



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Topologická optimalizace konstrukčních
prvků nízkopodlažní tramvaje

Topological optimization of structural
components of low-floor tram

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2021

LUKÁŠ FARA

Studijní program: Dopravní a transportní technika
Specializace: Kolejová vozidla
Vedoucí práce: Ing Jan Kalivoda, Ph.D.



I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fara** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **465382**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Kolejová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Topologická optimalizace konstrukčních prvků nízkopodlažní tramvaje

Název diplomové práce anglicky:

Topological optimization of structural components of low-floor tram

Pokyny pro vypracování:

1. Popište základní princip topologické optimalizace a vypracujte rešerši softwarových nástrojů topologické optimalizace.
2. Vypracujte modelový příklad topologické optimalizace jednoduché strojní součásti. Úlohu řešte s využitím různých softwarových nástrojů. Proveďte porovnání funkcionality nástrojů topologické optimalizace od jednotlivých dodavatelů a posuďte vhodnost těchto softwarových produktů pro využití při návrhu pevnostně namáhaných struktur kolejových vozidel.
3. Navrhněte metodiku využití topologické optimalizace při návrhu pevnostních struktur nízkopodlažní tramvaje a její aplikaci demonstруйте na konkrétním příkladu.
4. Proveďte zhodnocení dosažených výsledků a zhodnoťte přínos navržené metodiky při návrhu pevnostních struktur kolejových vozidel.

Seznam doporučené literatury:

[1] Švejnoch V. a kol., Teorie kolejových vozidel, [2] Kolář, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel, [3] normy ČSN, EN a TSI, [4] firemní literatura, odborné časopisy

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Kalivoda, Ph.D., Fakulta strojní

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

Datum zadání diplomové práce: **14.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

Ing. Jan Kalivoda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta





Anotační záznam

Jméno autora: Lukáš Fara

Název práce: Topologická optimalizace konstrukčních prvků nízkopodlažní tramvaje

Anglický název: Topological optimization of structural components of low-floor tram

Rozsah práce:

- 75 stran
- 85 obrázků
- 08 tabulek
- 00 grafů

Akademický rok: 2020/2021

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Dopravní a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Jan Kalivoda Ph.D.

Klíčová slova: optimalizace topologie, Ansys, SATram, hmotnostní optimalizace

Key words: topology optimization, Ansys, SATram, mass optimization



Abstrakt

V práci je popsán základní princip optimalizace topologie a provedena rešerše několika softwarů, které nabízejí modul těchto optimalizací. V těchto vybraných softwarech proběhla praktická zkouška optimalizace topologie na jednoduché strojní součásti, které měla za cíl seznámení a zhodnocení použitelnosti nástroje pro další optimalizace složitějších konstrukčních celků. Na základě této praktické zkušenosti jsem zvolil software ANSYS 2021 R1, který se zdá být nejvhodnější, z hlediska nabízených možností a licencí.

V tomto softwaru bylo uskutečněno mnoho optimalizací, jak na jednoduchých dílech pro ověření některých funkcí, tak na složitějších modelech, jako je zjednodušená skříň tramvaje. Tyto optimalizace slouží pro sestavení metodiky optimalizace topologie složitějších konstrukčních celků.

Abstract

The work describes the basic principle of topology optimization and searches for several software that offer a module of these optimizations. In these selected software, a practical test of topology optimization on simple machine parts was performed, which aimed to acquaint and evaluate the usability of the tool for further optimization of more complex structural units. Based on this practical experience, I chose the ANSYS 2021 R1 software, which seems to be the most suitable, in terms of the options and licenses offered.

Many optimizations have been made in this software, both on simple parts to verify some functions and on more complex models, such as a simplified tram construction. These optimizations are used to compile the optimization methodology



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “ Topologická optimalizace konstrukčních prvků nízkopodlažní tramvaje ” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 14.7.2021

.....

(podpis autora)



Poděkování

V této části bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Janu Kalivodovi Ph.D. za věcné připomínky, podporu a skvělou spolupráci při vedení mé diplomové práce.

Dále velké poděkování patří technikům a designerům ze Škody Transportation za poskytnuté podklady, konzultace a podporu po celou dobu vytváření diplomové práce.



