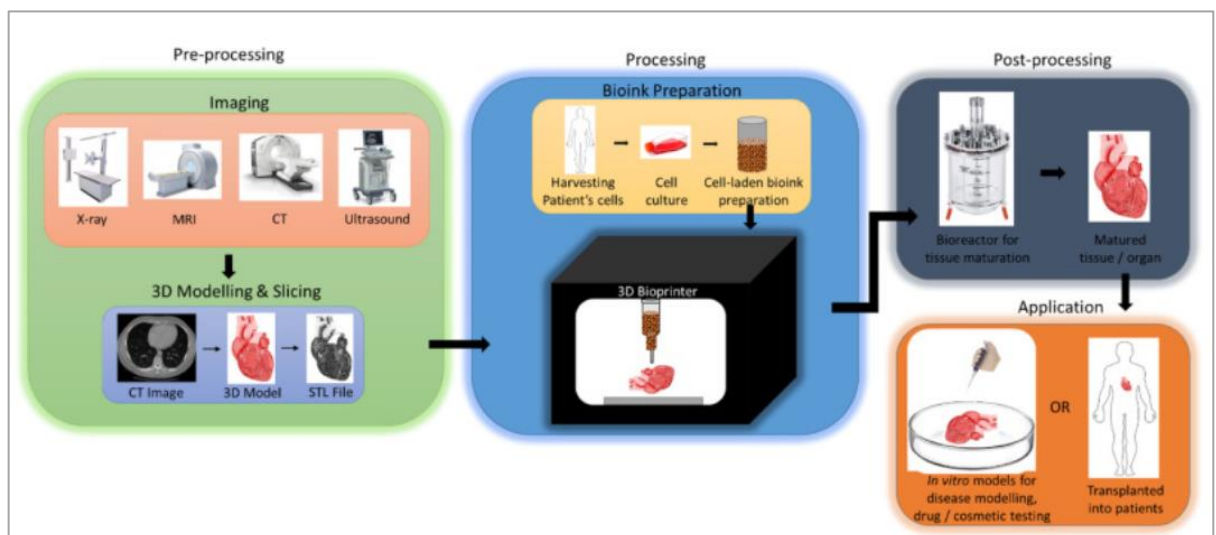
Obrázek 7 Ukázka 3D tisku betonem – dům Prvok [13]

Nedávné pokroky v oblasti aditivních technologií umožnily tisk biokompatibilních materiálů, buněk nebo podpůrných komponent do složitých 3D funkčních živých tkání. Proces je aplikován hlavně v oblasti regenerativní medicíny s cílem řešit potřebu tkání a orgánů, které jsou vhodné k transplantaci. 3D bioprinting musí čelit výzvám v podobě výběru materiálu, typů buněk, růstových faktorů a citlivosti živých buněk. Řešení vyžaduje integraci znalostí z oblasti strojírenství, vědy o bio materiálech, buněčné biologie, fyziky a medicíny. Technologie je používána hlavně ke generování

a transplantaci tkání, kůže, kostí, cévních štěpů, dlah, srdeční tkání a chrupavek. Mezi další aplikace patří tisk tkáňových modelů pro výzkum, objevování a testování účinnosti léků, toxikologie a chemoterapie. Tyto postupy umožňují snižování nákladů jak při vývoji nových implantátů, tak samotných léků. [14]

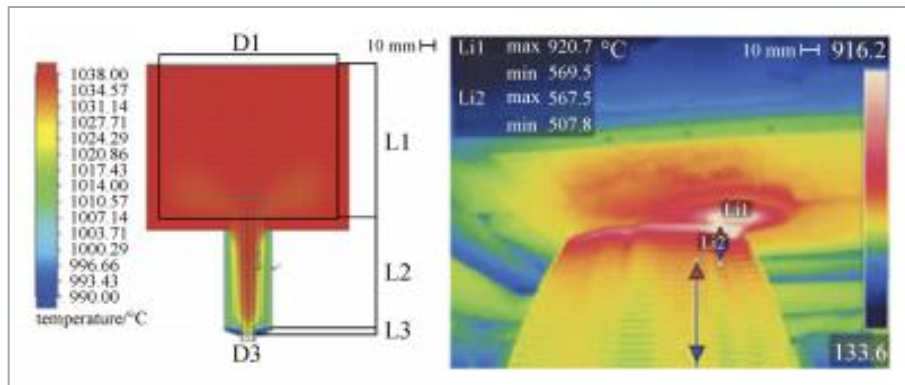
Velkým potenciálem využití 3D bioprintingu je výroba složitých, propracovaných tkáňových struktur. U kterých je základ automatizace, vysoká přesnost, kontrola, přizpůsobení, reprodukovatelnost a opakovatelnost. Rozmach této technologie souvisí i s velkým nedostatkem orgánů pro transplantace.

Celkový proces 3D bioprintingu je naznačen na následujícím obrázku. Velmi zjednodušeně řečeno se jedná o obdobný proces jako u 3D tisku součásti. Rozdílem je vytisknutá součást, kterou je orgán či živá tkáň. Ta musí být udržována pro zrání před transplantací pacientovi. [15]



Obrázek 8 Proces 3D „bioprintingu“ [15]

Sklo lze zařadit mezi materiály, které je možné použít u aditivních technologií. Tento materiál se pyšní mnoha skvělými přednostmi, mezi které patří výborné optické vlastnosti, tepelná stabilita či izolace. A je široce používáno v našem každodenním životě. Technika 3D tisku dokáže vyrobit komponenty se složitou geometrií a vysokou přesností při velmi malých velikostech (pod 1mm). Skleněný materiál v příslušném provedení lze zpracovávat technologiemi FDM, stereolitografií či laserovým spékáním. Hlavními výzvami do budoucna je zkrácení procesu tisku, jeho zjednodušení a snížení nákladů. [16]



Obrázek 9 Teploty kolem trysky během procesu tisku [16]

Mezi aplikace patří tvorba optických prvků a originální designové součásti.



Obrázek 10 Ukázka 3D tisku roztaveného skla [17]

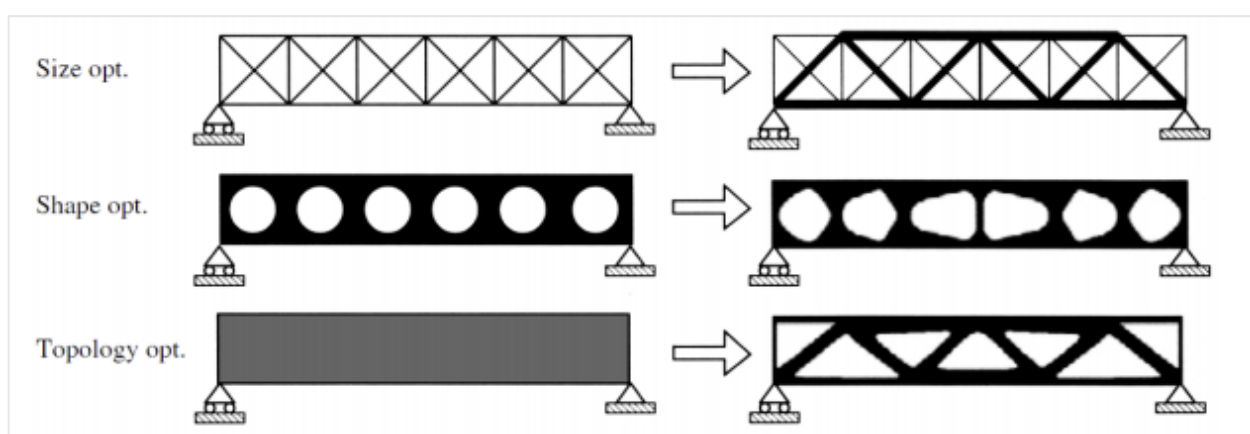


### 3 Strukturální optimalizace

Strukturální optimalizace je označována jako nejnáročnější, ale zároveň ekonomicky nejvýhodnější úlohou v konstrukčním návrhu. Tradičně byla hledána řešení problémů optimalizace pomocí různých matematických programovacích metod. Ukázalo se však, že programování je neúčinné a často nevhodné. To vedlo k posunu v oblasti teorie rozvržení. Bendsoe a Kikuchi vyvinuli tzv. homogenizační metodu, u které je model rozdělen na nekonečně mnoho částí v mikroskopickém měřítku. Problém s rozvržením materiálu je definován jako hledání optimální pórovitosti pomocí jednoho z kritérií.

Pozorováním vývoje přirozeně se vyskytujících struktur, jako jsou skořápky, kosti, stromy, je zřejmé, že topologie a strukturní tvary se snaží dosáhnout optimálního vzhledu a přizpůsobit svůj tvar okolním podmínkám. [18]

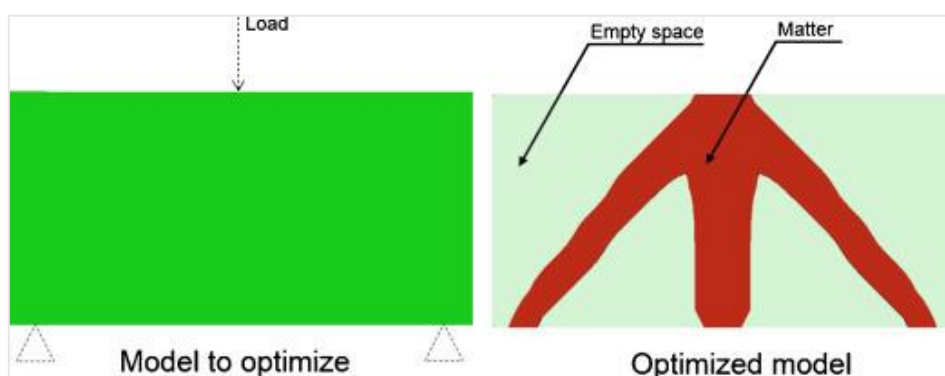
Konstruktor působící v oblasti výzkumu a vývoje musí velmi často navrhovat zcela nové struktury. Nemůže si být jistý jejich konečným vzhledem. Hlavním cílem změny je snížení hmotnosti, která je zároveň i jedním z hlavních faktorů konečných nákladů na díl. Designér se může pokusit změnit intuitivně předchozí návrhy dle vlastních zkušeností. Tento přístup je však časově náročný a nezajišťuje kvalitní výsledek. Problém se dá řešit díky strukturální optimalizace, která se rozděluje do tří druhů: optimalizace velikosti (dimenzování), tvaru a topologická optimalizace. [19]



Obrázek 11 Srovnání jednotlivých druhů strukturální optimalizace – velikost, tvar a topologie [21]

### 3.1 Topologická optimalizace

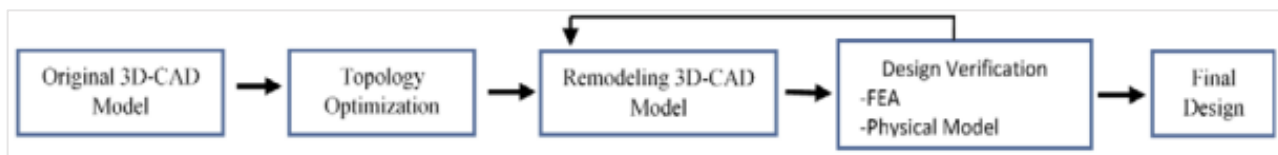
Topologická optimalizace je jednou z technik strukturální optimalizace. Řeší distribuci materiálu v určeném návrhovém prostoru při daném zatížení. Technologie optimalizace kombinuje využití modelování v CAD (Computer – Aided Design) programech, koncept analýzy konečných prvků (FEA – Fine Element Method) a různé optimalizační algoritmy s ohledem na výrobní techniky. Použitím CAD je vytvořen počáteční model produktu, který má být optimalizován. Zatímco analýza konečných prvků je použita k rozdělení napětí a distribuci materiálu v celém návrhovém prostoru. [21]



Obrázek 12 Jednoduchý příklad optimalizace [20]

Topologická optimalizace přináší do procesu hlavně tyto výhody:

- a) vytváření odlehčených struktur,
- b) vytváření designu, který je kompletně připravený k výrobě,
- c) zkrácení doby uvedení produktu na trh,
- d) úspora materiálu a energie při zpracování,
- e) omezení potřeby prototypů. [21]



Obrázek 13 Proces topologické optimalizace [21]

Metody topologické optimalizace se používají pro řešení návrhových problémů především v oblasti odlévání a obrábění. Procesy, při kterých je součást vyráběna úběrem materiálu lze popsat jako substraktivní metody (obrábění). Procesy, kdy je pro

výrobu součásti nutné nejprve navrhnout a vyrobit formu lze popsat jako formovací (zápustkové kování, odlévání, vstřikování plastů). Oba tyto přístupy přinášejí významná výrobní omezení, která se musí zohledňovat během návrhového procesu a zajistit tak proveditelný design. Příklad: potřeba přístupu k nástroji během obrábění či potřeba vyjmutí dílu z formy během odlévání. Tyto překážky omezují fyzickou realizaci topologické optimalizace a je třeba mezi nimi udělat kompromis pro optimálnost a snadnost výroby. Tato omezení jsou obvykle uvedena již v návrhu při omezení topologie na proveditelné návrhy nebo následným zjednodušením neomezené optimalizace. Za tímto účelem bylo v posledních několika letech vynaloženo veliké úsilí, aby mohlo docházet i k použití kovů, nejen polymerů. Aditivní výroby obvykle vyžaduje 3D model. Ten je poté rozdělen po jednotlivých vrstvách (profil průřezu) a materiál je nanášen po vrstvách až je vygenerována celá součást.

Díky tomuto přístupu k výrobě vrstev mohou být vyrobeny součásti s vyšší složitostí a tato složitost nemá zásadní vliv na celkovou cenu procesu. To poskytuje designérovi výrazně větší svobodu návrhu a umožňuje větší přiblížení k optimálnímu provedení, než by bylo při použití konvenčních metod. [22]

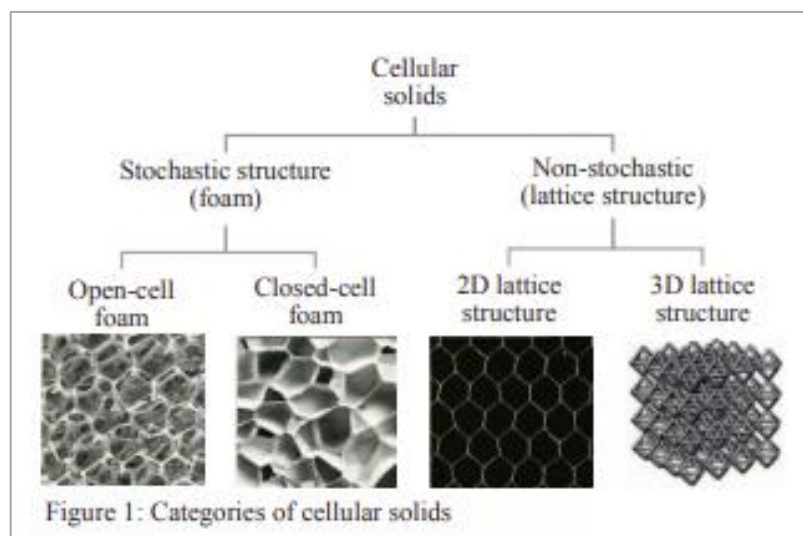
Topologická optimalizace posouvá hranice svobody designu a nabízí řadu výhod a příležitostí pro aditivní výrobu v nejnáročnějších průmyslových odvětvích. Nástroje TO mají schopnost minimalizovat či maximalizovat tloušťku v oblastech dílu, kde je úspora či tuhost nejpotřebnější. Zároveň odstranit materiál v částech, které nejsou výrazněji mechanicky namáhané. Letecký průmysl je proto jeden z nejvýraznějších zástupců, ve kterém se vyrábějí díly se zachovanou pevností, ale uspořené hmotností. Nižší množství použitého materiálu vede i k ekologičtějším využití a snižuje jeho plýtvání. [23]

## 3.2 Lattice struktura

Lattice structure neboli mřížkové struktury, lze definovat jako struktury složené z postupně opakujících se a vzájemně uspořádaných propojených buněk, dostupné ve dvourozměrném i trojrozměrném provedení. Většinou jsou vytvářeny k poskytování řešení v lékařském, leteckém a automobilovém průmyslu. Hlavně z důvodů, že šetří potřebu materiálu k výrobě dílu a krátí dobu výroby. [24]

S vývojem mřížek dochází k neustálému zvyšování komplikovanosti jednotlivých struktur. Jedná se tak o velmi časově náročný proces, proto se v dnešní době používají programy, které mřížky dokážou vygenerovat.

Jednotlivé struktury jsou tvořeny kombinací nosíkových prvků a uzlů. Jejich počet či vzdálenost se mění v závislosti na použité mřížce a navolení velikosti elementu. Organizace mřížky se skládá ze dvou různých topologií – stochastické a periodické. U stochastické dochází k rozptýlení buněk a jejich tvary jsou nesystematicky uspořádané. Zatímco v periodické jsou jednotlivé struktury skládány podél samostatné osy. [25]



Obrázek 14 Možnosti organizace mřížky [25]

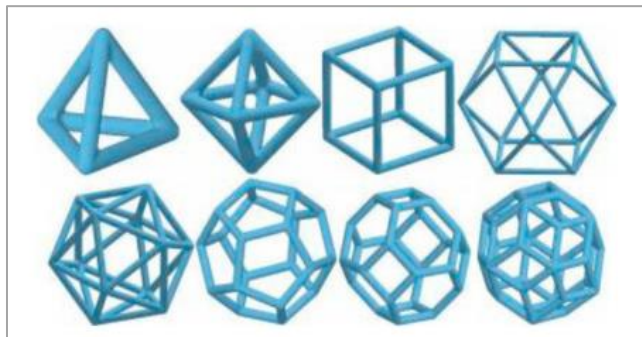
Rostoucí poptávka po úsporách energie vede k potřebě lehčích dílů. V leteckém a kosmickém průmyslu pokles hmotnosti snižuje spotřebu paliva a jeho výdaje. Stejně tak i v automobilovém průmyslu může 10 % snížení hmotnosti dílu, ušetřit 6–8 % spotřeby paliva. Bylo zjištěno, že použitím těchto struktur dochází k realizaci úspory. Vyšší poptávka a možnost uplatnění souvisí s větší nabídkou dostupných materiálů, zároveň také i s nižší cenou a lepšími vlastnostmi, které materiál může dosáhnout. Aplikace těchto struktur snižuje hmotnost a tvoří součásti, které jsou lehčí se zachováním pevnostních charakteristik. [26]

Návrh mřížkové struktury záleží na třech aspektech: návrh struktury, matematický algoritmus a topologická optimalizace jednotkových buněk. Různé typy

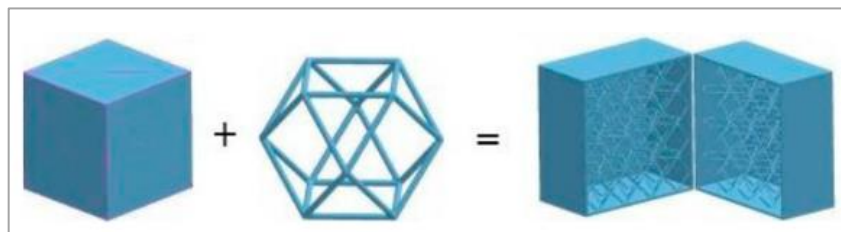
struktur mají své jedinečné charakteristiky, které odrážejí a určují celkovou výkonnost celé mřížky. Proto je design i optimalizace základními díly výzkumu.

Jednotlivé struktury jsou vytvářeny opakováním základního prvku. Vlastnosti mřížek proto přímo souvisejí s velikostí, tvarem, vybranou strukturou a prostorovým uspořádáním těchto základních prvků.

Při použití různých modelovacích programů je velmi snadné navrhovat struktury jednotlivých buněk. V CAD programech je možnost volně navrhovat geometrické struktury a poté je analyzovat metodou konečných prvků nebo experimentálními metodami. Na následujících obrázcích jsou znázorněny základní buněčné struktury, včetně ukázky vyplnění prostoru. [27]



Obrázek 15 Základní 3D buněčné struktury [27]



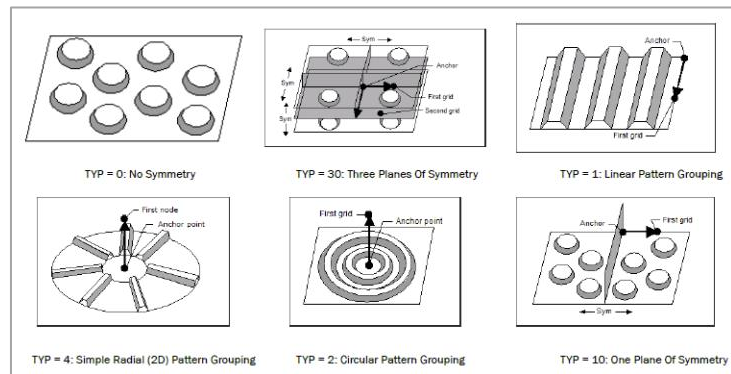
Obrázek 16 Ukázka vyplnění prostoru určitou buňkou [27]

### 3.3 Topografická optimalizace

Topografická optimalizace je specifický druh optimalizace, která generuje tužší strukturu. Zachovává však minimální použití materiálu a udržuje konstantní tloušťku v celém objemu.