Obsah

1 Úvod.....	1
2 Základní pojmy.....	2
3 Optimalizace topologie.....	4
3.1 Metody zobecněné optimalizace tvaru (GSO) s využitím MKP	5
3.1.1 Topologie tvořené izotropními pevnými či prázdnými elementy – ISE topologie	5
3.1.2 Topologie tvořené anizotropními pevnými či prázdnými elementy – ASE topologie ..	7
3.1.3 Topologie tvořené izotropními pevnými, prázdnými či pórovitými elementy – ISEP-, ISEC, ISECP-topologie.....	8
3.2 Metody řešení zobecněné optimalizace tvaru (GSO) v případě ISE a IS topologii	9
3.2.1 Metoda SIMP	10
3.2.2 Metoda LEVEL SET	11
4 Obecné zásady optimalizace topologie	12
5 Přehled softwaru pro optimalizaci topologie	13
5.1 Profil pro optimalizaci topologie	14
1.1 ANSYS 2021 R1.....	15
5.1.1 Praktická ukázka a popis Ansys Mechanical.....	16
5.2 Autodesk Inventor 2019	18
5.2.1 Praktická ukázka	19
5.3 Creo 6.0.....	19
5.3.1 Praktická ukázka	20
5.4 Solid Works	21
5.4.1 Praktická ukázka	21
5.5 Zhodnocení SW	22
6 Zvolený SW	24
6.1 Příprava modelu	24
6.2 Síťování modelu	24
6.3 Nastavení optimalizace.....	24
6.4 Postup ověření optimalizovaného modelu	25
7 Výchozí koncept SATram	26
8 Optimalizace topologie V ANSYS 2021 R1	28
8.1 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje.....	28



8.2 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje podle zátěžového stavu 1.....	30
8.2.1 Problematika spojitosti modelu	33
8.3 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje s dveřmi a okny podle zátěžového stavu 1	36
8.3.1 Optimalizace plošného modelu.....	38
8.3.2 Optimalizace čtvrtiny původního modelu.	40
8.4 Využití symetrie	42
8.4.1 Nosník fixní uložení.....	44
8.4.2 Nosník uložený s volnou rotací kolem osy Y.....	52
8.4.3 Zhodnocení výsledku testu.....	60
9 Optimalizace SATram.....	61
9.1 Zátěžový stav 1	61
9.2 Zátěžový stav 2	65
10 Metodika pro optimalizaci topologie	68
11 Závěr	70
12 Seznam obrázků.....	72
13 Seznam tabulek	74
14 Citovaná literatura.....	75



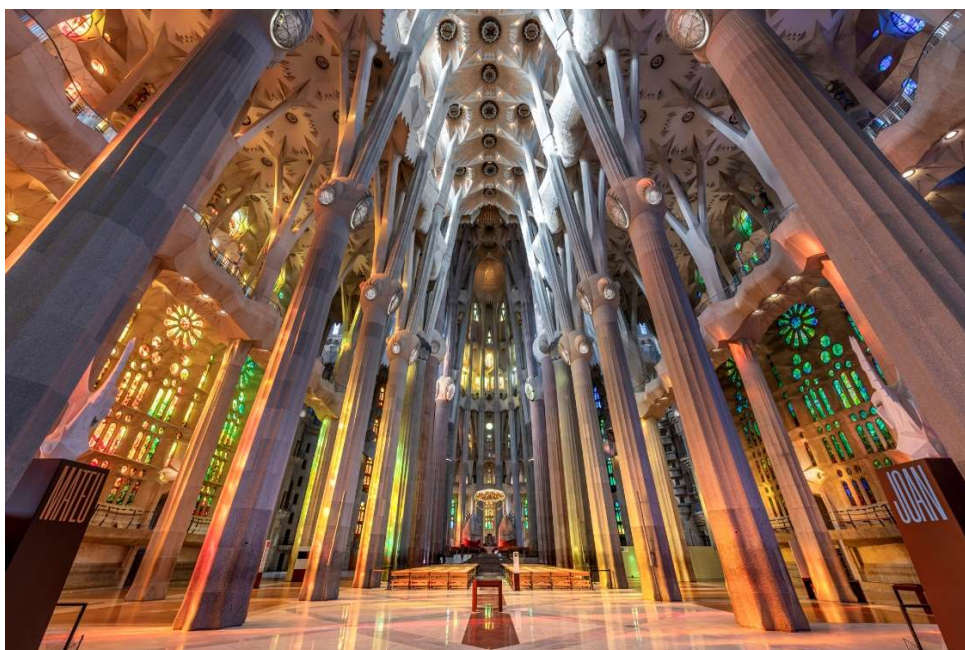
Seznam použitých zkratek

ASE	Anisotropic Solid or Empty element
DB	Density Based
GSO	Generalized shape optimization
IS	Isotropic Solid
ISE	Isotropic-Solid or Empty elements
ISEP	Isotropic Solid, Empty or Porous element
LS	LEVEL SET
MKP	Metoda konečných prvků
OT	Optimalizace topologie
ŠT	Škoda Transportation



1 Úvod

Při navrhování staveb a konstrukci se lidé vždy inspirovali přírodou, jelikož příroda se vždy snaží jít cestou, která jí stojí nejmenší množství energie. V přírodě tedy nenajdeme například pravé úhly anebo ostré přechody průřezů, kde by se koncentrovalo napětí. V minulosti se přírodou inspiroval například architekt Antoni Gaudí při návrhu chrámu Sagrada Família ve Španělské Barceloně. Architekt se inspiroval kmenem stromů při návrhu sloupů v celém interiéru chrámu, jak je vidět na Obrázek 1. Svým způsobem upravil topologie sloupů tak aby lépe využil materiál a roznesl hmotnost střechy. Vznikla tím také jedinečná a velice působivá architektura vnitřních prostor chrámu.



Obrázek 1 Sagrada Família Barcelona (1882 začátek stavby)

V současnosti také pozorujeme několikanásobně pevnější struktury s nízkou hmotností s maximálně využitým materiálem. Jedná se o organické struktury, které lze opět nalézt v přírodě, například na rostlině Mochyně židovská třešeň, kde je taková struktura patrná na obalu plodu.

Práce se bude zabývat problematikou optimalizace topologie a vytváření takzvaných organických struktur za pomoci sofistikovaných výpočetních metod. S jejich využitím se budeme snažit dosáhnout úspory hmotnosti a maximalizování využití materiálu v nosných strukturách skříně tramvaje. Primárním cílem je snížení hmotnosti produktu a tím i snížení nákladů na jeho provoz. Mimo úspory materiálu a hmotnosti nabízejí tyto struktury v dnešní době velice atraktivní design a setkáváme se s nimi ve velice široké oblasti průmyslu a umění.

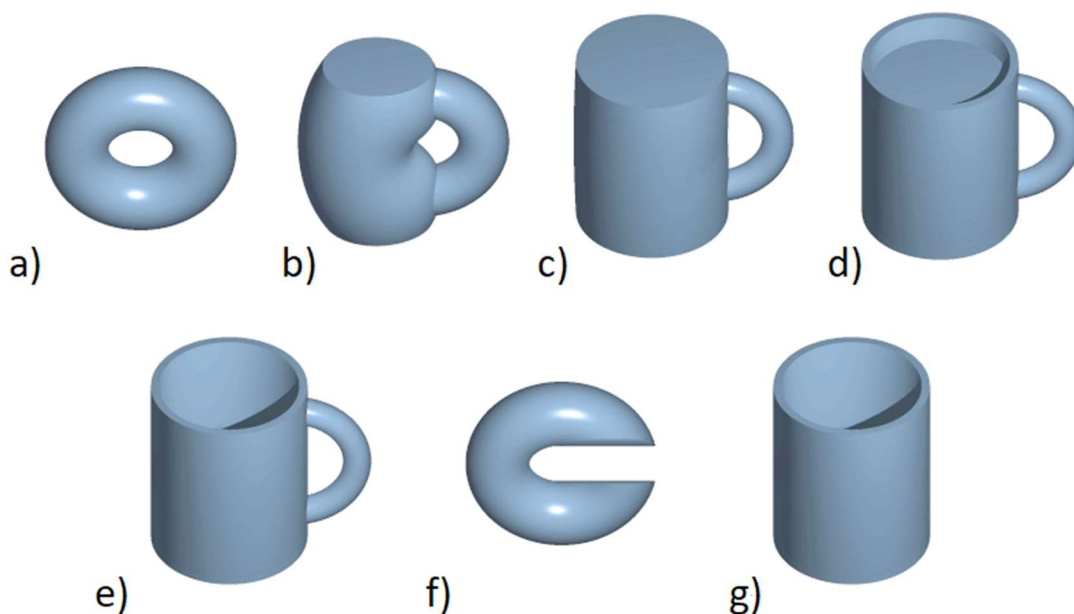


2 Základní pojmy

Topologie – „obor matematiky zabývající se zkoumáním vlastností geometrických útvarů, které se zachovávají při vzájemně jednoznačných oboustranně spojitých zobrazeních“ [1]