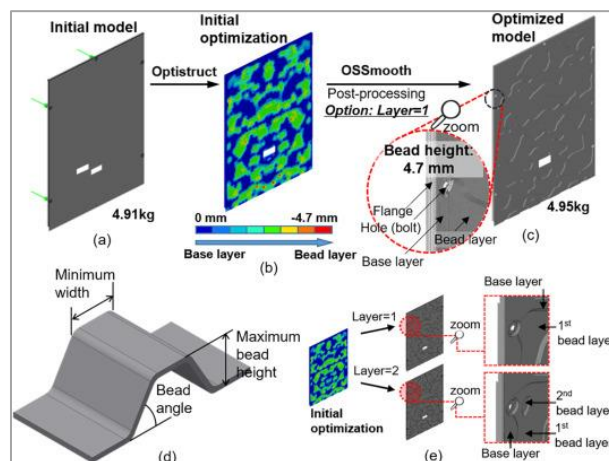
Mezi obvyklé použití topografické optimalizace patří tvorba skořepinových a tenkostěnných konstrukcí jako prostředek k vyztužení dílu. Jedná se o pokročilou formu optimalizace tvaru. Přístup u topografické optimalizace je podobný přístupu

u topologické optimalizace. Jsou používány tvarové proměnné a ne ty, které se týkají hustoty. Oblast návrhu je rozdělena na velké množství samostatných proměnných, jejichž vliv na strukturu je počítán a optimalizován pomocí řady iterací. Velký počet proměnných umožňuje uživateli vytvořit jakýkoliv vzor výtzuže v návrhové doméně. [28]



Obrázek 17 Ukázka různě vytvořených povrchů [28]

Mezi příklady využití patří optimalizace krycího panelu klimatizačního systému provozovaným vysoce výkonným strojním zařízením. Ekvivalent výkonu byl použit jako objektivní funkce v optimalizačním postupu pro snížení vibrací vyzařovaného z povrchu panelu. Flexibilita úpravy běžně používaného tlumení může učinit v kombinaci s topografickou optimalizací vhodný přístup k dalšímu snižování hluku. [29]



Obrázek 18 Topograficky optimalizovaná součást [29]

Dalším příkladem přínosu topografické optimalizace je také snižování celkové hmotnosti vozidla, což vede ke snížení spotřeby paliva a zlepšení kvality životního prostředí. Kromě toho se dbá i na vznikající hluk během jízdy. Jednou z existujících metod je právě použití topografické optimalizace, která při správném výpočtu dokáže snížit radiční hluk. Jde o minimalizaci celkové povrchové rychlosti u skořepinových prvků.

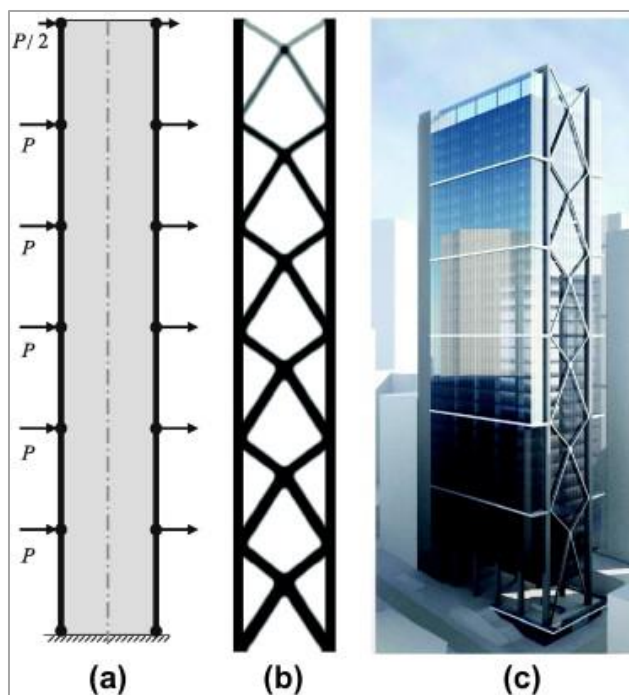
## 4 Užití topologické optimalizace

### Architektura

Motivací pro užití topologické i strukturální optimalizace je snaha nalézt rovnováhu mezi funkčností a neotřelým designovým návrhem. Topologická optimalizace tak slouží k minimalizaci materiálu a zároveň jako nástroj generování návrhových alternativ a vytvoření efektivních návrhů. V této situaci se minimalizují ústupky jednotlivých odvětví, a není třeba obětovat návrhovou část kvůli celkové funkčnosti.

Topologická optimalizace je matematická metoda, která dokáže vypočítat optimální rozvržení materiálu, při předem zadaných i žádaných podmínkách. Ať už se jedná o kritické zatížení či topologicky optimalizované nosníky. Velmi často je TO používána také jako další krok, který navrhne celkové rozložení materiálu nebo vytvoří inovativní design.

Ve fázi koncepčního návrhu výškové budovy se většina obav týká celkové tuhosti, vzpěru a bočního zatížení. Na obrázku je znázorněn koncepční návrh 288 metrů vysoké budovy v Austrálii, který poukazuje na využití topologické optimalizace. Část a) zobrazuje počáteční podmínky, b) zapojení topologické optimalizace a c) konečný design inspirovaný výsledkem TO. V této studii nebyly aplikovány žádné omezení rozvržení, což poskytuje celkovou větší estetičnost budovy. [31]



Obrázek 19 Ukázka konceptu budovy [31]

Dalším příkladem spojení topologické optimalizace a architektury může být předpjatý most, který byl navržen a vyroben na univerzitě v Gentu. Nejedná se však o první 3D betonový tištěný most. Ukazuje příklad, jak lze topologický design v kombinaci s 3D tiskem využít pro prezentaci efektivnější struktury s nižším využitím materiálu.

Most byl vymodelován a jeho tvar byl poté upraven pomocí použití topologické optimalizace s cílem snížení spotřeby materiálu. Takové řešení přináší jednak svobodu v návrhu a také ekologickou a ekonomickou výhodu. Tisk betonového mostu v laboratorním měřítku přináší možnost výzkumných směrů, jelikož umožňuje studovat různé varianty technologie tisku. Například zkoumat chování tekutiny a mechanické vlastnosti po vyschnutí. [32]



Obrázek 20 Předpjatý betonový most [32]

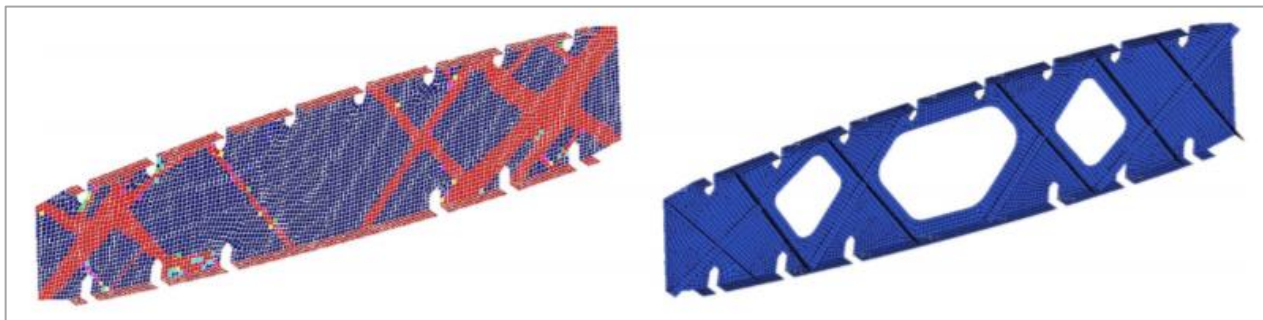
## Letecký průmysl

Topologická optimalizace se stala efektivním nástrojem pro vytvoření designu s nejnižší možnou hmotností za předem daných mechanických podmínek. To jsou vlastnosti, které jsou velmi žádané zvláště v leteckém a kosmickém inženýrství. Topologická optimalizace byla uznána jako jedna z nejslibnějších technologií pro redistribuci rozložení materiálu.

Příkladem využití může být demonstrace celého procesu TO při úpravě žeber náběžné hrany u Airbusu A380. Nejprve byly zajištěny počáteční parametry a celkové zvýšení stability. Začleněním omezení při výrobě a požadovaných mechanických vlastnostech, byla provedena podrobná optimalizace. Díky které tak došlo k výraznému snížení hmotnosti při splnění všech požadavků, hlavně co se týká mechanických vlastností. Na



následujícím obrázku je naznačen díl, který prošel procesem topologické optimalizace (vlevo) a přemodelovaný model (vpravo). [33]

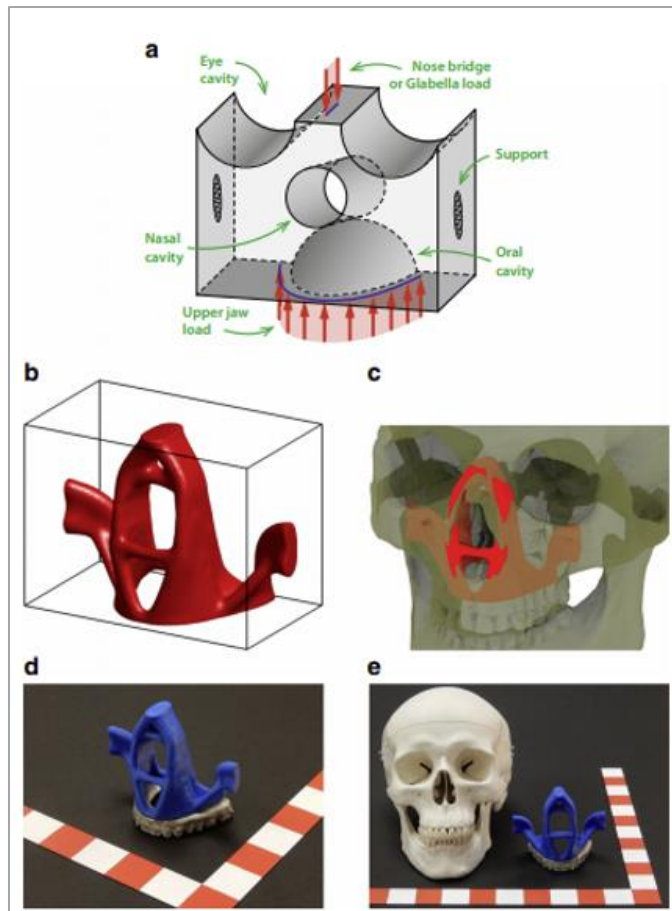


Obrázek 21 Topologicky optimalizovaný návrh a jeho přemodelovaný díl [33]

### Lékařství

Současné možnosti obnovení vzhledu a funkčnosti lidského těla po těžkém traumatu, bývají pouze částečné. Pacienti, kteří trpí osteoporózou, rakovinou, malformací či dalšími onemocněními, vyžadují výměnu kostní struktury. Jedná se o dlouhý proces, během kterého je velmi těžké vytvořit vzhled a funkčnost originální kosti.

Strukturní optimalizace a technologie aditivní výroby nabízejí možnost změny v současných lékařských postupech při těchto diagnózách. Vzhledem ke strukturálním, biologickým, výrobním a chirurgickým požadavkům, lze tento problém zformulovat. Řešením je originální díl, který bude vyroben dle daných nároků pacienta a zdravotní funkčnosti. Na obrázku je znázorněna rekonstrukce obličeje s kraciofaciálním syndromem. Část a) poukazuje na všechny proměnné, které je třeba brát v potaz; b) topologicky optimalizována součást; c) návrh, jak bude součást vypadat na lidské lebce; d) vytištěná součást metodou FDM, s modelem pacientových zubů pro úplnost; e) porovnání s lebkou pro dokreslení situace a celkové představě o implantátu. [34]



Obrázek 22 Rekonstrukce obličeje [34]

## Design

Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace má mnoho podob využití napříč odvětvími. Další zmínka se týká použití v oblasti designu a snahu ozvláštnit podobu zaběhlých komponent. Jednou z nich je například optimalizace dílu truck – osa na skateboardu, kdy student inženýrství Phillip Manger uplatnil své znalosti. Díky tomu, že to byl jediný díl na konstrukci skateboardu, který on do té doby nezkusil vyrobit, plán byl jasný. Většinou je tato součást vyráběna z hliníku, on se ale rozhodl změnit materiál na titan, který je výrazně těžší. Má přibližně dvojnásobnou hustotu než hliník. Při použití optimalizace však konečný díl vykazoval snížení potřebného materiálu. [35]



Obrázek 23 Standartní podoba dílu "truck" - osa [35]

Výsledná součást obsahuje komplikované mřížky, které zajišťují strukturální integritu s co nejmenším množstvím materiálu vedoucí ke snížení hmotnosti. Ani tento díl nelze vyrobit tradičními výrobními technologiemi. Jedním z cílů bylo tedy i prozkoumat limity při využití technologie kovového tisku, přesněji minimální velikost prvku. [35]



Obrázek 24 Topologicky optimalizovaný díl "truck" [35]

Dalším příkladem využití v designu, ale i ve funkčnosti topologické optimalizace je brzdový třmen z dílny Bugatti. Součást je vytvořena ze slitiny titanu, označení Ti6Al4V. Jedná se o materiál, který je často používán v leteckém a kosmickém průmyslu, pro vysoce namáhané díly. Nově navržený brzdový třmen váží pouze 2,9 kg při délce 41 cm, šířce 21 cm a výšce 13,6 cm. Ve srovnání s aktuálně používanou hliníkovou komponentou, je tento díl lehčí o 40% a zajišťuje vyšší pevnost.

Tisk brzdového třmenu probíhal nanášením titanového prášku, vrstvu po vrstvě. Každá vrstva byla roztavena 4 lasery. Celkový čas tisku byl 45 hodin, s 2213 jednotlivými vrstvami. Po dokončení finální vrstvy byl zbývající titanový prášek odstraněn, vyčištěn a konzervován pro opětovné použití. V komoře zůstal vytištěný díl s nosnou konstrukcí, dokud nedojde k tepelnému zpracování. Tepelné zpracování probíhalo dle ověřených

postupů Bugatti tak, aby došlo k odstranění zbytkových pnutí. Poté byly odstraněny nosné konstrukce a součást byla oddělena od svého podnosu. V další fázi dochází k vyhlazování povrchu kombinovaným mechanickým, fyzikálním a chemickým procesem, který vede ke zvýšení únavové pevnosti. Posledním krokem je opracování funkčních povrchů na pětiosé frézce, které trvá dalších 11 hodin. Výsledkem práce je jemně tvarovaný díl s tloušťkami stěn minimálně 1 milimetr a maximálně 4 milimetry. [36]



Obrázek 25 Bugatti brzdový třmen [36]

## 5 Proces topologické optimalizace

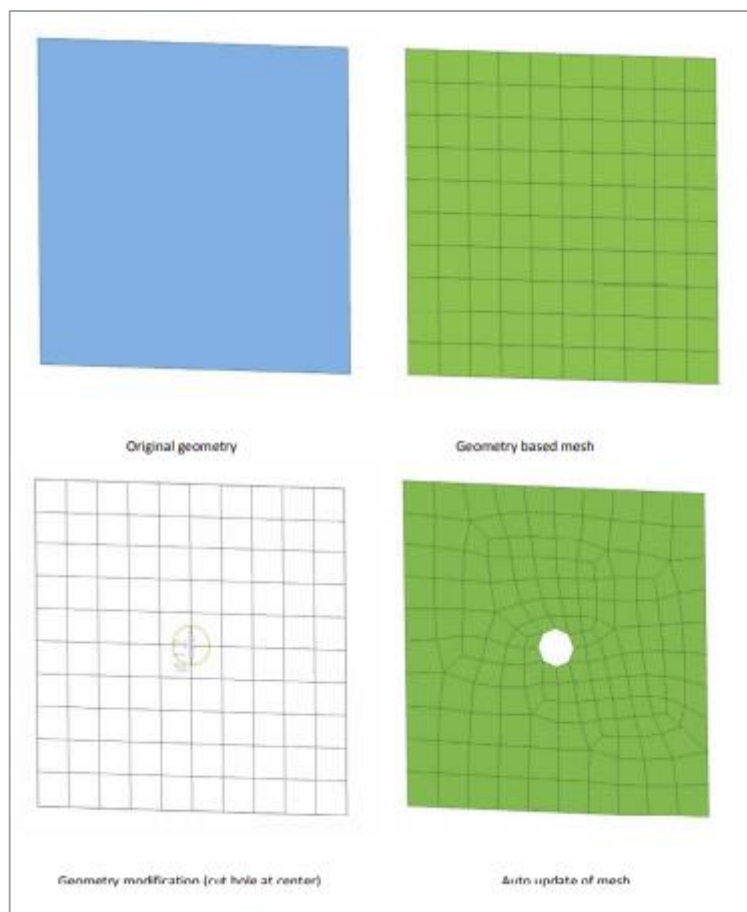
Samotný proces topologické optimalizace se odvíjí od programu, ve kterém pracujeme. Jednotlivé mezikroky se mohou decentním způsobem lišit. V mé práci bude proces simulován v programu Altair Inspire 2019.4, ve kterém tedy poté i samotná topologická optimalizace proběhla. Je nutné poznamenat, že práce v tomto programu je velmi intuitivní.

### 5.1 Modelování

Nejčastěji začíná celkový proces topologické optimalizace vložení součásti v jednom z podporovaných formátů. Mezi ně patří – STEP, STL, ACIS, IGES, Inspire Model, Parasolid či Wavefront. Zároveň je potřeba si hlídat, zda je importovaná geometrie součásti úplná. V některých případech se může stát, že povrch součásti není uzavřený nebo jsou jednotlivé části povrchu až příliš malé. Ty mohou způsobit neshody při spojování celkového povrchu.

### 5.2 Síťování

Jakmile je geometrie v odpovídajícím stavu, je nutné vytvořit síť. Ta se má co nejvíce přibližovat celkové geometrii součásti. Je možnost formovat síť paprsků (1D), skořepiny (2D) nebo plnou síť (3D). Výběr zasíťování souvisí s kvalitou sítě a odráží se i na konečné kvalitě generovaných výsledků. To vše souvisí s počtem prvků/ uzlů, a tedy i s celkovým výpočetním časem. V některých případech se upřednostňuje 1D/2D síť před 3D. Například u optimalizace plechových dílů se zvýhodňuje 2D aproximace, jelikož se snižuje čas výpočtu. Je snaha, aby zasíťování byl automatizovaný proces. Je však potřeba zkontrolovat kvalitu a propojení. Najde – li se problém, je třeba ručně vyřešit situaci či přemodelovat základní geometrii dílu/ upravit problémové části prvku – duplikované povrchy, malé otvory či průniky komponent. Na následujícím obrázku je vidět ukázka zasíťování součásti. Vlevo nahoře je originální geometrie, vpravo nahoře zasíťování. Vlevo dole je ukázka přidání otvoru v prostředku. Vpravo je viditelná změna zasíťování vytvořená programem tak, aby došlo k zachování kvality povrchu a nevznikaly další chybné situace. [37]



Obrázek 26 Ukázka zasíťování [37]

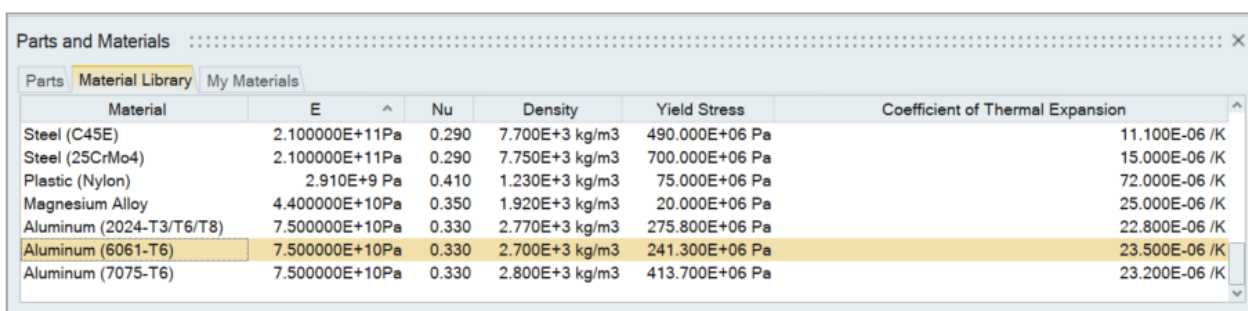
Je třeba dát si pozor na kritické oblasti. Jedná se hlavně o místa, kde dochází k vysokému namáhání. Zde je doporučeno hustší zasíťování. Což je znatelné na následujícím obrázku, kde je zachycena deformace ráfku kola.



Obrázek 27 Ukázka zasíťování součásti [38]

## 5.3 Materiál a jeho mechanické vlastnosti

Důležitým krokem je zvolit materiál, včetně jeho mechanických vlastností. Mezi vybrané charakteristiky patří: modul pružnosti  $E$ , Poissonova konstanta  $\nu$ , hustota, mez pevnosti a koeficient teplotní roztažnosti. Program nabízí základní databázi nejběžnějších materiálů. Samozřejmě je možné si přidat do knihovny vlastní materiál, taktéž se všemi potřebnými charakteristikami. Výsledek samotné optimalizace souvisí se zvoleným materiálem.



Material	E	Nu	Density	Yield Stress	Coefficient of Thermal Expansion
Steel (C45E)	2.100000E+11Pa	0.290	7.700E+3 kg/m3	490.000E+06 Pa	11.100E-06 /K
Steel (25CrMo4)	2.100000E+11Pa	0.290	7.750E+3 kg/m3	700.000E+06 Pa	15.000E-06 /K
Plastic (Nylon)	2.910E+9 Pa	0.410	1.230E+3 kg/m3	75.000E+06 Pa	72.000E-06 /K
Magnesium Alloy	4.400000E+10Pa	0.350	1.920E+3 kg/m3	20.000E+06 Pa	25.000E-06 /K
Aluminum (2024-T3/T6/T8)	7.500000E+10Pa	0.330	2.770E+3 kg/m3	275.800E+06 Pa	22.800E-06 /K
Aluminum (6061-T6)	7.500000E+10Pa	0.330	2.700E+3 kg/m3	241.300E+06 Pa	23.500E-06 /K
Aluminum (7075-T6)	7.500000E+10Pa	0.330	2.800E+3 kg/m3	413.700E+06 Pa	23.200E-06 /K

Obrázek 28 Ukázka knihovny materiálů

Pro správné fungování výpočtu je důležité přiřadit vlastnosti materiálu. Modul pružnosti  $E$ , který definuje vztah mezi napětím a poměrnou deformací:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa]$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu [Pa],  $\sigma$  je napětí v tahu [Pa] a  $\varepsilon$  poměrná deformace [-].

## 5.4 Zatížení, omezení a druh analýzy

Dalším krokem je zaznamenání různých omezení a zatížení, která budou na součást působit i v reálném čase. Různé zatěžovací stavy prezentují rozdílné podmínky u stejného modelu. Zároveň jsou přidány i informace ohledně výběru analýzy řešení. Model vytvořený metodou konečných prvků obsahuje jednotlivé uzly, elementy, vlastnosti materiálu, zatížení a omezení.