Jedná se o spojitě deformace tělesa, což znamená, že těleso se při deformaci neroztrhne, ani v něm nevzniknou nové otvory a zachová si spojitě zobrazení. Na Obrázek 2 (a–e) je zobrazena přeměna anuloidu v hrneček. Všechna tělesa (a–e) jsou topologicky ekvivalentní, nedošlo k roztržení, ani vzniku nového otvoru, ale jen k deformaci. Obrázek 2 (f) zobrazuje těleso které není s původním (a) v rámci topologie ekvivalentní, jelikož došlo k jeho roztržení. Obrázek 2 (g) opět zobrazuje z hlediska topologie rozdílné těleso oproti původnímu (a), jelikož zanikl otvor v tělese.

Optimální topologie je optimální rozložení materiálu v návrhovém prostoru.



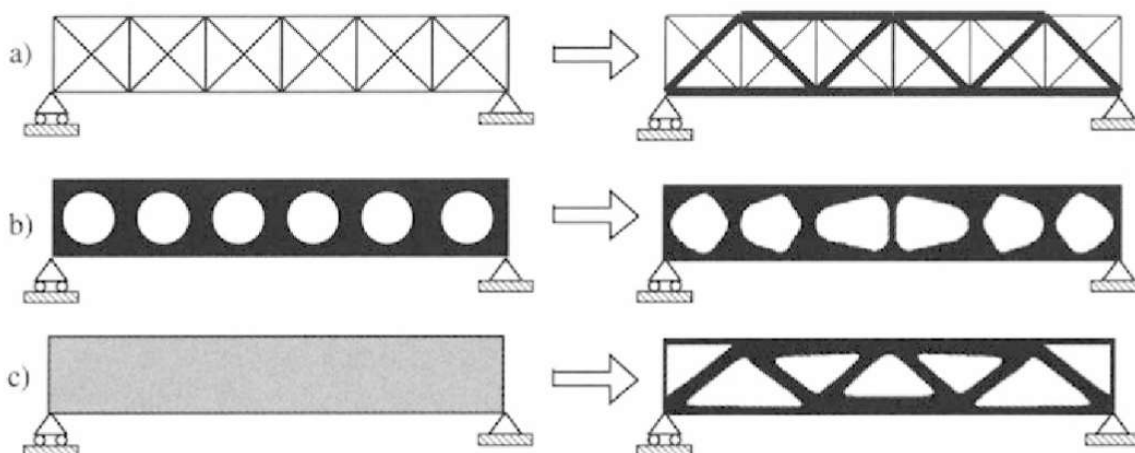
Obrázek 2. Topologicky ekvivalentní tělesa [2]

Optimalizace – „proces výběru nejlepší varianty z množství možných jevů“ [3]



Optimalizace konstrukčního návrhu

K optimalizaci konstrukčního návrhu můžeme přistupovat z více hledisek, jak je uvedeno na Obrázek 3.



Obrázek 3. Příklad tří strukturálních optimalizací konstrukčního návrhu. (a) Optimalizace dimenze prutové struktury, (b) Optimalizace tvaru, (c) Optimalizace topologie. Na levé polovině jsou naznačeny výchozí konstrukce a na pravé jsou naznačeny optimalizované konstrukce. [4]

Optimalizace dimenze prutové struktury – upravuje předem navrženou strukturu prutových elementů a z hlediska zatížení přiřazuje jednotlivým elementům fyzikální vlastnosti. Optimalizace je významně ovlivněna návrhem prutové struktury autorem.

Optimalizace tvaru – upravuje pouze tvar součásti a topologie se nemění. Je značně ovlivněna původním návrhem a počtem daných otvorů v modelu.