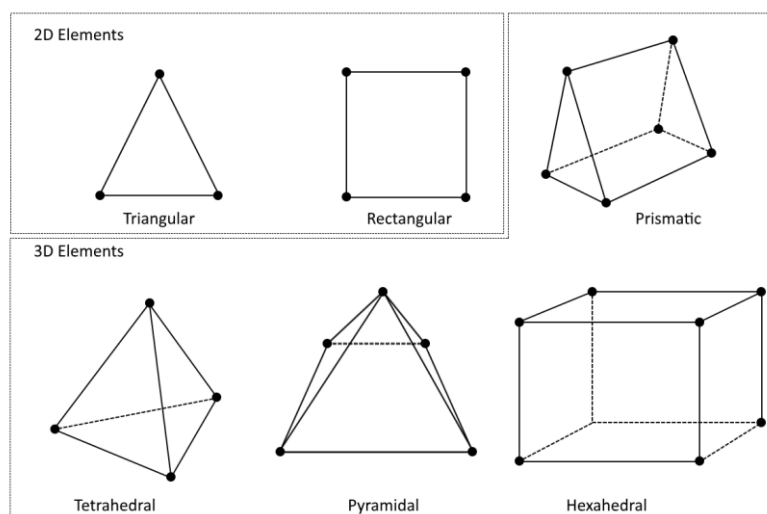
Program umožňuje mimo topologické i topografickou a lattice optimalizaci. U topologické optimalizace lze vybrat, zda upřednostňujeme minimalizovat hmotnost dílu, maximalizovat tuhost nebo vynucené kmitání. Lattice optimalizace umožňuje vyplnění návrhového prostoru mřížkovou strukturou. Je nutné zvolit délku elementu, jeho minimální a maximální průměr.

## 5.5 Výpočet

Při navolení všech potřebných charakteristik a stanovení minimální a maximální tloušťky elementu dochází k výpočtu.

Během výpočtu může také dojít k chybám. Mezi ty nejtypičtější patří – kvalita elementu, neplatné vlastnosti materiálu, špatné navolení materiálových charakteristik, nedostatečné omezení modelu nebo špatné navolení zátěžových charakteristik. Tyto chyby jsou však snadno vyřešitelné, program i sám napoví, kde se chyba nachází. Po vyřešení je třeba zopakovat výpočet.

Simulační technologie je založena na metodě konečných prvků. První zmínky o této metodě se datují cca 60 let zpátky, kdy byly snahy předpovídat reakci složitých částí dle různých vstupů. Při této metodě dochází k rozdělení geometrie součásti na velmi malé, pravidelné oblasti, které se nazývají konečné prvky. Jednoduše řečeno, jedná se o rozdělení objemu či povrchu na tisíce, či dokonce miliony elementů. Samotné elementy mohou mít různé konfigurace. [37,39]



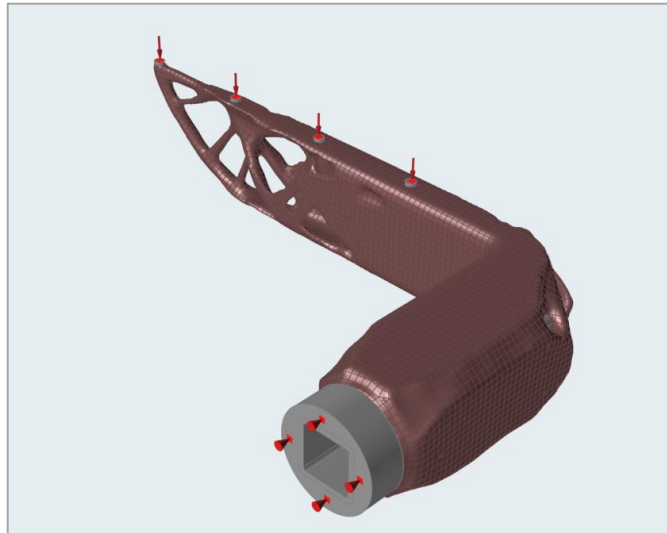
Obrázek 29 Umístění uzlů u 2D a 3D elementů [38]

## 5.6 Vizualizace

Po dokončení úspěšného výpočtu optimalizace přichází na řadu vizualizace optimalizované součásti. V přehledných grafech je znázorněno napětí a namáhání, jak se součást zachová při navolených počátečních charakteristikách. Na základě výsledků může být součást případně upravena. Jelikož v mnoha případech slouží celkový



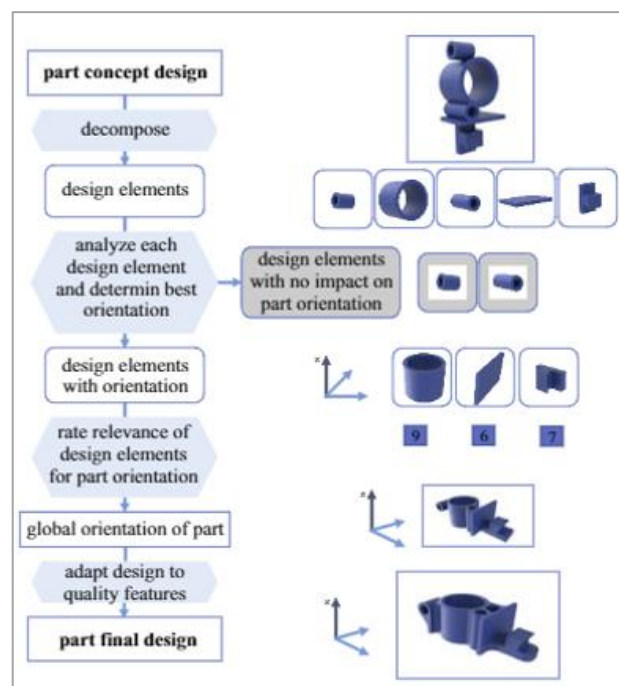
proces topologické optimalizace pouze jako inspirace, jakým směrem dále postupovat při designu součásti. Zároveň se také prodlužuje strávený čas nad designem dílu. Po úpravě či přemodelování dílu je vhodné provést analýzu dílu, která nám zkoumané charakteristiky opět přehledně ukáže, včetně případných problémových míst na dílu. Na následujícím obrázku je ukázka topologicky optimalizovaného dílu, u kterého došlo k nutné úpravě povrchu. [37]



*Obrázek 30 Topologicky optimalizovaný díl, částečně upravený a vyhlazený*

## 6 Technologická pravidla návrhu dílu při použití aditivních technologií

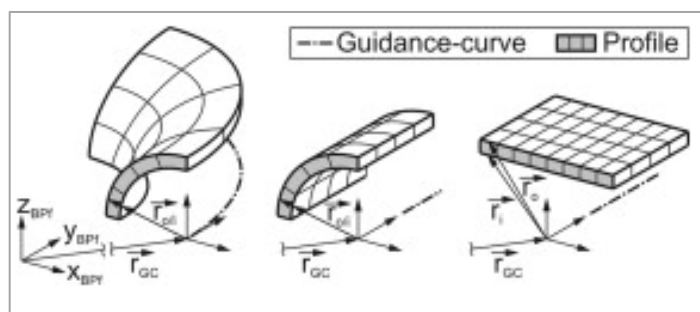
Principy návrhu umožňují využívat svobodu designu aditivních technologií a zároveň kreativním způsobem obejít stávající omezení, která jsou do procesu vnášena. Respektování rad tak může vést ke zvýšení kvality dílů a snížení nákladů a úsilí při nutném zpracování po dotištění dílu. Výsledná doporučení, která lze z dostupné literatury vyčíst, vycházejí ze zkušeností vývojářů. Na základně výroby dílu po jednotlivých vrstvách existuje rozdíl mezi geometrií součásti ve směru tisku a v geometrii kolmou ke směru tisku. Mezi kvalitativní prvky, které jsou závislé na orientaci součásti patří rozměrová přesnost, kvalita povrchu, náklady na tisk, čas tisku, stabilita dílu, deformace, objem podpůrného materiálu, potřeba následného zpracování a dostupnost podpůrných struktur. Včasné určení správné orientace umožňuje změnit tvar dílu pro zlepšení kvalitativních charakteristik. Respektování těchto doporučení má velký význam například u technologie SLM, kde je výsledná kvalita dílů závislá na potřebě nosné konstrukce a orientace součásti. Jednou z možností, jak správně určit vhodnou orientaci dílu je rozdělení koncepčního návrhu součásti na několik konstrukčních prvků a ty postupně analyzovat. [40]



Obrázek 31 Rozložení součásti na konstrukční prvky [40]

Ačkoliv aditivní výroba poskytuje mnoho výhod, technologie je stále zřídka kdy používána pro výrobu dílů pro konečné použití. Do procesu vstupuje mnoho omezujících faktorů. Jedním z nich je nedostatečná dostupnost komplexních návrhových pravidel pro aditivní výrobu. Aby došlo k podpoře vhodného designu dílu, jsou vyžadována pravidla, která jsou nezávislá na funkcích, snadno přenositelná na jednotlivé návrhy a srovnatelná napříč různými technologiemi výroby.

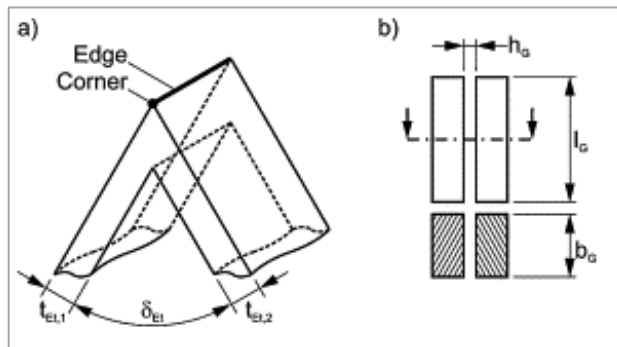
Metoda pro vývoj návrhových pravidel je dána definicí základních prvků. Jedná se o geometrické prvky, které jsou často užívány při návrhu technologických dílů. Standartní prvky jsou rozděleny do 3 skupin – základní prvky (elementární geometrické tvary), přechodové prvky (oblasti, ve kterých jsou základní prvky vzájemně kombinovány) a hromadné struktury (uspořádání dvou a více základních prvků a jejich přechodů). Každý standartní prvek má přiřazené své atributy, například vnější poloměr válce. Technologickou součást tak lze navrhnout pomocí užití a vzájemné kombinaci standartních prvků. Aby došlo k podpoře celkové vyrobitelnosti dílu, je třeba stanovit rozsahy hodnot atributů. Poté jsou prvky vyrobeny s různými variantami hodnot a je zkoumána jejich kvalita. Na základě tohoto výzkumu lze odvodit návrhová pravidla. Základní prvky lze popsat jako elementární, matematicky definované geometrické tvary, které vznikají pohybem profilu podél vodící křivky. Mohou tak nastat tři typy základních prvků – nezakřivené /jednoduše zakřivené / dvojitě zakřivené. Změnou definic naváděcích křivek a profilů lze tvořit a jasně umísťovat geometrie typu koule, válec nebo vnitřní deska. [41]



Obrázek 32 Obecné formy základních prvků – dvojitě zakřivené / jednoduše zakřivené / nezakřivené [41]

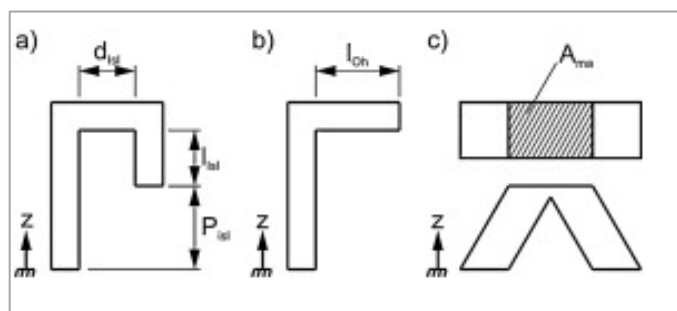
Přechody prvků vznikají vzájemnou kombinací předem definovaných základních prvků. Díky výrobě dílu po vrstvách lze rozlišit dva typy – pevně spojené a nelepené přechody prvků. Tvary obou typů přechodů se mohou výrazně lišit, dle kombinace základních prvků, jejich konkrétními tvary a jejich polohami. Navzdory rozmanitosti však

přechodové prvky často vykazují opakující se stejné atributy. Mezi ty patří tloušťka, přechodový úhel, hrany i rohy. Mezery mezi kombinovanými prvky jsou nutné k vytvoření nespojených přechodů. Ty jsou popisovány pomocí výšky mezery, délky a šířky.



Obrázek 33 Přechody pevně vázaných (vlevo) a nevázaných prvků (vpravo) s jejich atributy [41]

Hromadné struktury popisují prostorové uspořádání základních prvků a jejich přechody. Podobně jako u přechodných prvků, lze stejné struktury tvořit pomocí různých kombinací základních prvků. Mezi představitele patří – ostrovy, přesahy a akumulace materiálu. Ostrovy jsou prvky, které začínají ve vyšší rovině než struktura hlavní části a spolu poté rostou. Jsou popsány výchozí polohou, délkou a vzdáleností od struktury hlavní části. U přesahů se jedná o prvky, které překrývají dílčí vrstvy pod sebou v rovnoběžném směru s rovinou součásti. Jsou charakterizovány pomocí délky. Akumulace materiálu je oblast, kde se na malé ploše hromadí velké množství materiálu a je charakterizována pomocí velikosti oblasti, ve které k akumulaci dochází.



Obrázek 34 Ostrov, přesah a akumulace materiálu [41]

Mezi zkoumané charakteristiky při tisku patří – tloušťka přechodů pevně spojených prvků, výška a šířka mezer u nespojitých přechodových prvků, délka převisů, výchozí pozice ostrovů a rozměry akumulace materiálu. Dle provedených zkoušek byly doporučeny uvedené rady při tvorbě dílu, aby byla minimalizována chyba při tisku dílu.

Zkoušky tisku probíhaly třemi různými technologiemi – laserové slinování (LS), laserové tavení (LM) a FDM – postupné nanášení roztaveného materiálu.

## Přechody pevně spojených prvků

Tabulka 1 Přechody pevně spojených prvků

Technologie	DMLS	SLM	FDM
<b>Tloušťka</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tloušťky přechodů lze volit libovolně, protože nemají vliv na přesnost tvaru prvků. Měly by být voleny tak, aby jejich průřezy v rovině zůstaly stejné nebo se zmenšovaly.</li> </ul>		
<b>Hrany</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Je třeba se vyhnout vnějším i vnitřním ostrým hranám. Pro větší přesnost by měly být vždy zaoblené. Poloměry korelují s vnějšími poloměry jednoduchých zakřivených prvků.</li> <li>- Hrany tvořené krajními body by měly být otupeny kolmo k rovině tisku. Rozměry otupených ploch by měly být větší než tloušťky nezakřivených prvků.</li> <li>- Vnitřní hrany by měly být zaoblené, aby bylo snadnější odstranění nosných struktur, například prášek.</li> </ul>		

## Přechody nevázaných prvků

Tabulka 2 Přechody nevázaných prvků

Technologie	DMLS	SLM	FDM
<b>Výška mezery [a]</b>	$h_G \geq 0,6 \text{ mm}$	$h_G \geq 0,2 \text{ mm}$	$h_G \geq 0,4 \text{ mm}$
<b>Šířka mezery</b>	Pokud je přístup k mezeře umožněn po celé šířce, lze její hodnotu zvolit libovolně.		
<b>Délka mezery [b]</b>	$l_G \leq 8,0 \text{ mm}$ ( $h_G \geq 1,2 \text{ mm}$ ) $l_G \leq 30,0 \text{ mm}$ ( $h_G \geq 1,8 \text{ mm}$ ) $l_G \leq 50,0 \text{ mm}$ ( $h_G \geq 2,4 \text{ mm}$ )	$l_G \leq 50,0 \text{ mm}$ ( $h_G \geq 0,2 \text{ m}$ )	Hodnota lze zvolit libovolně. Uvnitř by neměly být žádné podpůrné struktury.

**[a] Výška mezery** – minimální výška mezery by měla být stanovena na takové hodnotě, aby se dosáhlo malých rozměrových odchylek, ale stále se zajistilo odstranění nosných struktur.

**[b] Délka mezery** – Zvolená délka musí být dostatečně krátká, aby bylo umožněno.

## Hromadné struktury

Tabulka 3 Hromadné struktury

Technologie	DMLS	SLM	FDM
<b>Délka přesahu</b> [c]	U technologie LS lze délka převisu volit libovolně, protože stabilizace je zajištěna nosnou konstrukcí.	$l_{Oh} \leq 2,0 \text{ mm}$	$l_{Oh} \leq 1,8 \text{ mm}$
<b>Ostrovy</b> [d]	U technologií LS a LM může být jejich výchozí pozice libovolná, nepřinášejí do procesu ani delší dobu tisku dílu.	U technologie FDM by měla být výchozí pozice co nejnižší, vyšší pozice prodlužuje zvyšuje čas tisku i množství potřebného podpurného materiálu.	
<b>Akumulace materiálu</b>	-	$l_{Ma} \leq 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$	-

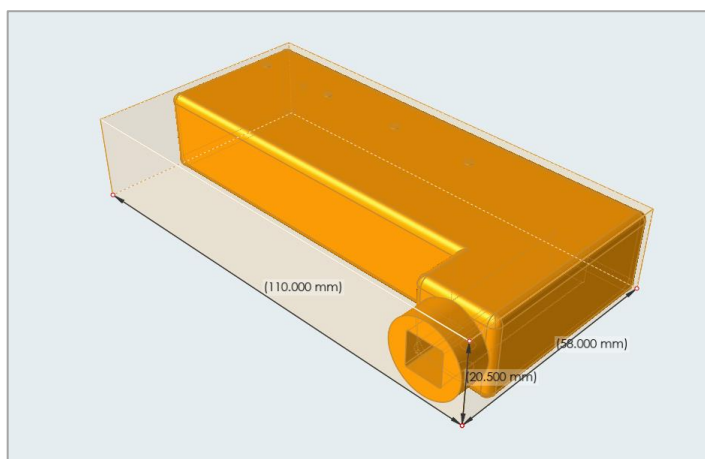
**[c] Délka přesahu** – U technologií LM a FDM by měla být délka převisu dostatečně krátká, aby byla zajištěna robustní vyrobiteľnosť daná jednotlivými vrstvami a nedocházelo k ohybu nebo zhroucení dílu při tisku.

**[d] Ostrovy** – U technologie LM je třeba se celkové akumulaci vyhnout, snahou je dodržet maximální rozměry, aby byla zaručena vyrobiteľnosť. [41]

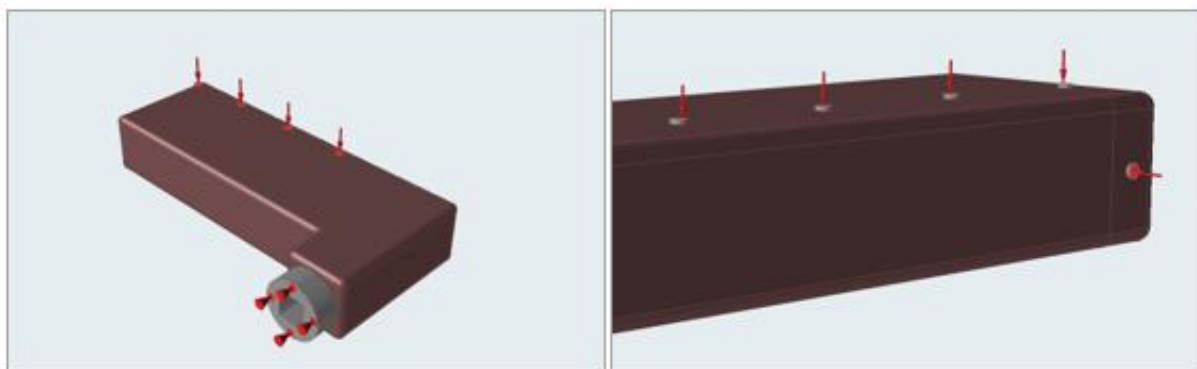
## 7 Návrh demonstrátoru

Cílem této práce bylo praktické osvojení si celkového procesu topologické optimalizace. Od návrhu dílu až po jeho realizaci. Zároveň také seznámení potenciálních uživatelů s procesem topologické optimalizace, pro zajištění maximální přístupnosti tématu byla zvolena součást běžného užívání, jejíž funkce a vzhled jsou známé. Vybranou součástí se stala klika u dveří. Tu si dokáže každý velmi snadno představit. Zároveň byla snaha o její originální design, ke kterému topologická optimalizace měla přispět.

Prvním krokem byl návrh kliky s maximálním možným návrhovým prostorem tak, aby výsledný optimalizovaný díl napověděl, jakým směrem vést další návrhy kliky. Jedná se o základní kvádrové provedení, na kterém je umístěno v daných rozstupech 5 válcových ploch. Ty slouží ke stejnému umístění sil, velikostně 3 N, 3 N 6 N a 8 N. Poslední síla je umístěna na koncovou část kliky, na pravý okraj, o velikosti 3 N.

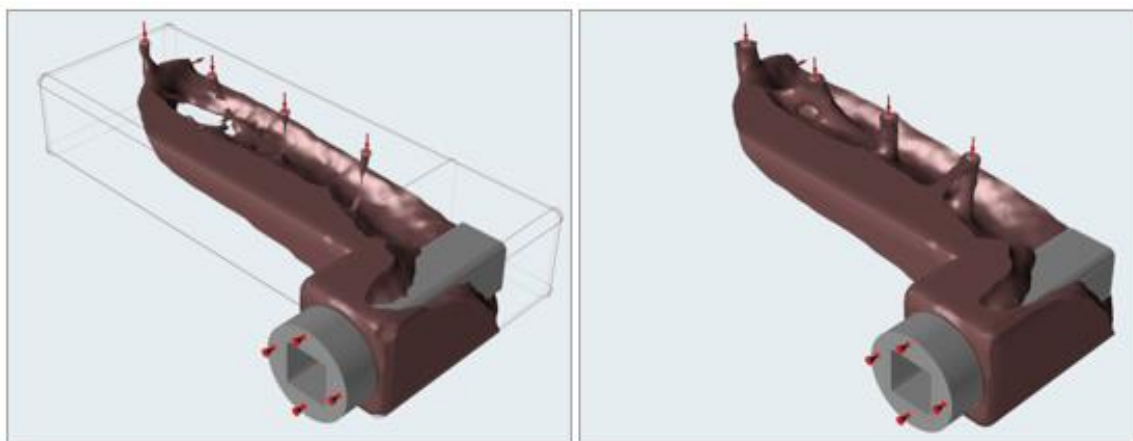


Obrázek 35 Základní rozměry dílu



Obrázek 36 Model pro volnou optimalizaci, včetně umístění podpor a sil

Výsledná topologická optimalizace poukázala, ve kterých místech na dílu bude docházet ke kumulaci materiálu a kde naopak nikoliv. Vznikla tak místa, která mohou vést k bezpečnostním rizikům. Ve fázi konečného návrhu je proto nutné vytvořit spojitě provedení mezi tělesem kliky a připojovacími rozměry.



Obrázek 37 Výsledek topologické optimalizace – ukázka možnosti změny % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru

Vlastnosti základního a topologicky optimalizovaného dílu jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 4 Porovnání výsledných charakteristik u volného modelu

Materiál	ABS		
	Základní díl	Volná optimalizace dílu Nižší % zastoupení	Volná optimalizace dílu Vyšší % zastoupení
<b>Hmotnost [g]</b>	91,181	23,964	32,85
<b>Maximální Průhyb [mm]</b>	0,9845	2,4552	0,8892
<b>Maximální smykové napětí [MPa]</b>	8,933	26,02	5,957
<b>Kritérium maximálního napětí von Mises [MPa]</b>	15,58	46,07	11,05

Topologickou optimalizací došlo k výraznému snížení hmotnosti modelu. Při porovnání základního dílu a vyššího % zastoupení materiálu vykazoval maximální průhyb mírně nižší hodnotu. U mechanických vlastností došlo k mírnému snížení. Z tabulky lze vidět, že snížením % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru došlo k výraznému zhoršení výsledných charakteristik dílu ve všech zkoumaných veličinách. Kdy program vyhodnotil jako nejlepší variantu ponechání 30 % materiálu v návrhovém prostoru.



Tento návrh nevyhovoval představě, a tak byl navržen díl přímo dle existující kliky, včetně dalších možností optimalizace. Jedná se tedy o 4 modely. Všechny varianty jsou přehledněji zpracovány v následující tabulce. Byly vybrány 2 základní materiály, se kterými budou jednotlivé optimalizace probíhat, ABS a AlSi10Mg. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce. Hodnoty jsou dohledány z materiálových listů. [42,43]

Tabulka 5 Vlastnosti materiálů

Materiál	Modul pružnosti E [GPa]	Poissonova konstanta Nu [-]	Hustota [g/mm <sup>3</sup> ]	Mez pevnosti [MPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [-/K]
ABS	2	0,350	$1,06 \cdot 10^{-3}$	45	$63 \cdot 10^{-6}$
AlSi10Mg	70	0,310	$2,61 \cdot 10^{-3}$	180	$20 \cdot 10^{-6}$

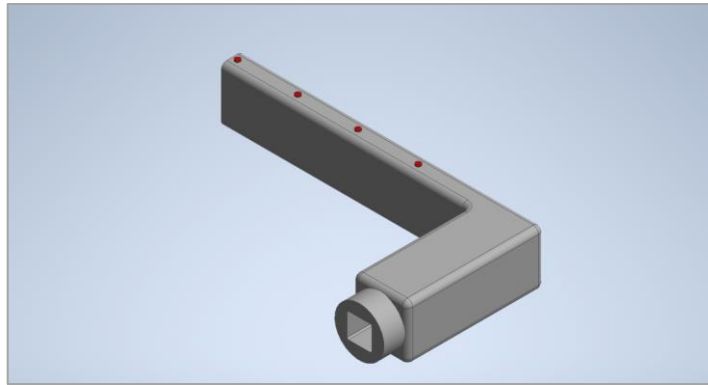
Tabulka 6 Přehled návrhových řešení modelu

Základní model	
Topologicky optimalizovaný díl	Základní model vyplněný mřížkovými strukturami (lattice struktury)
Přemodelování součásti vycházející z TO dílu do finální geometrie	

Jedná se pouze o návrh postupu řešení. Je zřejmé, že budou nutné další optimalizace, ať už se jedná v průběhu procesu ale i změny základního modelu. Jednotlivá řešení budou mezi sebou porovnávána z hlediska úbytku hmotnosti, napětí/ deformace a průhybu.

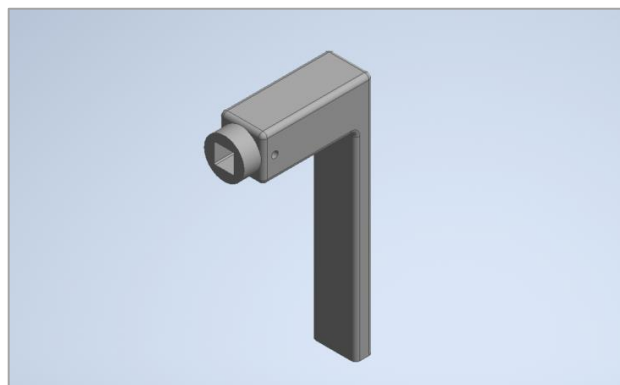
Pro celkové srovnání je důležité provést analýzu i základní součásti, abychom viděli, v jakých oblastech došlo či nedošlo ke zlepšení vlastností součásti.

Inspirací pro model byla existující klika, která byla vymontována, změřena a vymodelována v CAD programu Autodesk Inventor.



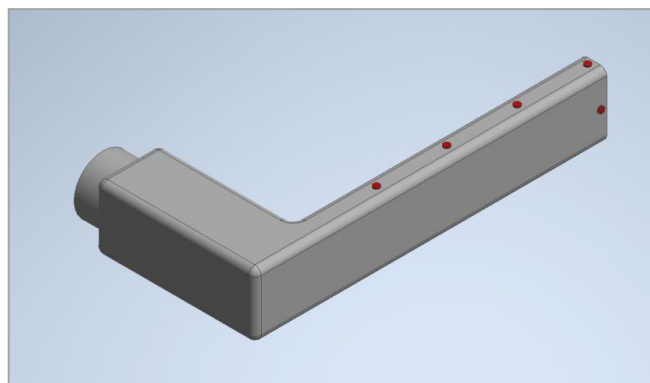
*Obrázek 38 Návrh modelu v programu Autodesk Inventor*

Model obsahuje otvor o průměru 3,5 milimetru, který je umístěn na spodní straně kliky z důvodu estetičnosti a nástrčný otvor na čtyřhran o velikosti strany 9 milimetrů, který obě strany kliky spojuje.



*Obrázek 39 Otvor o průměru 3,5 milimetru*

Zároveň je na model přidáno 5 válcových ploch o průměru 2 milimetry a výšce 0,5 milimetru (červená barva slouží ke zvýraznění). Z důvodu opakujícího se umístění působících sil na kliku, což probíhalo v pozdější fázi procesu topologické optimalizace.



*Obrázek 40 Umístění válcových ploch na model*

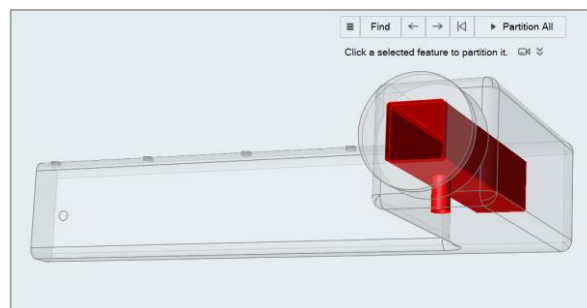
Exportováním modelu do souboru formátu STL končí fáze modelování základní součásti. Poté bylo nutné udělat následující kroky k možnosti provést analýzu dílu a jednotlivé optimalizace.

### **Výběr materiálu**

Po vložení souboru do programu je nutné udělat následující kroky. Výběr materiálu součásti je velmi důležitý. Samotný výpočet topologické optimalizace a její výsledek je závislý na vlastnostech materiálu. Vybrané materiály pro kliku jsou ABS a slitina hliníku AlSi10Mg. Program Altair Inspire nabízí již připravené materiály s uvedenými vlastnostmi, je však i možnost přidat další materiál a navolit je dle materiálových listů. Materiál ABS je nabízen, AlSi10Mg bylo třeba dohledat.

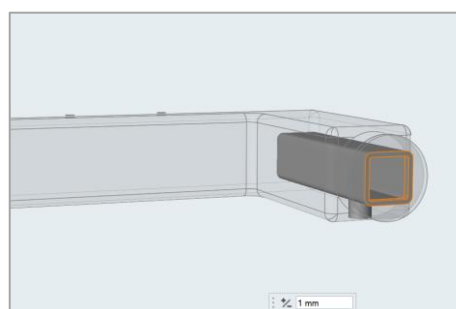
### **Partition – oddělení**

Jedná se o funkci, která odděluje návrhový prostor od nenávrhového, aby došlo k zachování potřebné velikosti otvorů v návrhovém prostoru. V praxi to znamená zachování rozměrů pro pozdější spojení optimalizovaného dílu k jeho navazujícím součástkám.



*Obrázek 41 Výběr k oddělení*

Na obrázcích je vidět oddělení, které zajistí konstantní rozměry otvorů, i přes skutečnost, že se oba nacházejí v návrhovém prostoru. Byla zvolena hodnota 1 milimetr.



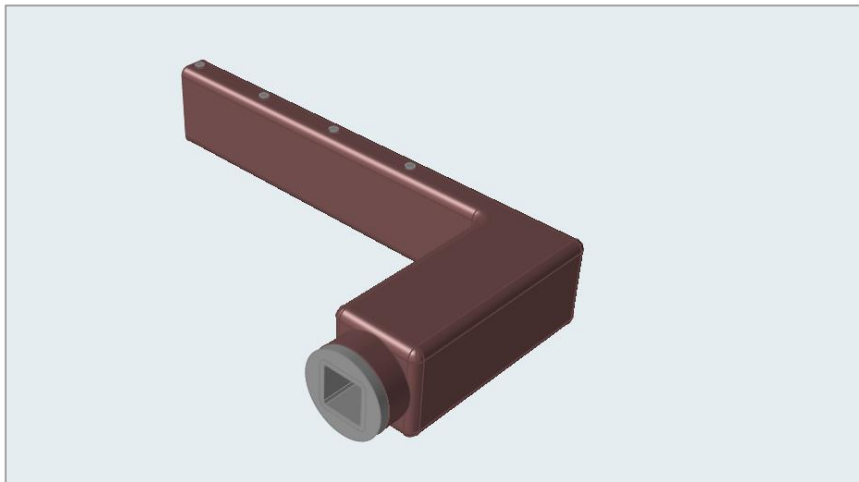
*Obrázek 42 Hotové oddělení*

### **Cut – rozdělení**

Dochází k rozdělení modelu na jednotlivé součásti. Hlavním cílem je oddělení části modelu, která má být optimalizována. Jednalo se tedy o oddělení pomocných válcových ploch a plocha, která doléhá ke dveřím.

### **Boolean – slučování**

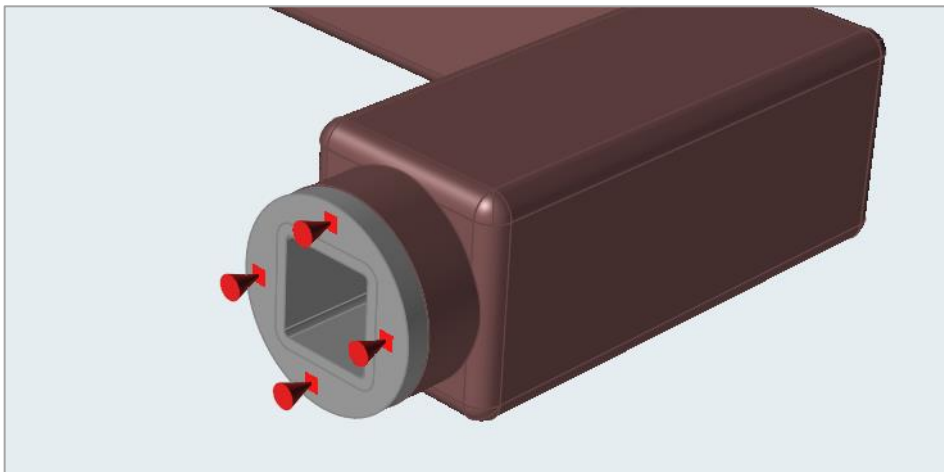
Funkce, která zajišťuje spojení jednotlivých prvků modelu. Tato funkce byla použita ke spojení částí, které jsou v návrhovém prostoru a částí, které nemají být během procesu optimalizovány. Poté už stačilo jen označit vybranou část jako designový prostor. Na obrázku má návrhový prostor hnědou barvu. Šedou barvu mají části modelu, které nijak nezasahují do návrhového prostoru.



*Obrázek 43 Ukázka návrhového prostoru*

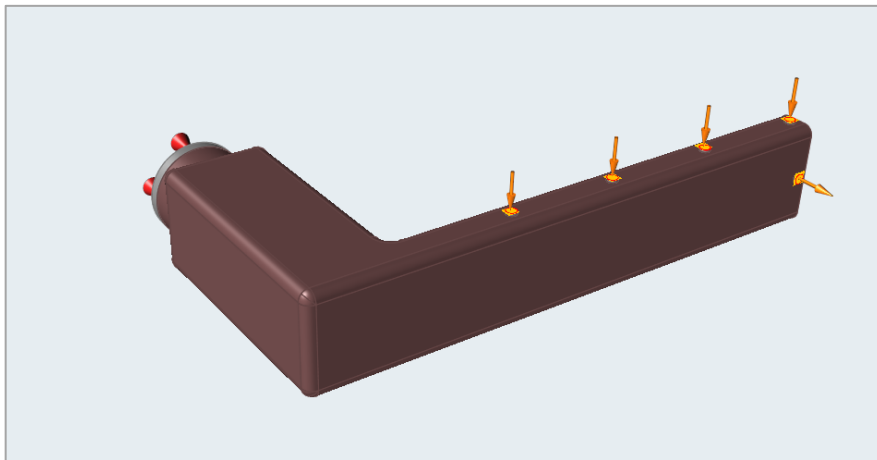
### **Loads – navolení podpor a působících sil**

Byly zvoleny 4 podpory na kontaktní plochu, která přichází do kontaktu s dveřmi.



*Obrázek 44 Podpory*

A poté bylo zvoleno 5 působících sil. Na horní plochu jsou síly umístěny následovně: 3 N, 3 N, 6 N a 8 N. Největší působící síla je na okraji kliky. Poté je ještě přidána síla o velikosti 3 N na pravý okraj dopředu, která slouží k simulaci působícího tahu.



Obrázek 45 Působící síly umístěné na model

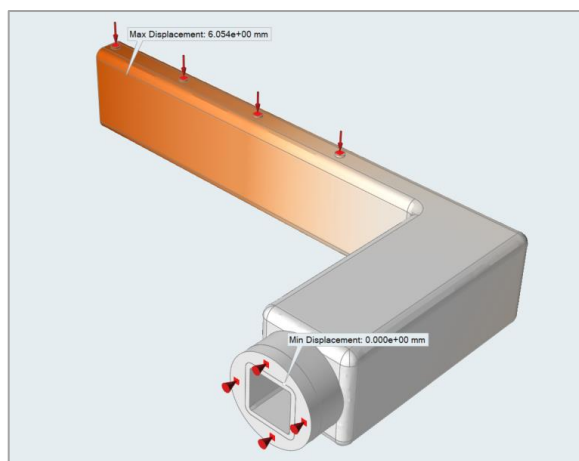
Dalším krokem bylo analyzování základního modelu kliky a jeho chování při zadaných podmínkách. V následující tabulce je uvedena celková hmotnost základního modelu a návrhového prostoru. Z hodnot je patrné, že 90 % součásti je návrhový prostor.

Tabulka 7 Hmotnosti základního modelu a jejich návrhového prostoru

Materiál	ABS	AlSi10Mg
Základní model	34,007	83,734
Design space	31,682	77,919

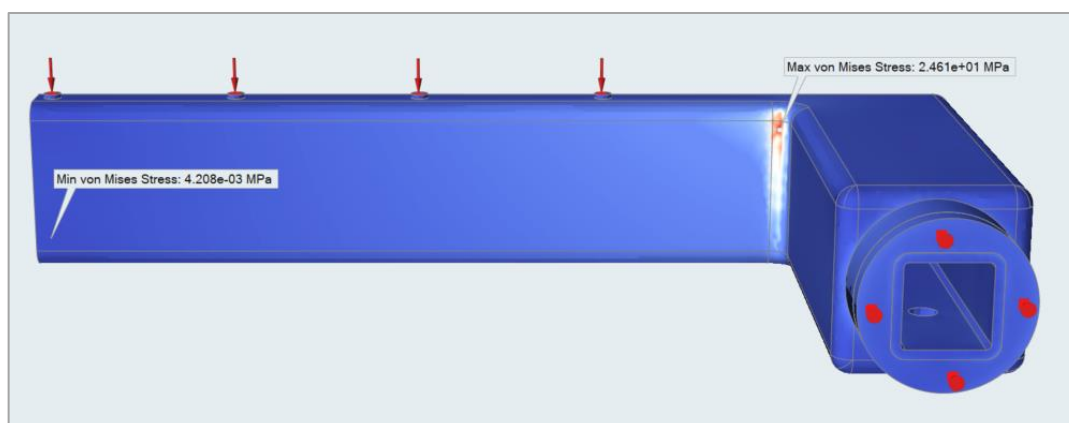
## 7.1 ABS

První ukázkou bude postupná optimalizace a její výsledky, pokud je vybraným materiálem ABS. Jedná se o amorfnní polymer, složený ze třech hlavních složek akrylonitril, butadien a styren. Mezi jeho významné vlastnosti patří odolnost proti nárazu a houževnatost, při nízkých teplotách i dobrá obrobiteľnosť. [44]



Obrázek 46 Výsledek analýzy základního modelu – průhyb

Prvním krokem bylo provedení analýzy původní kliky, bez jakýkoliv úprav. Včetně vyhodnocení tak, aby se v závěru mohla jednotlivá řešení mezi sebou porovnat. Samotná analýza nám nabízí přehledně několik základních charakteristik, které popisují chování součásti při předem zvolených zatíženích.



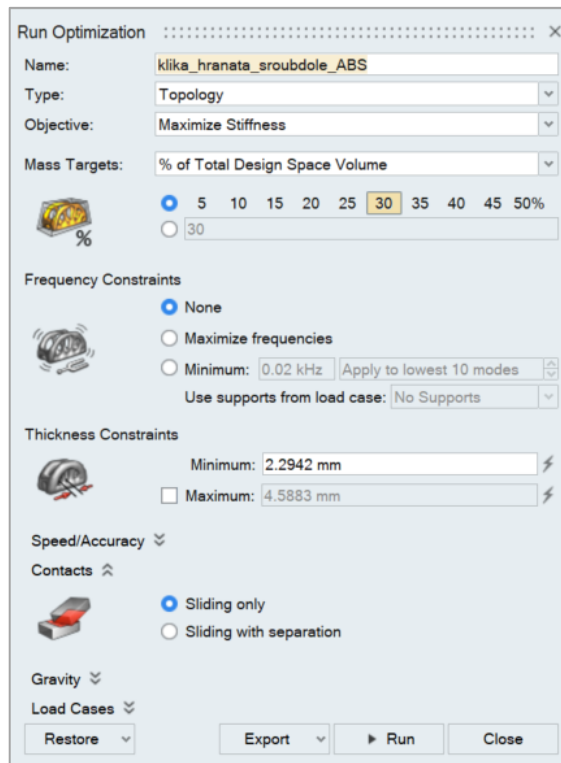
Obrázek 47 Výsledek analýzy základního modelu – kritérium maximálního napětí von Mises

### Nastavení topologické optimalizace

Posledním krokem je poté nastavení podmínek pro výpočet optimalizace. Kde se vybírá druh optimalizace, v tomto kroku se jedná o topologickou. Poté je na výběr, jestli chceme maximalizovat tuhost dílu, minimalizovat jeho hmotnost či omezit frekvenci tak, aby se zabránilo rezonanci s ostatními částmi návrhu.

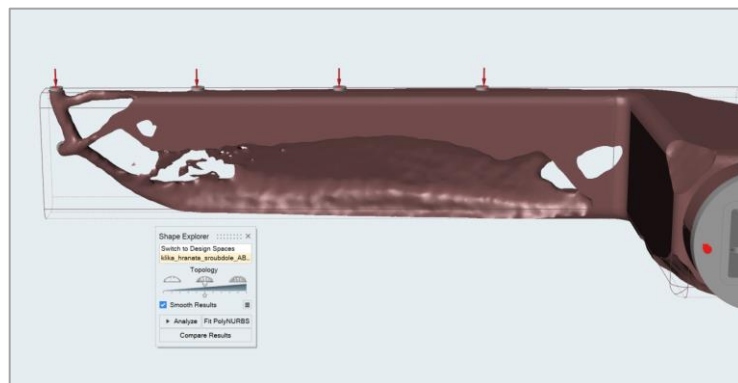
U zvyšování tuhosti zaškrtnáme % množství materiálu, které chceme z původnímu návrhového prostoru zachovat. Poté stanovujeme minimální a maximální tloušťku.

Ta byla v tomto případě zvolena 2,2942 milimetry. S gravitací se v tomto případě nepočítalo. Poté byly zaškrtnuty navolené působící síly a opory do celkového výpočtu. Bez nich by výpočet nemohl proběhnout.



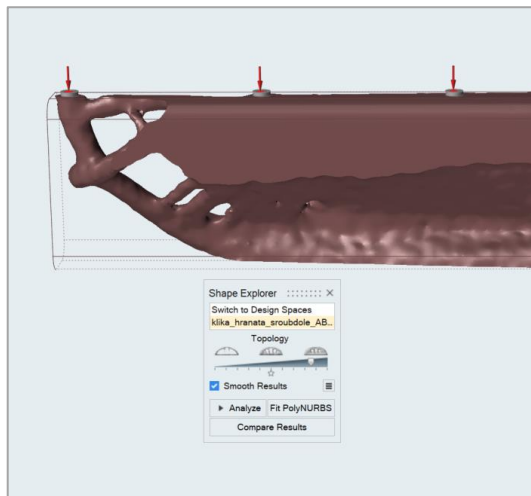
Obrázek 48 Nastavení optimalizace

Samotný výpočet trval 51 minut, hlavně kvůli zvolené minimální příslušné tloušťce stěny. Samotný výpočet může vykazovat neúplné či nepropojené plochy. Po výpočtu lze měnit % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru. Zvýšením % zastoupení tak lze tomuto problému zamezit a dojde tak k propojení těchto ploch. Na následujícím obrázku je zachycen model po dokončení topologické optimalizace.



Obrázek 49 Možnost úpravy procentuálního zastoupení materiálu

Zde je viditelný rozdíl v koncové části kliky, kde došlo k zesílení stěn a celkovému propojení materiálu v dílu.