Optimalizace topologie (ve zkratce) – vyhledává předem neznámý tvar a topologii navrhované konstrukce, tak aby byla optimální. Předem jsou známy pouze okrajové podmínky (např. umístění podpor, vnější silové účinky, prostor pro konstrukci) a optimalizační kritéria. Optimalizačních kritérií je možno použít několik (hmotnost, maximální napětí, tuhost atd.), nejčastěji se jedná o hmotnost konstrukce, která je základním hlediskem hospodárnosti konstrukce. [5]



3 Optimalizace topologie

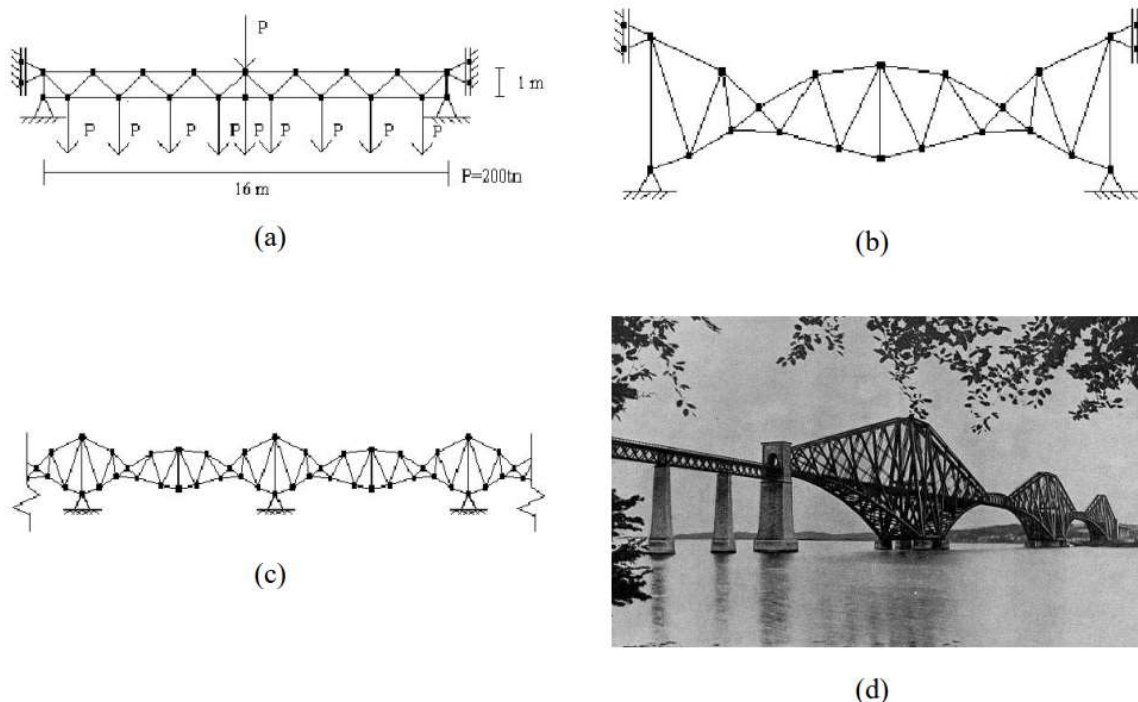
Jedná se relativně mladou a rychle se vyvíjející matematickou metodu, která optimalizuje rozložení materiálu v daném návrhovém prostoru pro dané okrajové podmínky. Jako jsou vnější zatížení, kotvící body a vlivy okolního prostředí (teplota, tlak). To vše s ohledem na stanovené cíle a omezení dané optimalizace se snahou maximalizovat výkonost systému. Optimalizace topologie usiluje o násobně větší ušetření materiálu (*hmotnosti*), než lze dosáhnout optimalizací rozměru (*průřezu*) či tvaru, tohoto výsledku optimalizace topologie dosahuje především tím, že v daném návrhovém prostoru může dosáhnout jakéhokoliv tvaru a není vázána předdefinovanými variantami. [6]

Optimalizaci topologie lze rozdělit na dvě základní části:

- a) Optimalizace dispozice (*Layout Optimization*), se zabývá řešením konstrukcí s malým objemem ve srovnání s návrhovou oblastí, jako jsou například pruty, rámy a rošty. (*Konstrukce s malým objemovým zlomkem*)

Tato metoda se opírá o práce A. G. M. Michella, který v sedmdesátých letech položil základ pro systém s pruty a rámy. Dále na jeho práci navázal G. I. N. Rozvany, který rozšířil metodu o rošty. Na základě těchto metod byly později sestaveny obecné principy optimalizace dispozice, tedy konstrukce složené z nosníkových prvků (*beam systém*).