Obrázek 50 Ukázka změny % zastoupení materiálu v dílu

Pohled 1 zachycuje přední část kliky, ve které zůstalo nejvíce materiálu oproti základnímu dílu. Je však znát úbytek v rohové části.



Obrázek 51 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 1

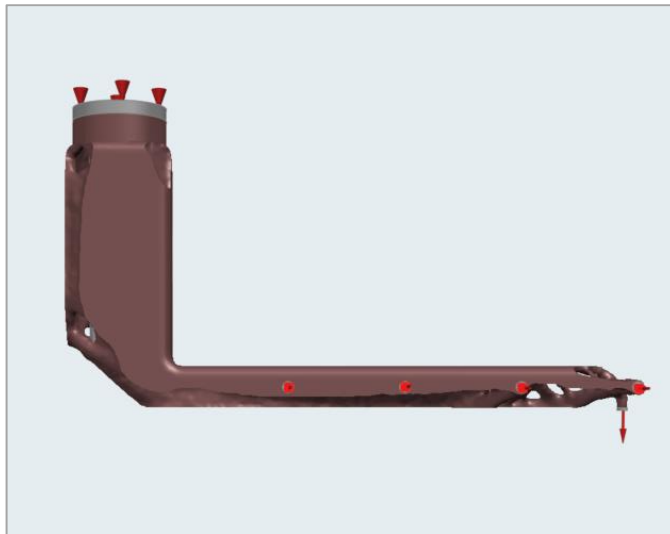
Z pohledu 2 je patrné minimalizování materiálu na koncové části, kdy materiál až do špičky postupně ubývá. Naopak v horní části je ho výrazně více z důvodu umístění působících sil, které slouží k simulaci záběru ruky.





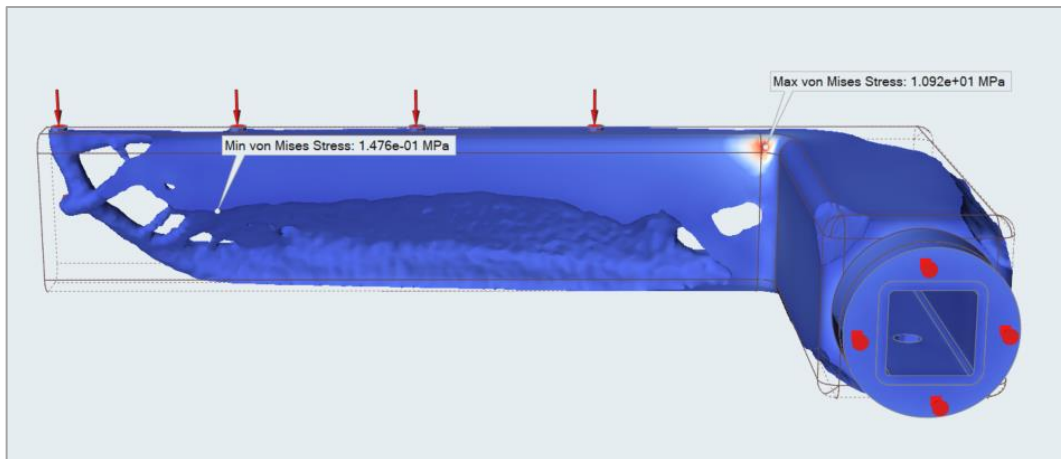
Obrázek 52 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 2

Z horního pohledu – pohled 3, je znatelný úbytek, kdy je koncová šířka kliky skoro poloviční. Úbytek v levé části je dán tím, že zde nejsou umístěny žádné síly a program tedy tento prostor nepovažuje za nutně vyplnitelný. Tento úbytek však může způsobit problémy v místě vnitřního záhybu kliky.

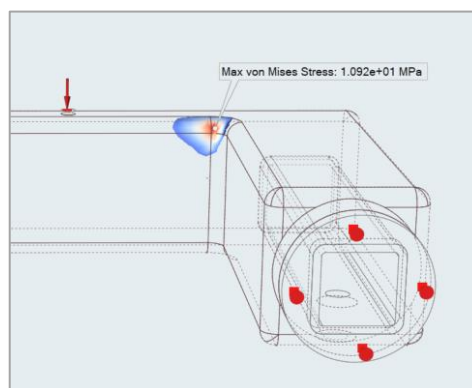


Obrázek 53 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 3

Z kritéria maximálního napětí von Mises je patrné, že problémovým místem je prostor, ve kterém dochází ke kontaktu mezi návrhovým a nenávrhovým prostorem. Dalším místem je vnitřní záhyb na modelu. Což je naznačeno na dalším obrázku, konkrétně KMN von Mises – pohled 1.



Obrázek 54 Kritérium maximálního napětí von Mises



Obrázek 55 Kritérium maximálního napětí von Mises – pohled 1

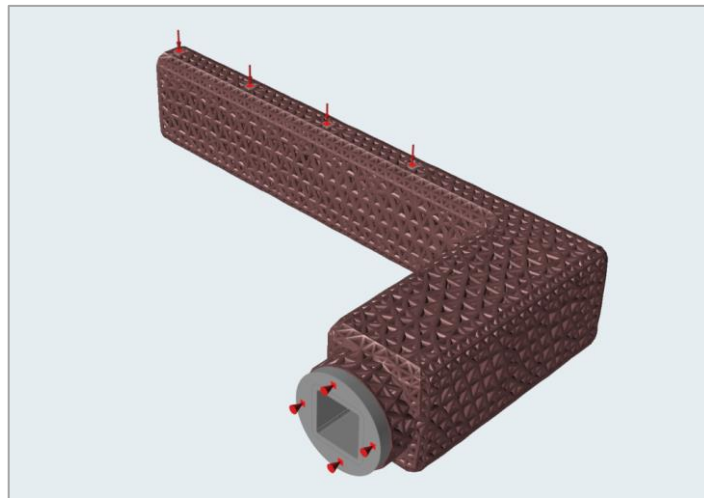
Další možností optimalizace dílu je takzvaná lattice, u které se jedná o vyplnění návrhového prostoru zvoleným opakujícím se elementem. Navolené charakteristiky jsou znázorněny na následujícím obrázku. Délka elementu byla zvolena 3 milimetry, minimální průměr 1 milimetr a maximální průměr 2 milimetry. Poté byla ještě zvolena délka elementu 6 milimetrů, pro porovnání výsledných charakteristik.

Z důvodu možnosti tisku a celkové kvality tisku součásti při takto nízkých rozměrech. Bylo zvoleno vyplnění 100 % mřížkovou strukturou, při zachování 30 % původní hmotnosti návrhového prostoru. Jednotlivé časy výpočtů jsou v následující tabulce.

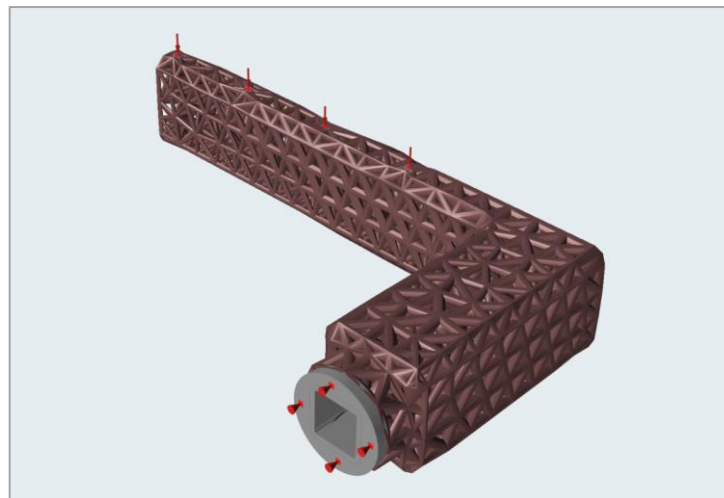
Tabulka 8 Časy jednotlivých výpočtů v procesu

Druh	Analýza základního dílu	Topologická optimalizace	Lattice 3 mm	Lattice 6 mm
<b>Délka výpočtu [min]</b>	4	51	3	2

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledky optimalizace Lattice, která spočívá ve vyplnění návrhového prostoru navolenými elementy, jejich délkou a minimálním a maximálním průměrem.



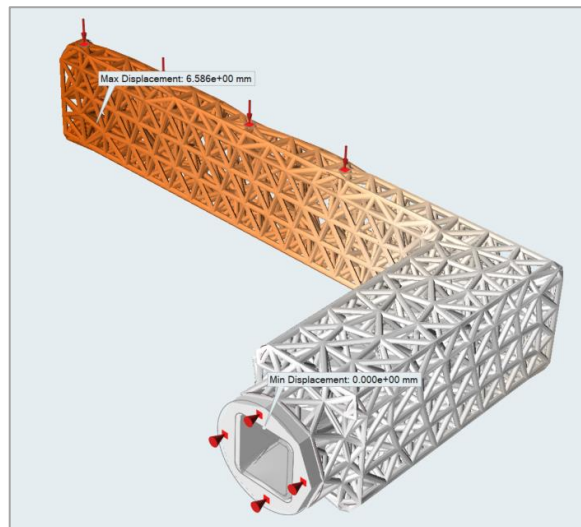
*Obrázek 56 Výsledek Lattice optimalizace – délka elementu 3 milimetry*



*Obrázek 57 Výsledek Lattice optimalizace – délka elementu 6 milimetrů*

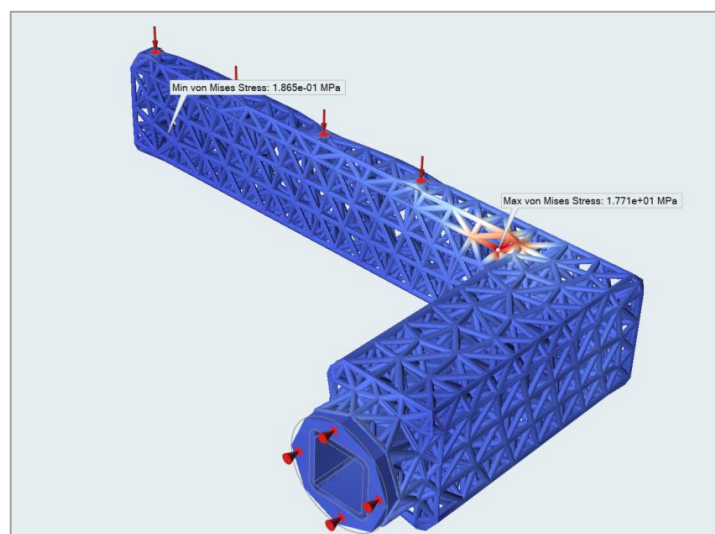
Na první pohled je znatelný rozdíl v obou mřížkových optimalizacích. Co se týká výsledků u porovnání hmotnosti. Tak v tomto případě nedošlo k výraznému ušetření. Původní díl vykazoval hmotnost 34,007 gramů, díl optimalizovaný pomocí mřížkových struktur vykazoval hmotnost 26,476 gramů u délky 3 milimetrů. Naopak u délky 6 milimetrů došlo k výraznému snížení, a to na hodnotu 12,561 gramů. Nevýrazné snížení hmotnosti lze vysvětlit pomocí 100 % vyplnění součásti navrženými elementy. Případná výraznější změna lze docílit snížením minimálního a maximálního průměru elementu. Je však

důležité brát ohled na možnosti tiskárny a vyrobiteľnosť dílu, proto je minimální průměr stanoven na hodnotě 1 milimetru.



Obrázek 58 Výsledek lattice optimalizace – průhyb – délka elementu 6 milimetrů

Naznačení minimálního a maximálního průhybu při vyplnění mřížkovými strukturami je naznačen na obrázku. Ve srovnání se základním modelem došlo ke značnému zvýšení průhybu. Kritérium maximálního napětí von Mises poukazuje na problémové místo v koncovém místě kliky, které je způsobeno umístěním působící síly. Dalším problematickým místem je záhyb, který je způsoben ostrým přechodem a působícím namáháním na součást. Zároveň také počáteční místo kliky, které je umístěno poté ve dveřích, kde součást vykazuje vysoké namáhání z důvodu přechodu mezi návrhovým a nenávrhovým prostorem. Vše je naznačeno na následujícím obrázku.



Obrázek 59 Výsledek Lattice optimalizace – kritérium maximálního napětí von Mises (délka elementu 6 milimetrů)

Výsledné charakteristiky všech provedených optimalizací jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 9 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu ABS

Materiál	ABS			
	Základní model	TO díl	LS díl – 3mm	LS díl – 6 mm
Hmotnost [g]	34,005	13,998	26,476	12,561
Maximální Průhyb [mm]	1,287	2,026	3,308	6,586
Maximální smykové napětí [MPa]	3,61	5,549	3,437	9,167
Kritérium maximálního napětí von Mises [MPa]	6,692	10,92	10,27	17,71

Při porovnání jednotlivých modelů z pohledu hmotnosti, je vidět značný rozdíl mezi základním dílem a topologicky optimalizovanou součástí, kdy došlo k ušetření hmotnosti 20 gramů. Ostatní zkoumané charakteristiky mezi základním modelem a topologicky optimalizovaným však vykazují horší hodnoty. Naopak při porovnání základního modelu a dílu vyplněného mřížkovou strukturou o délce elementu 3 milimetry došlo ke zlepšení hodnoty maximálního smykového napětí a ke snížení potřebného materiálu. Zvýšila se ale hodnota maximálního průhybu a kritéria maximálního napětí von Mises. U dílu, který byl vyplněn mřížkovou strukturou o délce elementu 6 milimetrů, došlo ke značnému snížení hmotnosti dílu. Ostatní porovnávané charakteristiky však vykazují horší výsledky. Maximální průhyb se zvýšil z hodnoty 1,287 milimetrů na 6,586 milimetrů. Maximální smykové napětí vzrostlo z 3,61 MPa na 9,167 MPa. Kritérium maximálního napětí von Mises také vzrostlo z 6,692 MPa na 17,71 MPa.

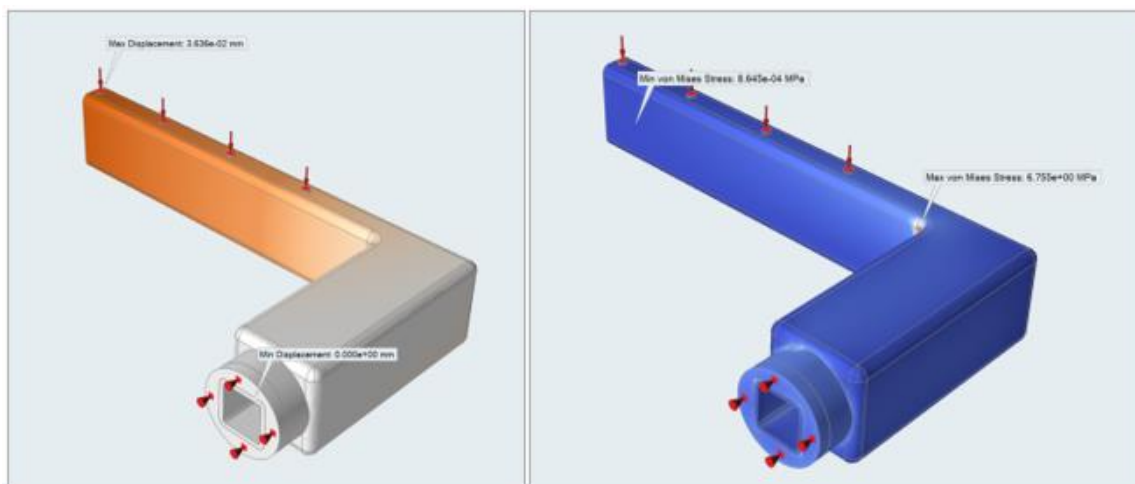
## 7.2 AlSi10Mg

Obdobným způsobem probíhaly jednotlivé kroky a vybrané druhy optimalizace při použití druhého zvoleného materiálu – AlSi10Mg. Počátečním krokem byla analýza základní součásti, ta trvala 5 minut. Tloušťka elementu byla omezena na hodnotu jednoho milimetru. V následující tabulce jsou časy všech výpočtů během procesu, jejichž hodnota velmi úzce souvisí se zvolenou minimální tloušťkou elementu.

Tabulka 10 Jednotlivé časy výpočtů

Druh	Analýza základního dílu	Topologická optimalizace	Lattice 3 mm	Lattice 6 mm
Délka výpočtu [min]	5	57	3	4

Na následujících obrázcích je výsledek analýzy základního modelu, přesněji maximální průhyb a kritérium maximálního napětí von Mises.

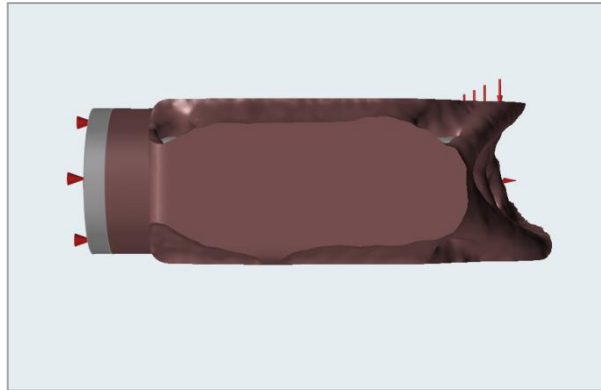


Obrázek 60 Analýza základního modelu – průhyb a maximální napětí von Mises

Největší průhyb je v koncovém místě kliky. Problémovým místem se ukázal v tomto případě také záhyb na vnitřní straně kliky. Po analýze byla opět provedena topologická optimalizace.

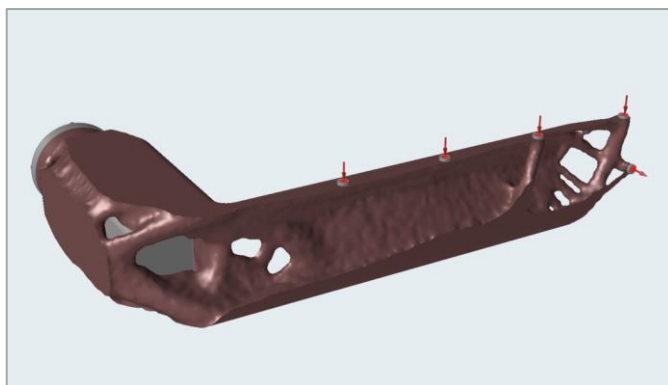
Nastavení topologické optimalizace probíhalo obdobným způsobem, jako u materiálu ABS. Kdy je cíleno na maximální tuhost výrobku. Bylo opět zaškrtnuto 30 % zachování materiálu z původního návrhového prostoru.

Výpočet topologické optimalizace trval 57 minut, minimální tloušťka byla nastavena na hodnotu 2,2495 milimetrů. Oba modely, jak tento, tak v případě použití materiálu ABS, vykazovaly po výpočtu podobné vlastnosti. To je způsobeno hlavně z důvodu nastavení stejných sil a procentuálního zachování původního materiálu. Většina materiálu je nahromaděna v přední části kliky.



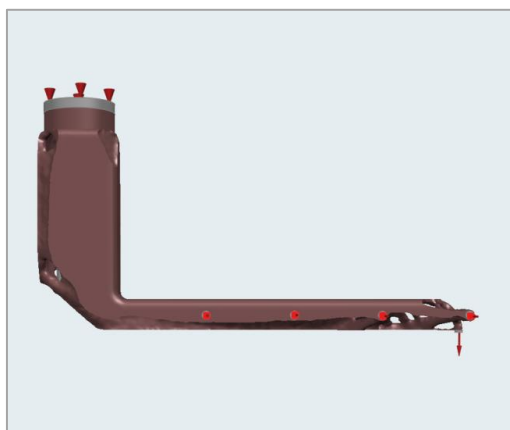
*Obrázek 61 Topologická optimalizace – pohled 1*

V koncové části kliky je minimum materiálu. Kde se postupně střídají nepravidelné válcové plochy a plná stěna materiálu. Tento výsledek tak slouží k inspiraci pro originální návrh kliky. Je zajímavé, že i přes zvolení odlišného materiálu došlo k velmi podobnému rozvržení materiálu, jako v případě ABS. Tato skutečnost je dána hlavně identickými působícími silami.



*Obrázek 62 Topologická optimalizace – pohled 2*

I v tomto případě došlo k pozdějšímu navýšení % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru z původních 30 % na 40 %, což způsobilo schování vnitřní části otvoru na čtyřhran.



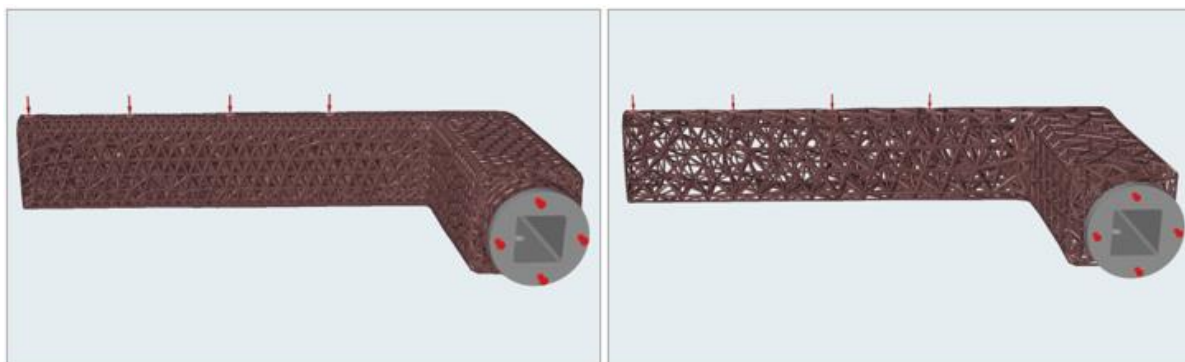
Obrázek 63 Topologická optimalizace – pohled 3

Dalším krokem bylo opět vyplnění základního modelu mřížkovými strukturami. V tomto případě byly zvoleny dvě různé délky elementu, všechny navolené charakteristiky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11 Porovnání volených charakteristik při zadávání výpočtu LS

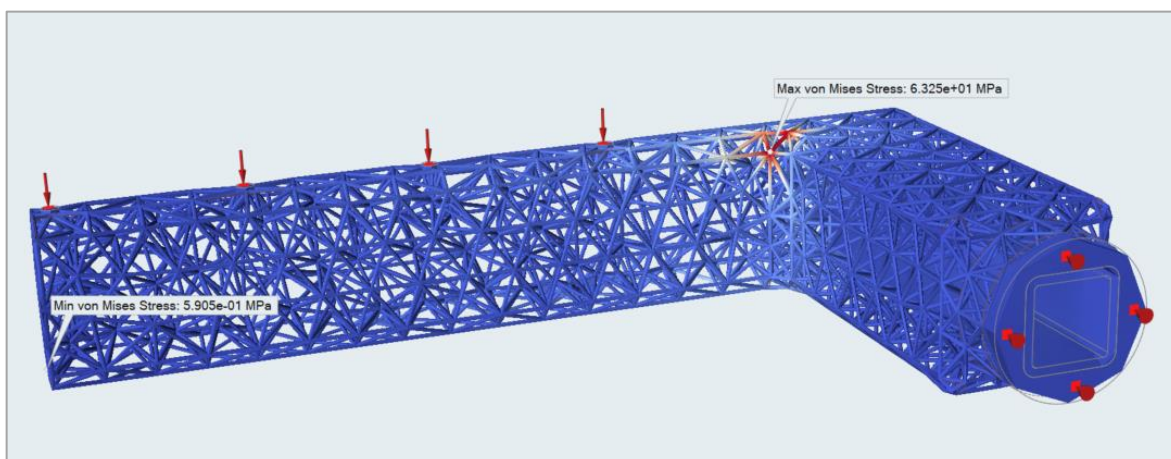
	LS varianta 1	LS varianta 2
<b>Délka elementu [mm]</b>	3	6
<b>Minimální průměr [mm]</b>	0,5	0,5
<b>Maximální průměr [mm]</b>	1	1
<b>Vyplněno - % mřížkami [%]</b>	100	100
<b>Hmotnost - % celkového návrhového prostoru [%]</b>	50	50

Na následujících obrázcích jsou naznačeny díly s vyplněním mřížkovou strukturou, v délce elementu 3 a 6 milimetrů.