Na Obrázek 4 je zobrazen příklad použití optimalizace dispozice



Obrázek 4. (a) diagram pro výpočet úlohy, (b) optimální řešení úlohy, (c) optimalizovaná konfigurace vytvořená řetěžením základního modulu, (d) Forth Birdge, postavený v letech 1883-1890 jako příklad optimalizované topologie [5]



- b) Zobecněná optimalizace tvaru (*Generalized Shape Optimization*), jedná se o optimalizaci topologie pro frakce s větším návrhovým objemem (*konstrukce s velkým objemovým zlomkem*). V tomto případě se řeší jak topologie, tak i tvar navrhované konstrukce. Nejčastějším řešitelem je metoda konečných prvků. [6]

3.1 Metody zobecněné optimalizace tvaru (GSO) s využitím MKP

Konvenční optimalizace topologie používá metodu konečných prvků k vyhodnocení návrhu konstrukce. Návrh je optimalizován pomocí mechanismů matematického programování založených na gradientu, jako je algoritmus kritérií optimality, nebo metoda přesunu asymptot. Existují i algoritmy, které nejsou založeny na gradientu, a to genetické algoritmy. [7]

Souhrn používané terminologie pro zobecněnou optimalizaci tvaru s využitím MKP [7]

- Pevný (Solid – S) element vyplněný výhradně jedním materiálem
- Prázdný (Empty – E) prázdný element, neobsahuje žádný materiál
- Pórovitý (Porus – P) element je složen z plného materiálu a prázdného prostoru
- Kompozitní (Composite – C) element je vyplněný více různými materiály
- Kompozitní pórovitý (Composite-Porous – CP) element je složen z více materiálů a také obsahuje prázdný prostor

Souhrn terminologie používaných metod [7]

- Izotropní pevný či prázdný element (Isotropic Solid or Empty element – ISE)
- Anizotropní pevný či prázdný element (Anisotropic Solid or Empty element – ASE)
- Izotropní pevný, prázdný či pórovitý element (Isotropic Solid, Empty or Porous element – ISEP)

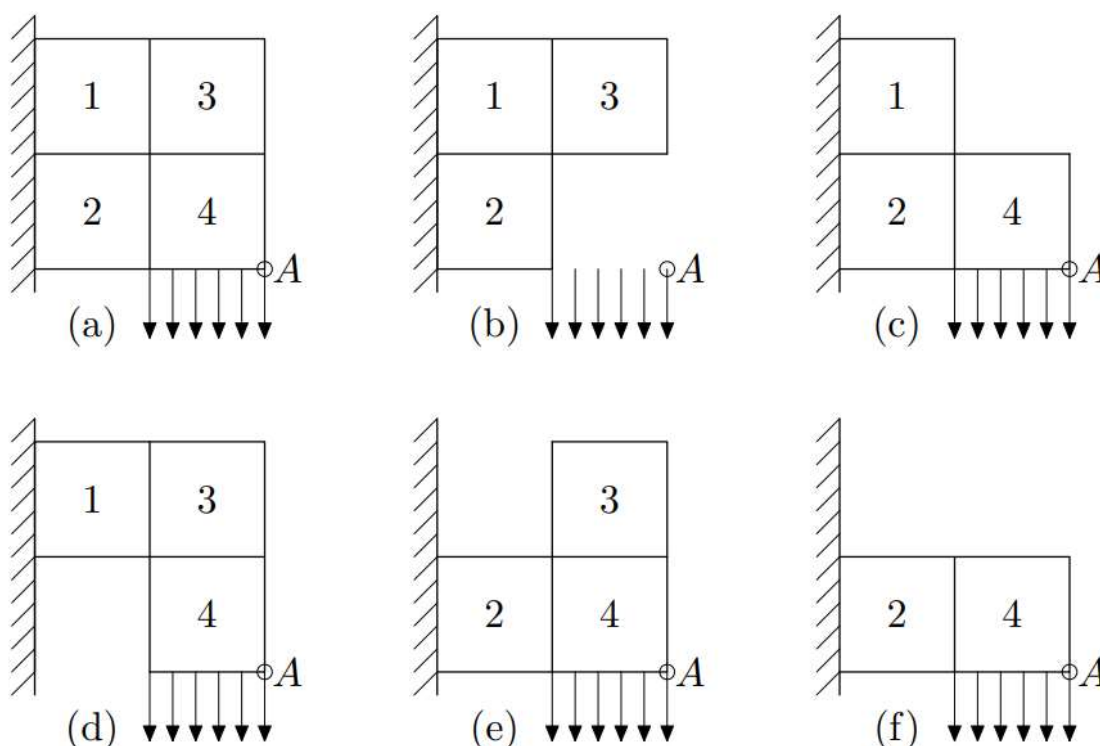
3.1.1 Topologie tvořené izotropními pevnými či prázdnými elementy – ISE topologie