Obrázek 64 Výsledek lattice optimalizace - 3 a 6 milimetrů





Obrázek 65 Analýza maximálního napětí von Mises

Analýza maximálního napětí von Mises ukazuje nejproblematictější místa v návrhu dílu, kterými je vnitřní záhyb a napojení mezi návrhovým a nenávrhovým prostorem. Jedná se tak o stejná problematická místa jako u materiálu ABS. Je snahou si na tyto místa dát pozor v pozdějším přemodelování dílu.

V následující tabulce jsou shrnuté všechny výsledné charakteristiky jednotlivých variant modelu.

Tabulka 12 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu AISi10Mg

Materiál	AISi10Mg			
	Základní model	TO díl	LS díl 3mm	LS díl 6mm
<b>Hmotnost [g]</b>	83,734	33,399	26,594	12,97
<b>Maximální Průhyb [mm]</b>	0,0363	0,0579	0,2994	0,628
<b>Maximální smykové napětí [MPa]</b>	3,637	5,612	6,211	13,19
<b>Kritérium maximálního napětí von Mises [MPa]</b>	6,755	11,05	31,05	63,25

I v tomto případě byly postupně provedeny analýzy a optimalizace – topologická a lattice. Při porovnání hmotnosti je nejvýraznější rozdíl mezi základním dílem a tím, který je vyplněný mřížkovou strukturou o délce 6 milimetrů, došlo tak k ušetření hmotnosti, a tedy i potřebného materiálu o více než 70 gramů. V ostatních případech ubyla hmotnost také, u topologicky optimalizovaného dílu o 50 gramů,

u dílu vyplněného strukturou o délce elementu 3 milimetry se hmotnost snížila oproti původnímu o 57 gramů.

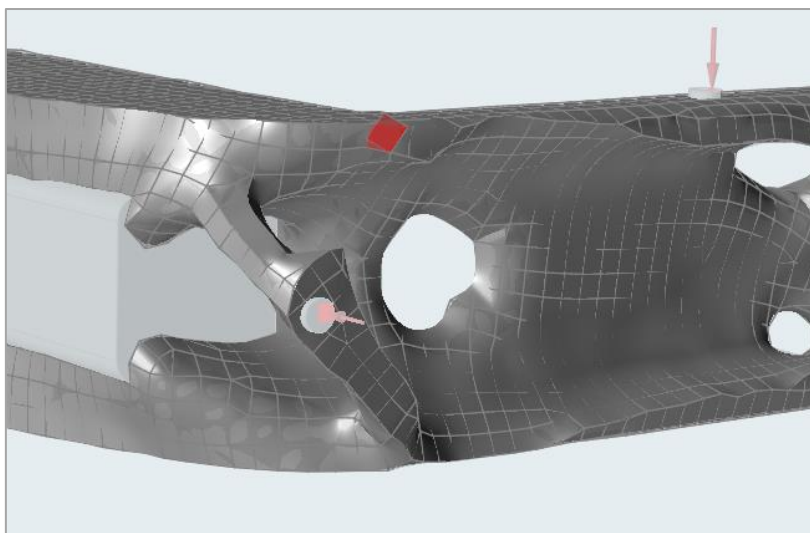
Naopak při porovnání jednotlivých maximálních průhybů došlo ke zvýšení. U základního dílu byl maximální průhyb 0,0363 milimetru, u topologicky optimalizovaného dílu 0,0579 milimetru. U dílů, který byly vyplněny mřížkovou strukturou došlo k dalšímu zvýšení této hodnoty, a to na 0,2994 milimetru při délce elementu 3 milimetry a 0,628 milimetrů při délce elementu 6 milimetrů. Kritérium maximálního napětí von Mises vykazovalo u základního dílu hodnotu 6,755 MPa. U topologicky optimalizovaného dílu došlo ke skoro dvojnásobnému zvýšení na hodnotu 11,05 MPa. Velmi podstatný rozdíl je u obou dílů, které jsou vyplněny mřížkovou strukturou. Oproti základnímu dílu vzrostly jejich hodnoty na 31,05 MPa u délky elementu 3 milimetry a na hodnotu 63,25 MPa u délky elementu 6 milimetrů.

## 8 Získané zkušenosti s procesem topologické optimalizace

Při návrh dílu je nutné respektovat technologická pravidla a omezení zvolené výrobní technologie tak, aby byl navržený díl vyrobitelný a nedocházelo k vytváření zbytečných komplikací ve fázi tisku, či dokončování dílu. To je možné pouze za předpokladu znalosti těchto omezení.

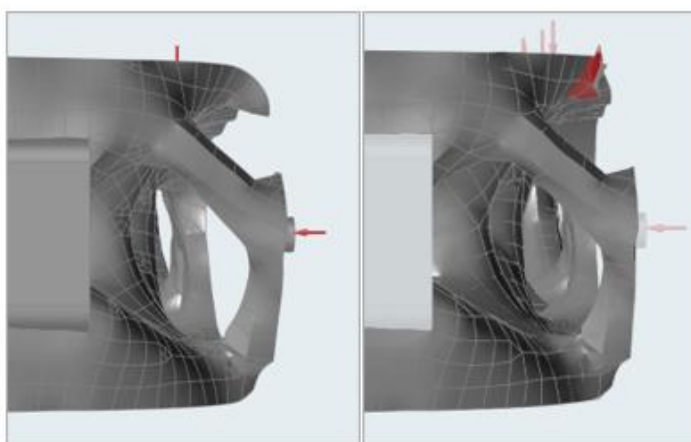
Časová náročnost procesu topologické optimalizace souvisí ve fázi návrhu hlavně s celkovou náročností výpočtu pomocí metody konečných prvků. Tato metoda je přímo závislá na vlastnostech materiálu. Délka výpočtu pak na minimální přípustné tloušťce stěny. Úměrné – čím menší tloušťka stěny je v rámci topologické optimalizace povolena, tím je výrazně delší proces výpočtu. V mém případě se jednalo o značný rozdíl i přes to, že se jedná o menší díl. Pro srovnání, pokud byla minimální tloušťka stěny zvolena mezi 3 až 4 milimetry, výpočet trval několik minut. Při postupném snižování však docházelo k výraznému prodloužení. Při snížení tloušťky na 2,2 milimetru, samotný výpočet trval okolo 30 minut. Další snížení tloušťky na 1,5 milimetru znamenalo délku výpočtu asi 1,5 hodiny. Sám program ihned napsal, že výpočet bude trvat minimálně hodinu. Je ale nutné dodat, že celkový výpočet nedošel ke zdárnému konci. Program nahlásil chybu a doporučil mi se obrátit na stránky technické podpory. Celkově se dá říct, že hodina a půl výpočtu je stále ještě v pořádku. Jde však spíš o to, že výpočet nedoběhl do svého konce.

Geometrie obdržená při topologické optimalizaci není finální geometrií, kterou bychom mohli začít vyrábět. Nutné úpravy modelu souvisí s více věcmi. Jednak po topologické optimalizaci vznikne díl, ve kterém se může nacházet „volně poletující“ materiál, bez propojení se zbytkem dílu. Zároveň ne všechen materiál je navazující. V tomto případě vzniklo několik míst, kterých bylo třeba přidat materiál tak, aby byla zajištěna spojitost dílu. Tento případ je naznačen na obrázku 50 – změna % zastoupení materiálu. Jednou z možností úpravy modelu přímo v programu Altair je funkce PolyNURBS, kde je možnost návrhový prostor rozdělit na jednotlivé části – plochy, se kterými se dále pracuje. Tento proces je částečně vidět na dalším obrázku – viditelná červená část. Problémem v tomto kroku je možné překrytí ploch, které znemožní další úpravy.



Obrázek 66 Ukázka problému s plochou

Snahou bylo odstranit vzniklý převis, který vede pouze ke zvýšení rizika poranění o kliku. Při postupném odstranění došlo k překrytí ploch a všechny provedené kroky byly nutné vrátit zpět na počátek. K odstranění převisu poté došlo těmito kroky. Postupným označením jednotlivých rozdělených částí plochy došlo k jejich odstranění. Poté bylo třeba vzniklé otvory pomocí funkce „pave“ zacetit.

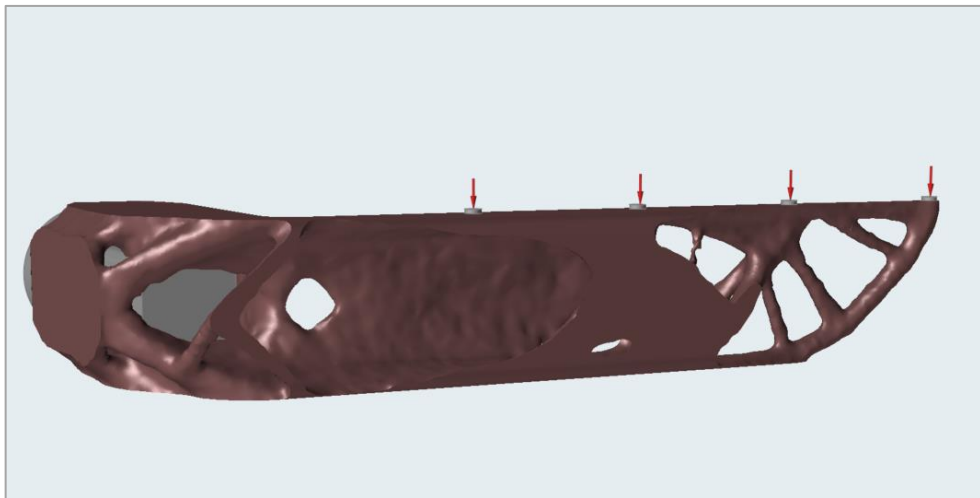


Obrázek 67 Vlevo: vzniklý převis; Vpravo: problém s plochou při odstraňování převisu

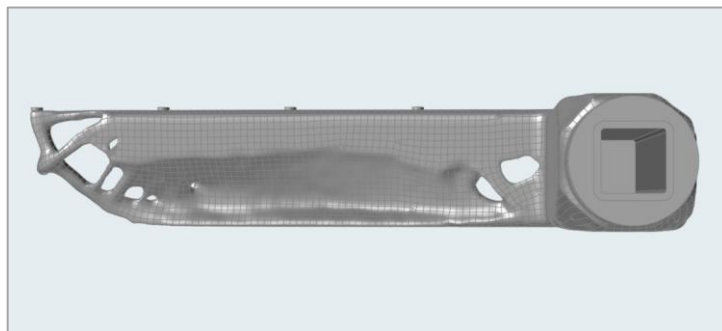
Vhodná úprava dílu k dalšímu zpracování je velmi důležitou součástí. Jedná se o zacelení ploch, zjemnění ostrých hran a podobně. Jsou možná dvě řešení, jak s topologicky optimalizovaným dílem pracovat. První z nich je další práce s optimalizovaným dílem pomocí funkce PolyNURBS. Při které dochází k rozdělení povrchu návrhové části na jednotlivé úseky existujícího modelu, a je možná jeho další úprava.

Mezi postupné kroky patřily tyto funkce – „fit“ (zasíťování), „smooth“ (zjemnění) a „sharpen“ (minimalizace ostrých hran).

Nejdříve bylo nutné potažení a rozdělení celkového povrchu na jednotlivé části. To bylo dosaženo funkcí fit, a hustota prvků byla nastavena na hodnotu 0,5. Pokud by bylo třeba zvýšit hustotu prvků, lze nastavit hodnotu 10 i 100. Při větší hustotě však nastává problém, kdy je celkový proces pomalejší a často dochází k sekání, nebo celý program spadne. Tato nestabilita může být ovlivněna i faktem, že pro práci byl využíván HW na úrovni kancelářského PC.



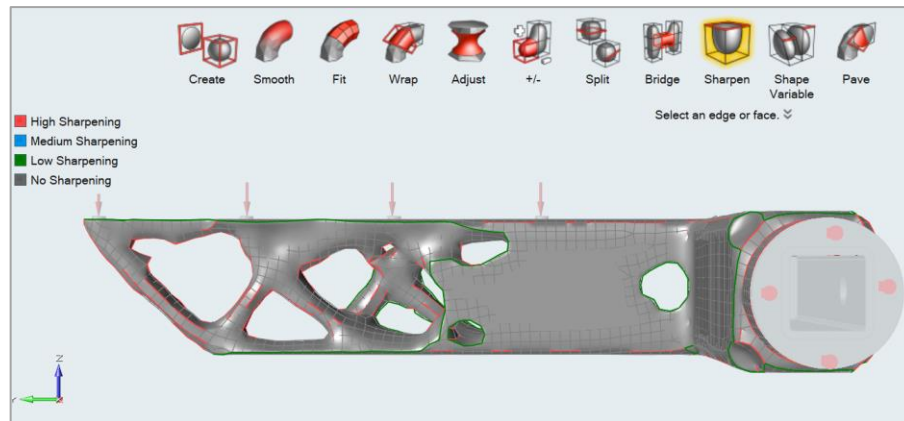
Obrázek 68 Výsledek topologické optimalizace – detail na koncovou část



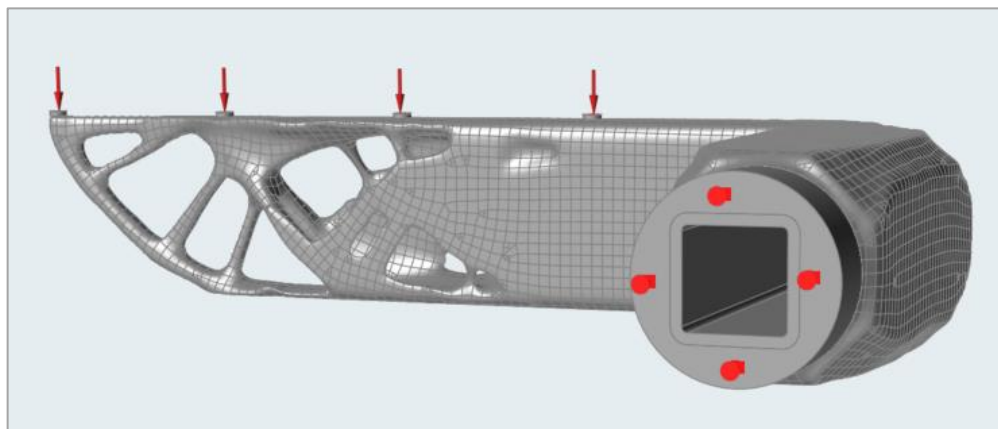
Obrázek 69 Zasíťování povrchu modelu

Zjemnění hran lze docílit dvěma způsoby. Jedním a časově náročnějším je postupná úprava hran s využitím funkce „sharpen“. Druhým a jednodušším způsobem je ve funkci „fit“ zvýšit hodnotu „break angle“ – úhel zlomu. Experimentálně bylo vyzkoušeno zvýšit hodnotu z navolených 30 na 100. Funkce sharpen poté žádné ostré hrany na modelu již nenašla. Tato nová znalost tak ušetřila mnoho času.

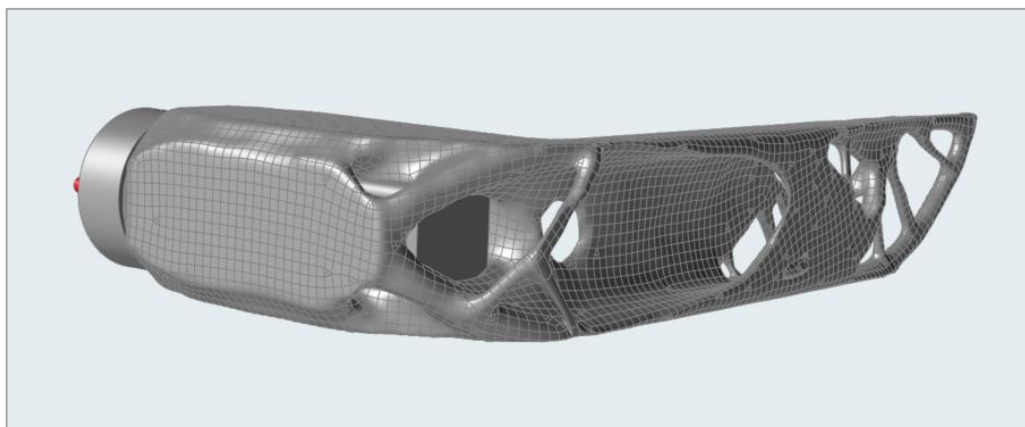
Na následujícím obrázku je nastíněna, jak funkce sharpen funguje. Program ostré hrany sám identifikuje. Po jejich označení lze červeně označené hrany zjemnit. Je zde více možností, buď zjemnit hrany nebo je nechat úplně vymizet, kdy je třeba zvolit šedou barvu – „no sharpening“. Takto upravený model byl znovu analyzován, aby mohly být porovnány charakteristiky.



Obrázek 70 Naznačení postupného předělání hran



Obrázek 71 Topologicky optimalizovaný díl upravený funkcí Polynurbs



Obrázek 72 Detail na koncovou část kliky

Všechny modely byly pro porovnání analyzovány z pohledu hmotnosti dílu, maximálního průhybu a napětí. V následující tabulce jsou zaneseny výsledné charakteristiky.

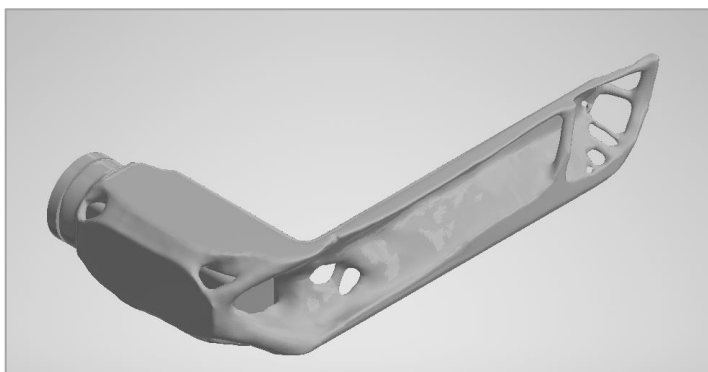
Tabulka 13 Výsledné charakteristiky modelu před a po úpravě

Materiál	ABS		
	Základní	TO model	TO model upravený PolyNURBS
Hmotnost [g]	34,005	13,998	11,501
Maximální Průhyb [mm]	1,287	2,026	0,8832
Maximální smykové napětí [MPa]	3,61	5,549	2,704
Kritérium maximálního napětí von Mises [MPa]	6,692	10,92	4,732

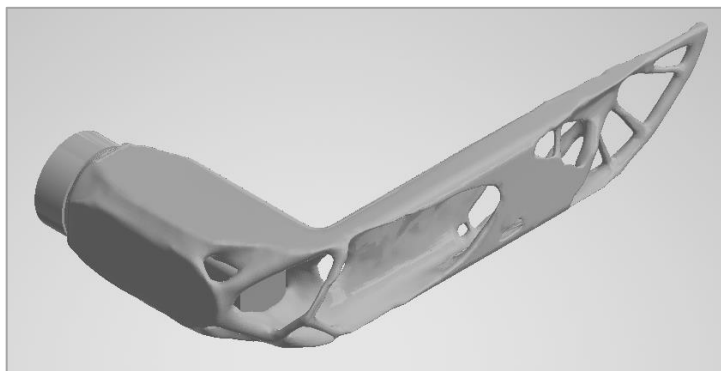
Topologicky optimalizovaný díl vykazuje oproti základnímu výrazně nižší hmotnost. Naopak jsou ale horší výsledky při porovnání obou modelů z hlediska maximálního průhybu, maximálního smykového napětí a kritéria maximálního napětí von Mises. Topologicky optimalizovaný model upravený funkcí Polynurbs však vykazuje lepší výsledné vlastnosti i než základní model. Došlo ke snížení hmotnosti dílu zhruba o 2/3, průhyb se snížil z 1,287 na 0,8832 milimetrů. Maximální smykové napětí a kritérium maximálního napětí von Mises bylo také sníženo z hodnoty 3,61 na 2,704 MPa, respektive z hodnoty 6,692 na 4,732 MPa. Z těchto výsledků lze říct, že se vyplatí pokračovat v úpravě topologicky optimalizovaného dílu.

## 9 Výsledné návrhy a experimentální ověření výsledků simulace

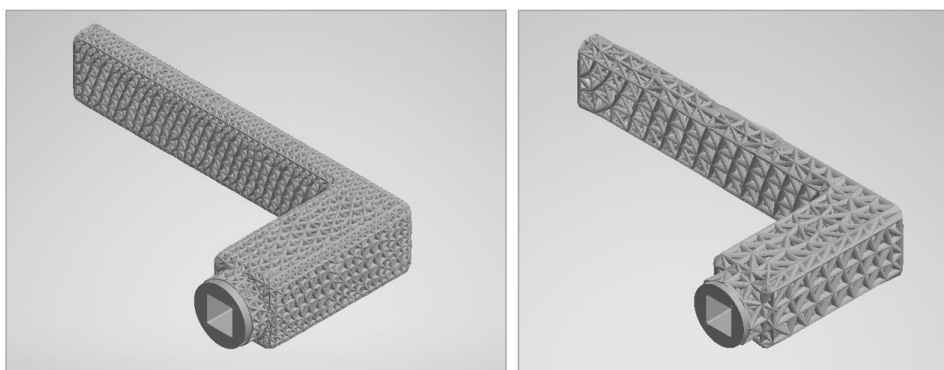
Po provedení všech simulací bylo třeba vybrané modely vytisknout. Mezi ty patří – topologicky optimalizovaný díl, topologicky optimalizovaný díl upravený funkcí „PolyNURBS“ a základní model vyplněný mřížkovou strukturou ve zvolených délkách elementu 3 a 6 milimetrů. Zvoleným materiálem byl předpokládán ABS a poté i PETG. K tomu byly opět dle vlastností dopočítané simulace k výslednému porovnání.



Obrázek 73 Topologicky optimalizovaný díl



Obrázek 74 Topologicky optimalizovaný díl upravený funkcí „PolyNURBS“



Obrázek 75 Model vyplněný mřížkovou strukturou v délce elementu 3 a 6 milimetrů

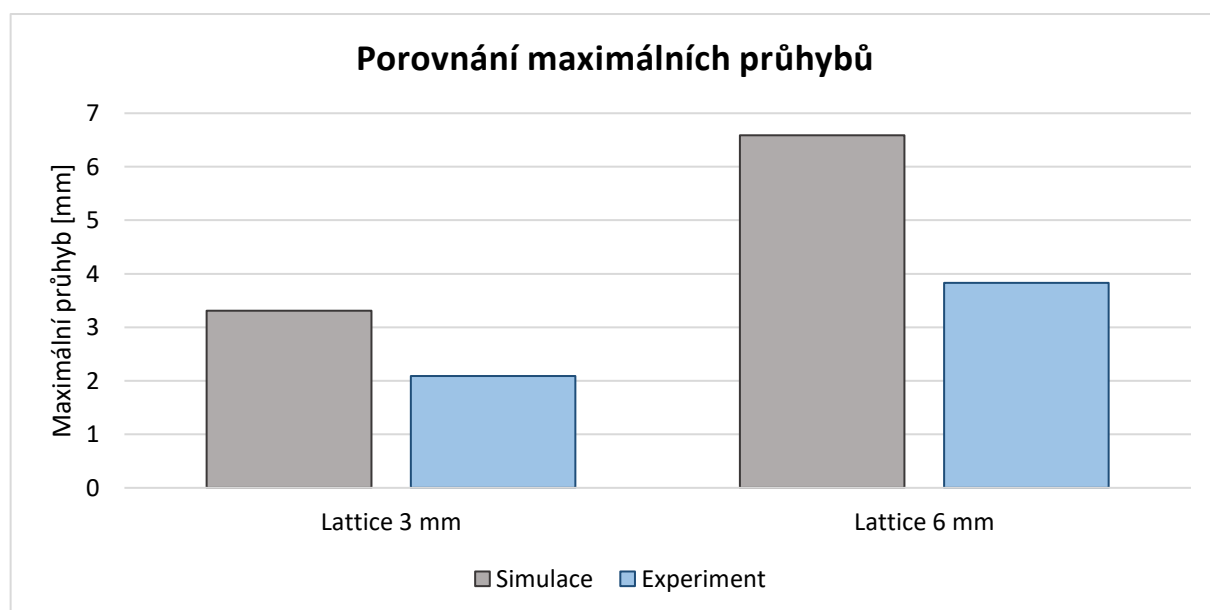


Po vytištění dílů z materiálu ABS bylo nutné odstranění podpor, které probíhá v ultrazvukové pračce při teplotě 70°C. Selháním termostatu v ultrazvukové pračce teplota lázně přesáhla 103°C a došlo tak ke znehodnocení vzorků. Velkou deformaci vykazoval topologicky optimalizovaný díl, i ten s pozdější úpravou pomocí funkce „PolyNURBS“. Jedná se o vadu, která byla způsobena ve fázi post – processingu, kdy je na dílu stráveno mnoho hodin. Přesněji cca 2 hodiny výpočet topologické optimalizace, 24 hodin tisk dílu a poté cca 6 hodin odstraňování podpor. Po vytištění bylo nutné ověření výsledků simulace. Metodika měření spočívala v umístění dílu v přípravku, aby bylo umožněno tuhé upnutí. Po zatížení dílu v definovaných bodech definovanými silami, byla změřena deformace pomocí umístěného snímacího zařízení na koncové části vytištěné součásti.

Byly tak experimentálně změřeny maximální průhyby pouze u dílů, které byly vyplněny mřížkovou strukturou. V následující tabulce a grafu jsou zaznamenány jejich výsledky.

Tabulka 14 Experimentální měření – ABS

Součást	Maximální průhyb [mm]			Výsledek simulace [mm]
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	
<b>Materiál ABS</b>				
Lattice 3 mm	2,06	2,13	2,08	3,308
Lattice 6 mm	3,87	3,76	3,85	6,586



Graf 1 Graf maximálních průhybů u materiálu ABS

Z grafu porovnání maximálních průhybů je patrné, že experimentálně zjištěné hodnoty vykazují nižší hodnoty než simulované hodnoty modelu. Tato situace může být způsobena neúplným odstraněním podpurného materiálu, který se stále nachází uvnitř dílu a ovlivňuje výsledné hodnoty při praktickém měření.

Z důvodu znehodnocení dvou vzorků z materiálu ABS byly vytištěny stejné modely z materiálu PETG. V následující tabulce jsou shrnuty vlastnosti materiálu PETG, dle jeho materiálových listů. [45,46,47]

Tabulka 15 Vlastnosti materiálu PETG dle materiálových listů

Materiál	Modul pružnosti E [GPa]	Poissonova konstanta Nu [-]	Hustota [g/mm <sup>3</sup> ]	Mez pevnosti [MPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [-/K]
PETG	1,5	0,4	$1,27 \cdot 10^{-3}$	47	$68 \cdot 10^{-6}$

Obdobná návrhová řešení byla zvolena i materiálu PETG. V následující tabulce jsou opět shrnuty jeho výsledné charakteristiky – změna hmotnosti dílu, jeho maximální průhyb, maximální smykové napětí a kritérium maximálního napětí von Mises.

Tabulka 16 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu PETG

Materiál	PETG				
	Základní model	TO díl	Polynurbs díl	LS díl 3mm	LS díl 6mm
Hmotnost [g]	40,741	16,761	16,875	31,722	15,042
Maximální Průhyb [mm]	1,741	2,713	2,902	4,41	8,674
Maximální smykové napětí [MPa]	6,457	5,524	5,711	3,358	9,222
Kritérium maximálního napětí von Mises [MPa]	6,605	10,8	11,34	10,13	18,22

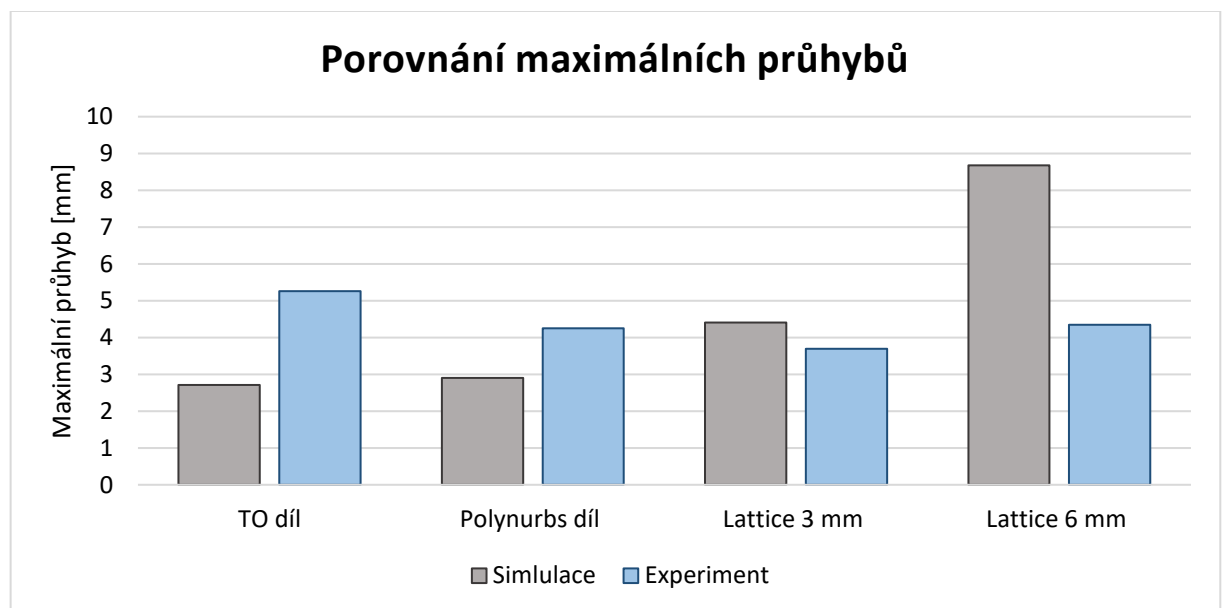
Z tabulky je zřejmé, že všechny návrhy vedly ke snížení hmotnosti dílu. Naopak byla zvýšena hodnota jednotlivých maximálních průhybů. U maximálního smykového napětí došlo ke snížení této hodnoty při porovnání se základním modelem, až na model vyplněný mřížkovými strukturami o délce elementu 6 milimetrů. Kritérium maximálního napětí von Mises u všech pozorovaných návrhových řešení vzrostlo. Toto navýšení hodnoty souvisí se snížením hmotnosti dílu.

Poté byla všechna návrhová řešení opět experimentálně změřena. V tabulce jsou shrnuty výsledné hodnoty maximálních průhybů jednotlivých modelů, včetně výsledků simulace.

Tabulka 17 Experimentální měření – PETG

Součást Materiál PETG	Maximální průhyb [mm]			Výsledek simulace
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	[mm]
TO díl	5,38	5,22	5,18	2,713
Polynurbs díl	4,27	4,26	4,23	2,902
Lattice 3 mm	3,84	3,62	3,62	4,41
Lattice 6 mm	4,4	4,34	4,29	8,674

Na následujícím grafu je zaznamenána predikce jejich maximálního průhybu dle provedené simulace (šedá barva) a výsledek experimentálního měření vytištěných modelů (modrá barva).



Graf 2 Maximální průhyb u materiálu PETG

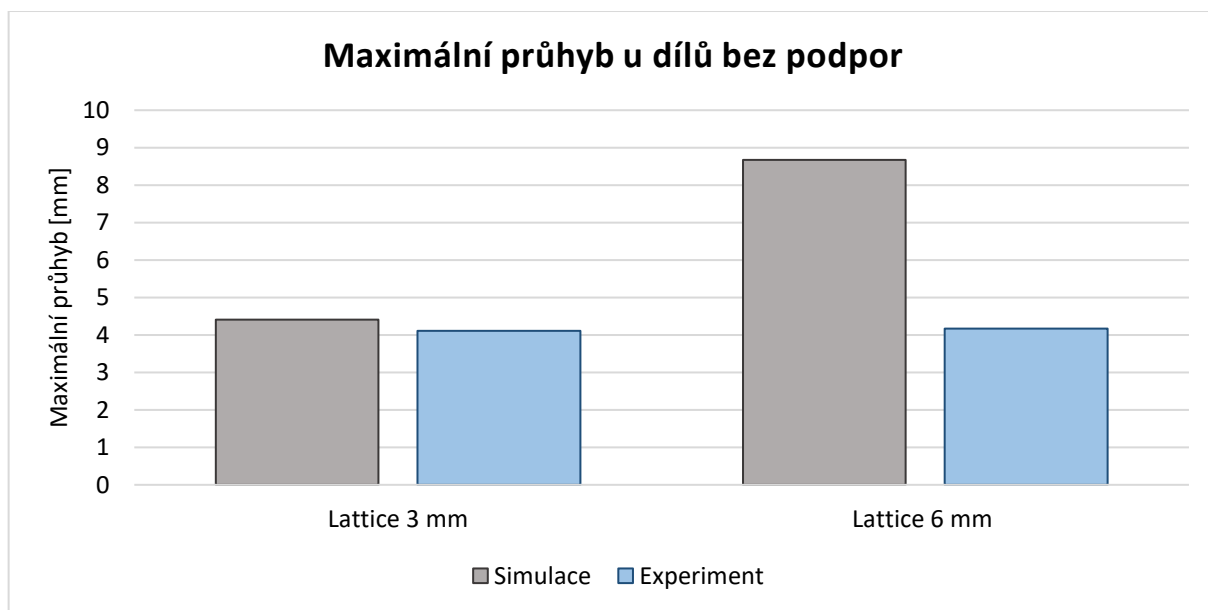
Z grafu je patrné, že u topologicky optimalizovaného dílu i u úpravy pomocí funkce „PolyNURBS“ došlo k vyšší hodnotě maximálního průhybu u experimentálního měření než u výsledku simulace.

Naopak u vyplnění základního modelu mřížkovou strukturu došlo u obou případů ke snížení maximálního průhybu. To je dané hlavně tím, že modely i jejich podpory byly tištěny ze stejného materiálu. Není tak možné z vnitřní části podpurný materiál nijak manuálně odstranit bez porušení dílu.

Pro zřetelnější výsledky měření byl díl s mřížkovými strukturami vytištěn ještě jednou a byly zakázány jakékoliv podpory při tisku. Tak, aby bylo maximálním způsobem sníženo ovlivnění podpurným materiálem v dílu.

Tabulka 18 Experimentální měření – PETG – mřížkové struktury bez podpor

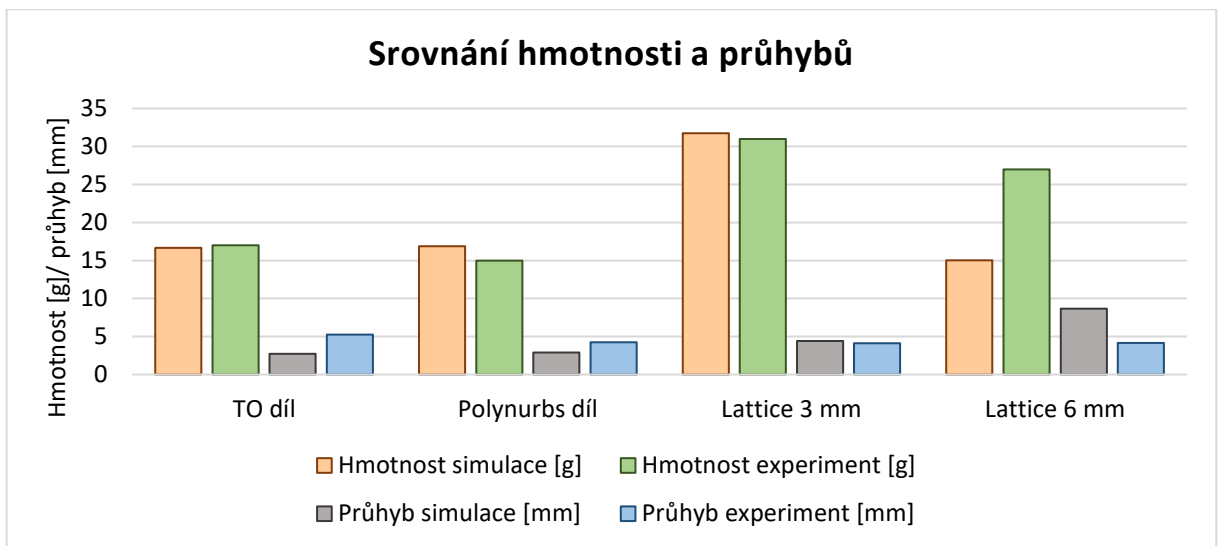
Součást	Maximální průhyb [mm] – míra deformace			Výsledek simulace [mm]
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	
<b>Materiál PETG</b>				
Lattice 3 mm	4,06	4,12	4,16	4,41
Lattice 6 mm	4,27	4,14	4,09	8,674



Graf 3 Maximální průhyb u dílů bez použití podpor

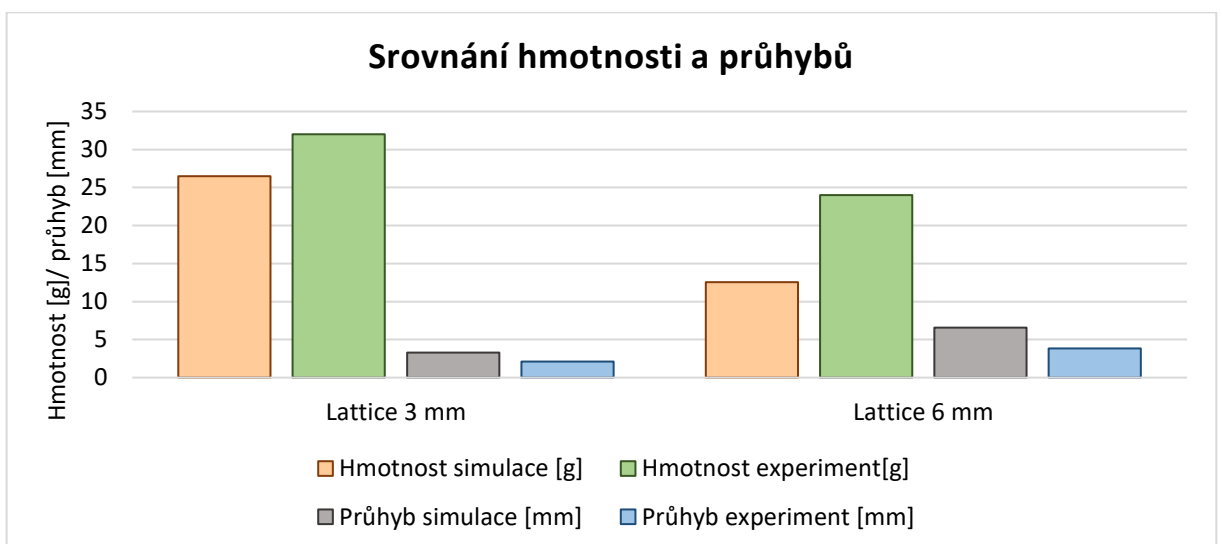
Z grafu maximálních průhybů u dílů vyplněných mřížkovou strukturou o délce 3 a 6 milimetrů je znatelné, že díly vykazují nižší hodnotu maximálního průhybu při experimentu, než je výsledná hodnota simulace. I v tomto případě se jedná o ovlivnění zbytkovým podpurným materiálem, který se v dílu nacházel kvůli retrakci (vznik malých nitek filamentu při přesunu extrudéru) při tisku dílu.

Z tohoto důvodu byly i vytištěné modely zváženy a na následujících grafech jsou porovnány jejich hmotnosti ze simulace a hmotnosti vytištěného dílu.



Graf 4 Porovnání hmotnosti dílů a jejich průhybů u materiálu PETG

Největší rozdíl v jednotlivých hmotnostech dílů je v případě vyplnění modelu mřížkovými strukturami o délce elementu 6 milimetrů u materiálu PETG. Jedná se tak o dokreslení situace, že výsledná hmotnost vytištěného dílu je výrazně vyšší a souvisí tak s výrazným snížením maximálního průhybu změřeného při experimentu.



Graf 5 Porovnání hmotnosti dílů a jejich průhybů u materiálu ABS

I v případě materiálu ABS došlo k navýšení hmotnosti vytištěného dílu z důvodu zbytku podpůrného materiálu ve vnitřních částech dílu. Zvýšení výrazným způsobem ovlivňuje výsledné vlastnosti vytištěných dílů, kdy došlo ke snížení maximálního průhybu v obou případech vyplněním vybranou délkou elementů.

## 10 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou strukturální optimalizace dílů a jak jsou jednotlivé možné přístupy jako topologická a lattice optimalizace podporovány rozvojem aditivních technologií. Je zde nastíněn krátký úvod do aditivních technologií, včetně používaných materiálů. Zároveň je zde kladen důraz na technologická pravidla návrhu dílu při výrobě aditivními technologiemi. Detailněji je zde popsána topologická optimalizace, její proces v jednotlivých krocích a využití v různých oblastech, ať už se jedná o letectví či design. Topologická optimalizace přispívá k co nejlepšímu rozložení materiálu v určitém prostoru dílu. Výsledná geometrie je často složitá a kvůli výrobním omezením vyžaduje buď zjednodušení, nebo omezení návrhového prostoru tak, aby byl výsledný díl vyrobitelný. Aditivní technologie si zakládá na tom, že složitost dílu nutně neznamená výrazné zvyšování jeho ceny. Správným využitím této technologie tak lze i při vyšší složitosti dílu zachovat stejnou cenu. Využitím topologické optimalizace vznikají díly se složitou geometrií. Tyto díly však ve většině případů neslouží jako hotový díl připravený k tisku, ale pouze jako inspirace, jakým směrem v návrhu postupovat dále. Po vymodelování dílu, který vychází z návrhu topologicky optimalizovaného dílu, dochází k vytištění dílu.

Základním dílem se v tomto případě stala součást, která dokáže nejsnáze nastínit proces topologické optimalizace s maximálním pochopením tématu pro koncové uživatele. Vybranou součástí byla stanovena klika u dveří, jelikož se jedná o velmi snadno představitelný díl. Zvolený materiál byl ABS a AlSi10Mg. Základním modelem byla zvolena klika s rozšířenou koncovou částí. Tímto způsobem byl umožněn maximální návrhový prostor pro výpočet topologické optimalizace. Byla snaha, aby tento návrh nastínil, jakým směrem při návrhu postupovat dále. Výsledná optimalizace poukázala na místa, kde bude docházet ke koncentraci napětí, potažmo kumulaci materiálu a kde nikoliv. Tento model by bylo při dalším použití nutné přemodelovat tak, aby došlo k propojení optimalizované části a jejich připojovacích prvků. Od dalšího postupu bylo upuštěno a pro návrhový prostor byl použit model již existující kliky. U té byla provedena analýza, aby bylo jasné, jaké jsou počáteční podmínky, a na které části si dát pozor v pozdějších návrzích. Po umístění opěr a působících sil byla spuštěna topologická optimalizace. Jejím výsledkem byla velmi odlehčená součást s mnoha otvory a neúplným

propojením všech částí. Došlo tak k 10 zvýšení % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru tak, aby došlo k propojení jednotlivých izolovaných částí. Celkový výpočet topologické optimalizace trval okolo 40 minut. Tento design sloužil hlavně jako inspirace k pozdějšímu přemodelování. Dalším postupem bylo vyplnění základního modelu mřížkovou strukturou. Délka elementu byla zvolena 3 a 6 milimetrů, minimální průměr a maximální průměr elementu byl zvolen 1 milimetr, resp. 2 milimetry. Nižší průměry nejsou možné z důvodu technologických omezení tisku dílu metodou FDM, v rámci experimentální části práce se ukázalo, že i minimální průměr LS je nutné navýšit na úroveň 2mm pro zajištění kvalitního tisku. Výpočty mřížkových struktur trvaly okolo 10 minut u nižší délky elementu, a okolo 5 minut u vyšší délky elementu i samotný výpočet je oproti TO 4-8x rychlejší. Všechny tyto varianty byly analyzovány a jejich výsledné charakteristiky byly porovnány mezi sebou. Topologicky optimalizovaný díl byl zároveň upraven pomocí funkce „PolyNURBS“, která potáhne výsledný model sítí, dle zadaného rozměru. Došlo tak ke zjemnění ostrých hran a odstranění či zmírnění výstupků na dílu. Tento díl byl také analyzován, pro povědomí, zda úpravou ve funkci „PolyNURBS“ lze vylepšit výsledné charakteristiky dílu.

Tyto modely byly poté vytištěny, celkově se tedy jedná o 4 díly. Topologicky optimalizovaný díl, jeho upravený model pomocí funkce „PolyNURBS“, a dva modely vyplněné mřížkovými strukturami o délce elementu 3 a 6 milimetru. Díly byly vytištěny z materiálu ABS a PETG. Avšak u materiálu ABS došlo k poškození dílů v rámci post – processingu v ultrazvukové pračce z důvodu selhání termostatu. Byly tedy experimentálně ověřeny pouze díly, které jsou vyplněny mřížkovými strukturami. Byl zopakován proces návrhových řešení, při použití materiálu PETG. Poté bylo opět provedeno experimentální ověření jednotlivých variant modelu a jejich srovnání s výsledky simulace procesu.

Z pohledu uživatele jednotlivých přístupů strukturální optimalizace je nutné vzít v potaz celkový průběh optimalizace, včetně pre – processingu a post – processingu. Samotná příprava dílu souvisí s nutností vymodelování a poté určení všech okrajových podmínek v optimalizačním programu tak, aby samotná optimalizace mohla v pořádku proběhnout. Oba procesy, jak topologická, tak i lattice optimalizace probíhaly obdobným způsobem. Jednalo se o zvolení návrhového prostoru, umístění působících sil a podpor, dohledání či určení materiálových parametrů. Samotný výpočet

jednotlivých optimalizací se také velmi lišil. Zatímco výpočet topologické optimalizace trval mezi 45 až 60 minutami, při vyplnění dílu mřížkovými strukturami se jednalo o velmi výrazné zkrácení času na cca 5 minut. Výsledný model topologické optimalizace bylo poté nutné upravit, jednalo se hlavně o zacelení neúplných ploch či odstranění ostrých hran. Zároveň i samotné nastavení jednotlivých výpočtů souvisí s pozdějším tiskem dílu a je tedy třeba brát na zřetel dodržení návrhových pravidel pro zachování výrobitelnosti modelu. Jednalo se tak o zachování minimálních tisknutelných rozměrů u obou využití optimalizací. Po dokončení tisku bylo nutné odstranit podpory. Je nezbytné zmínit, že u materiálu ABS lze podpory z materiálu QSR rozpustit v ultrazvukové pračce v zásaditém roztoku při dodržení správné teploty 70 °C. V tomto případě však došlo k selhání termostatu a část vytištěných dílů se stala nepoužitelná pro pozdější měření i využití. Naopak u materiálu PETG tištěného na 3D tiskárně Originál i3 Průša je identický materiál součásti i jeho podpor. Manuální odstranění byl velmi náročný proces hlavně při snaze odstranit podpurný materiál z dílů, které byly vyplněné mřížkovými strukturami, zde je to v podstatě nemožné. Obě tyto metody odstranění podpurného materiálu tak s sebou do procesu přinášejí další komplikace, které uživatel nezahrnuje do počátečního časového plánu výroby dílu. Vypracování této diplomové práce mi umožnilo seznámit se s výhodami i nevýhodami strukturálních optimalizací a 3D tisku jak po teoretické, tak i po praktické stránce.



## 11 Seznam použité literatury

- [1] Introduction to the Gartner Hype Cycle – BMC Software | Blogs. *BMC Software – Run and Reinvent* [online]. Copyright © Copyright 2005 [cit. 01.07.2021]. Dostupné z: <https://www.bmc.com/blogs/gartner-hype-cycle/>
- [2] *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, edited by Jing Zhang, and Yeon-Gil Jung, Elsevier Science & Technology, 2018. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=5398371>.
- [3] 3D tisk pokořil další hranice – Epochaplus.cz. *Epochaplus.cz – Zajímavé články z celého světa* [online]. Copyright © [cit. 01.07.2021]. Dostupné z: <https://epochaplus.cz/3d-tisk-pokoril-dalsi-hranice/>
- [4] Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 23.03.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836817342944>
- [5] Complexity for free using additive manufacturing | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 01.07.2021]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Complexity-for-free-using-additive-manufacturing\\_fig1\\_319509716](https://www.researchgate.net/figure/Complexity-for-free-using-additive-manufacturing_fig1_319509716)
- [6] How to Select the Right 3D Printing Process – Core77. *Core77 / Industrial Design Magazine + Resource* [online]. Copyright © 2021 Core77, Inc. All rights reserved. [cit. 01.07.2021]. Dostupné z: <https://www.core77.com/posts/71172/How-to-Select-the-Right-3D-Printing-Process>
- [7] Technologie 3D tisku. *na3D – 3D tisk pro každého!* [online]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
- [8] Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 16.04.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941818311437>

- [9] Technologie DMLS – 3D tisk kovů – od 3D tisku prototypů k aditivní výrobě | Technický týdeník. *TT / Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/technologie-dmls-3d-tisk-kovu-od-3d-tisku-prototypu-k-aditivni-vyrobe\\_39602.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/technologie-dmls-3d-tisk-kovu-od-3d-tisku-prototypu-k-aditivni-vyrobe_39602.html)
- [10] Paula, A., Peres, G., & Avançado, C. (2011). DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): TECHNOLOGY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF MICROREACTORS.
- [11] 3D tisk kovů DMLS SLM | Technologie 3D tisku a materiály. *Materialise / 3D Printing Innovators* [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 16.04.2021]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravu/3d-tisk-kovu>
- [12] Metallic materials for 3D printing | MRS Bulletin | Cambridge Core. *520 Origin Error* [online]. Copyright © Materials Research Society 2016 [cit. 14.05.2021]. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/metallic-materials-for-3d-printing/FC30A7754F9B7ACD9D929F614257B970>
- [13] foto – archiv autora
- [14] Murphy, S., Atala, A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol* **32**, 773–785 (2014). <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>
- [15] 3D bioprinting of tissues and organs for regenerative medicine – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2018 Elsevier B.V. All rights reserved. [cit. 31.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X18301686>
- [16] Zhang, D., Liu, X. & Qiu, J. 3D printing of glass by additive manufacturing techniques: a review. *Front. Optoelectron.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s12200-020-1009-z>
- [17] 3D Printing With Molten Glass is as Awesome as it Sounds | Digital Trends. *Digital Trends | Tech News, Reviews, Deals, and How-To's* [online]. Copyright ©2021 Designtecnica Corporation. All rights reserved. [cit. 31.05.2021]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/mit-3d-printing-with-glass-2015/>
- [18] A simple evolutionary procedure for structural optimization – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles*

and books. [online]. Copyright © 1994 Published by Elsevier Ltd. [cit. 16.03.2021].

Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004579499390035C>

[19] The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved. [cit. 14.03.2021].

Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045782502004644>

[20] Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2014 The Society of Manufacturing Engineers. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 15.03.2021].

Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612514000831>

[21] A case study on topology optimized design for additive manufacturing – IOPscience. *IOPscience* [online]. Copyright © Copyright 2021 IOP Publishing [cit. 29.03.2021].

Dostupné

z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026>

[22] Topology optimization for additive manufacturing | Request PDF. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2005 John Wiley [cit. 14.03.2021].

Dostupné

z: [https://www.researchgate.net/publication/287619745\\_Topology\\_optimization\\_for\\_additive\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/287619745_Topology_optimization_for_additive_manufacturing)

[23] Topology Optimization for Additive Manufacturing – 3DIncredible. *Additive Manufacturing in Pune | 3D metal printing | 3D Incredible* [online]. Copyright © 2017 By INCREDIBLE AM PVT LTD. [cit. 17.03.2021].

Dostupné

z: <https://3dincredible.com/topology-optimization-for-additive-manufacturing/>

[24] Detailed course: Teaching Structural Optimization – Altair University. *Global Academic Program – Altair University* [online]. Copyright © 2021 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. We are currently listed on Nasdaq as ALTR. [cit. 15.03.2021].

Dostupné

z: <https://altairuniversity.com/detailed-course-teaching-structural-optimization/>

<https://altairuniversity.com/detailed-course-teaching-structural-optimization/>

- [25] Design of lattice structure for additive manufacturing | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. [online]. Copyright © Copyright 2021 IEEE [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7790182>
- [26] Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved. Peer [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319331451>
- [27] Design and Optimization of Lattice Structures: A Review | Request PDF. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2019 Wiley Periodicals, Inc. *J Biomed Mater Res B Part B*, 2019. [cit. 27.03.2021]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/347574572> Design and Optimization of Lattice Structures A Review
- [28] Detailed course: Teaching Structural Optimization – Altair University. *Global Academic Program – Altair University* [online]. Copyright © 2021 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. We are currently listed on Nasdaq as ALTR. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <https://altairuniversity.com/detailed-course-teaching-structural-optimization/>
- [29] Topography optimization of an enclosure panel for low-frequency noise and vibration reduction using the equivalent radiated power approach – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. [cit. 20.03.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519305635>
- [30] Reduction of Mass and Sound Pressure for Automatic Transmission Using Topography Optimization. *ResearchGate | Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 28.03.2021]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/287008140> Reduction of Mass and Sound Pressure for Automatic Transmission Using Topography Optimization
- [31] Connecting architecture and engineering through structural topology optimization – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books.* [online]. Copyright © 2014 Published by Elsevier Ltd. [cit.

13.03.2021].

Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029613005014>

[32] An optimal concrete bridge — Department of Structural Engineering and Building Materials. *Universiteit Gent* [online]. Copyright © 2021 Ghent University [cit. 15.03.2021].

Dostupné

z: [https://www.ugent.be/ea/structural-](https://www.ugent.be/ea/structural-engineering/en/research/magnel/research/concreteprinting/3dbridge.htm)

[engineering/en/research/magnel/research/concreteprinting/3dbridge.htm](https://www.ugent.be/ea/structural-engineering/en/research/magnel/research/concreteprinting/3dbridge.htm)

[33] Zhu, JH., Zhang, WH. & Xia, L. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design. *Arch Computat Methods Eng* 23, 595–622 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2>

[34] Zegard, T., Paulino, G.H. Bridging topology optimization and additive manufacturing. *Struct Multidisc Optim* 53, 175–192 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1274-4>

[35] Topology Optimization for Skateboard Trucks and the Future of Design. *Redshift | Exploring the Future of Making* [online]. Copyright © 2021 Autodesk, Inc All Rights Reserved [cit. 15.03.2021]. Dostupné

z: <https://redshift.autodesk.com/skateboard-trucks-topology-optimization/>

[36] Bugatti – World premiere: brake caliper from 3-D printer. *Official BUGATTI Automotive Website* [online]. Copyright © [cit. 31.05.2021]. Dostupné z: <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>

[37] eBook: Practical Aspects of Finite Element Analysis – Altair University. *Global Academic Program – Altair University* [online]. Copyright © 2018 Altair Engineering, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, transmitted, [cit. 30.05.2021]. Dostupné z: <https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-finite-element-simulation-a-study-guide/>

[38] Detailed Explanation of the Finite Element Method (FEM). *COMSOL – Software for Multiphysics Simulation* [online]. Copyright © 2021 by COMSOL Inc. All rights reserved [cit. 30.05.2021]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>

[39] eBook: Simulation-Driven Design with Altair Inspire. *Altair | Discover Continuously. Advance Infinitely – Only Forward.* [online]. Copyright © 2021 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. We are currently listed on Nasdaq as ALTR. [cit.

30.05.2021]. Dostupné z: <https://www.altair.com/resource/free-ebook-simulation-driven-design-with-altair-inspire>

[40] Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2016 Published by Elsevier B.V. [cit. 18.06.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116304693>

[41] Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures – ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2013 CIRP. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 18.06.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581713000710>

[42] Aluminum | AlSi10Mg | Metal 3D Printing at Materialise. *Materialise | 3D Printing Innovators* [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 14.06.2021]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/aluminum>

[43] E. Sert, E. Schuch, A. Öchsner, L. Hitzler, E. Werner, M. Merkel, *Materialwiss. Werkstofftech.* 2019, 50, 539.

[44] Plast ABS – TECARAN ABS | Ensinger. *Object moved* [online]. Copyright © 2021 Ensinger [cit. 03.06.2021]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/prumyslove-plasty/abs>

[45] Prusament PETG | Prusament. *Homepage | Prusament* [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. [cit. 20.07.2021]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>

[46] Polymers | Free Full-Text | Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling | HTML. *MDPI – Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © [cit. 20.07.2021]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1220/htm>

[47] Material Properties of Thermoplastic PETG – Exceptionally Durable. *Plastic, Metal Parts, Assemblies – Dielectric Manufacturing* [online]. Copyright © 2021 Copyright Dielectric Manufacturing. All rights reserved [cit. 20.07.2021]. Dostupné z: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>

# 12 Seznamy

## 12.1 Obrázky

Obrázek 1 Křivka technologického cyklu [1] .....	8
Obrázek 2 Charles Hull [3] .....	10
Obrázek 3 Srovnání aditivní a konvenční výroby [5] .....	11
Obrázek 4 Rozdělení metod aditivních technologií [6] .....	11
Obrázek 5 3D tištěný zkušební vzorek dřeva/ PLA [8] .....	12
Obrázek 6 Schéma technologie DMLS [10] .....	13
Obrázek 7 Ukázka 3D tisku betonem – dům Prvok [13].....	14
Obrázek 8 Proces 3D „bioprintingu“ [15] .....	15
Obrázek 9 Teploty kolem trysky během procesu tisku [16].....	16
Obrázek 10 Ukázka 3D tisku roztaveného skla [17] .....	16
Obrázek 11 Srovnání jednotlivých druhů strukturální optimalizace – velikost, tvar a topologie [21] .....	17
Obrázek 12 Jednoduchý příklad optimalizace [20] .....	18
Obrázek 13 Proces topologické optimalizace [21] .....	18
Obrázek 14 Možnosti organizace mřížky [25] .....	20
Obrázek 15 Základní 3D buněčné struktury [27] .....	21
Obrázek 16 Ukázka vyplnění prostoru určitou buňkou [27] .....	21
Obrázek 17 Ukázka různě vytvořených povrchů [28] .....	22
Obrázek 18 Topograficky optimalizovaná součást [29] .....	22
Obrázek 19 Ukázka konceptu budovy [31] .....	23
Obrázek 20 Předpjatý betonový most [32] .....	24
Obrázek 21 Topologicky optimalizovaný návrh a jeho přemodelovaný díl [33].....	25
Obrázek 22 Rekonstrukce obličeje [34].....	26
Obrázek 23 Standartní podoba dílu "truck" - osa [35].....	27
Obrázek 24 Topologicky optimalizovaný díl "truck" [35].....	27
Obrázek 25 Bugatti brzdový třmen [36].....	28
Obrázek 26 Ukázka zasíťování [37] .....	30

Obrázek 27 Ukázka zasíťování součásti [38] .....	30
Obrázek 28 Ukázka knihovny materiálů.....	31
Obrázek 29 Umístění uzlů u 2D a 3D elementů [38] .....	32
Obrázek 30 Topologicky optimalizovaný díl, částečně upravený a vyhlazený.....	33
Obrázek 31 Rozložení součásti na konstrukční prvky [40] .....	34
Obrázek 32 Obecné formy základních prvků – dvojité zakřivené / jednoduše zakřivené / nezakřivené [41].....	35
Obrázek 33 Přechody pevně vázaných (vlevo) a nevázaných prvků (vpravo) s jejich atributy [41] .....	36
Obrázek 34 Ostrov, převis a akumulace materiálu [41].....	36
Obrázek 35 Základní rozměry dílu.....	39
Obrázek 36 Model pro volnou optimalizaci, včetně umístění podpor a sil .....	39
Obrázek 37 Výsledek topologické optimalizace – ukázka možnosti změny % zastoupení materiálu v návrhovém prostoru .....	40
Obrázek 38 Návrh modelu v programu Autodesk Inventor .....	42
Obrázek 39 Otvor o průměru 3,5 milimetru .....	42
Obrázek 40 Umístění válcových ploch na model .....	42
Obrázek 41 Výběr k oddělení .....	43
Obrázek 42 Hotové oddělení.....	43
Obrázek 43 Ukázka návrhového prostoru.....	44
Obrázek 44 Podpory.....	44
Obrázek 45 Působící síly umístěné na model.....	45
Obrázek 46 Výsledek analýzy základního modelu – průhyb .....	46
Obrázek 47 Výsledek analýzy základního modelu – kritérium maximálního napětí von Mises .....	46
Obrázek 48 Nastavení optimalizace .....	47
Obrázek 49 Možnost úpravy procentuálního zastoupení materiálu .....	47
Obrázek 50 Ukázka změny % zastoupení materiálu v dílu.....	48
Obrázek 51 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 1.....	48
Obrázek 52 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 2.....	49
Obrázek 53 Topologicky optimalizovaný díl – pohled 3.....	49
Obrázek 54 Kritérium maximálního napětí von Mises.....	50



Obrázek 55 Kritérium maximálního napětí von Mises – pohled 1.....	50
Obrázek 56 Výsledek Lattice optimalizace – délka elementu 3 milimetry .....	51
Obrázek 57 Výsledek Lattice optimalizace – délka elementu 6 milimetrů .....	51
Obrázek 58 Výsledek lattice optimalizace – průhyb – délka elementu 6 milimetrů .....	52
Obrázek 59 Výsledek Lattice optimalizace – kritérium maximálního napětí von Mises (délka elementu 6 milimetrů) .....	52
Obrázek 60 Analýza základního modelu – průhyb a maximální napětí von Mises.....	54
Obrázek 61 Topologická optimalizace – pohled 1.....	55
Obrázek 62 Topologická optimalizace – pohled 2.....	55
Obrázek 63 Topologická optimalizace – pohled 3.....	56
Obrázek 64 Výsledek lattice optimalizace - 3 a 6 milimetrů .....	56
Obrázek 65 Analýza maximálního napětí von Mises.....	57
Obrázek 66 Ukázka problému s plochou.....	60
Obrázek 67 Vlevo: vzniklý převis; Vpravo: problém s plochou při odstraňování převisu.....	60
Obrázek 68 Výsledek topologické optimalizace – detail na koncovou část.....	61
Obrázek 69 Zasiťování povrchu modelu.....	61
Obrázek 70 Naznačení postupného předělání hran.....	62
Obrázek 71 Topologicky optimalizovaný díl upravený funkcí Polynurbs.....	62
Obrázek 72 Detail na koncovou část kliky .....	62
Obrázek 73 Topologicky optimalizovaný díl.....	64
Obrázek 74 Topologicky optimalizovaný díl upravený funkcí „PolyNURBS“ .....	64
Obrázek 75 Model vyplněný mřížkovou strukturou v délce elementu 3 a 6 milimetrů .....	64

## 12.2 Tabulky

Tabulka 1 Přechody pevně spojených prvků .....	37
Tabulka 2 Přechody nevázaných prvků .....	37
Tabulka 3 Hromadné struktury .....	38
Tabulka 4 Porovnání výsledných charakteristik u volného modelu.....	40
Tabulka 5 Vlastnosti materiálů.....	41
Tabulka 6 Přehled návrhových řešení modelu .....	41
Tabulka 7 Hmotnosti základního modelu a jejich návrhového prostoru.....	45
Tabulka 8 Časy jednotlivých výpočtů v procesu.....	50
Tabulka 9 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu ABS.....	53
Tabulka 10 Jednotlivé časy výpočtů .....	54
Tabulka 11 Porovnání volených charakteristik při zadávání výpočtu LS.....	56
Tabulka 12 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu AlSi10Mg.....	57
Tabulka 13 Výsledné charakteristiky modelu před a po úpravě.....	63
Tabulka 14 Experimentální měření – ABS .....	65
Tabulka 15 Vlastnosti materiálu PETG dle materiálových listů.....	66
Tabulka 16 Porovnání všech charakteristik modelů u materiálu PETG .....	66
Tabulka 17 Experimentální měření – PETG .....	67
Tabulka 18 Experimentální měření – PETG – mřížkové struktury bez podpor .....	68

## 12.3 Grafy

Graf 1 Graf maximálních průhybů u materiálu ABS .....	65
Graf 2 Maximální průhyb u materiálu PETG.....	67
Graf 3 Maximální průhyb u dílů bez použití podpor .....	68
Graf 4 Porovnání hmotnosti dílů a jejich průhybů u materiálu PETG .....	69
Graf 5 Porovnání hmotnosti dílů a jejich průhybů u materiálu ABS .....	69

## 12.4 Zkratky

1D	jednorozměrný
2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
ABS	akrylonitril-butadien-styren
AM	additive manufacturing – aditivní výroba
AT	aditivní technologie
CAD	computer – aided design
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	fine element method – metoda konečných prvků
LM	Laser Melting
LS	Lattice structure – mřížková struktura
PA	polyamid
PC	Polykarbonát
STL	nativní formát souboru stereolitografického programu pro CAD
PLA	kyselina polymléčná
SLA	stereolitografie
TO	topologická optimalizace