U ISE topologie uvažujeme dva přístupy: s pevně danou sítí elementů, nebo s proměnnou sítí, která se během optimalizace tvoří. Pro vysvětlení se omezíme na pevně stanovenou síť tvořenou prázdnými či plnými elementy z daných izotropních materiálů o známých vlastnostech. V případě předpokladu, že se topologie skládá ze čtyř různých materiálů okolo prázdného elementu, pak hovoříme o 4ISE topologii. V případě absence prázdných elementů hovoříme o takzvaných IS-topologiích. Nejjednodušší variantou je 1ISE topologie (*černobilá*), kdy se distribuuje pouze jeden materiál v dané síti.

Příkladem je deska kde tloušťka libovolného prvku je omezena nulovou nebo nenulovou hodnotou. Na Obrázek 5 je naznačen příklad desky ($2 \times 2 = 4$) elementy sítě. Dva prvky (1, 2) jsou podepřeny na levém okraji a jeden prvek (4) je rovnoměrně zatížen na



spodním okraji (*okrajové podmínky*). Zatížení se přenáší konstrukcí na podpory, tak aby pravý dolní roh (A) měl minimální posunutí ve svislém směru (*cíl optimalizace*). Jakýkoliv prvek je buď plný, anebo prázdný a objemový podíl je minimálně 75 %. Při mezním objemovém zlomku 75 % máme čtyři možná řešení (b,c,d,e). Řešení (b) je neproveditelné, jelikož zatížení se nemá, jak přenést do podpory. Řešení (c) je optimální rozložení elementů k minimalizaci posunu bodu A. Zbývá dvě řešení jsou možná, nicméně nejsou optimální pro daný cíl. Pro objemový podíl 50 % je možné jen jedno řešení (f), které je ovšem také neoptimální. Při objemovém zlomku 25 % nemáme žádné proveditelné řešení, jelikož nejsme schopni přenést vnější zatížení do podpory pomocí optimalizované konstrukce.



Obrázek 5. Příklad představující 1ISE-topologii: (a) návrhová oblast pokrytá MKP sítí, (b) nepřípustné řešení, (c) optimální řešení, (d–f) přípustná řešení, nikoli optimální [6]

V praktických případech optimalizaci topologie řešíme se značně větším počtem elementů, nicméně základní princip zůstává stále stejný jako v uvedeném příkladu na Obrázek 5.

Problematika se začne zásadně měnit, pokud změníme omezení optimalizace na maximální posun bodu A ve vertikálním směru a jako cíl zvolíme minimalizovat hmotnost, nebo celkový objem, a omezení hmotnostního zlomku zvolíme 75 %. Dále můžeme snadno přidat další omezení optimalizace, jako jsou například napětí a vlastní frekvence. Všechny tyto omezení se vztahují k modelu konečných prvků. To znamená, že namísto nekonečného napětí v rohu uvažujeme pouze diskretizovaná napětí v uzlech konečno prvkové sítě, nebo průměrná napětí pro každý element. Koncentrací napětí ve skutečném modelu se dá



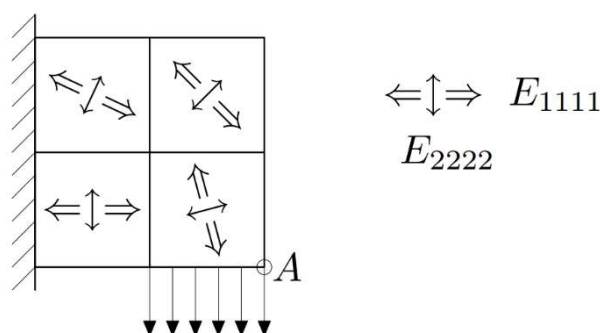
vyhnout optimalizací druhého stupně. Jelikož 1 ISE topologie (*černobílá topologie*) je problémová z hlediska diskretní proměnné (0–1) zahrnujících $2 \cdot N$ možných řešení (N je daný počet elementů). Jak je patrné v příkladu zobrazeném na Obrázek 5 je mnoho řešení neproveditelných. V případě n ISE topologie je počet řešení $(n + 1) \cdot N$. Kde n je počet materiálů.

ISE-topologie je pouze zvláštním případem IS-topologie ve které hustota a mechanické vlastnosti jednoho materiálu mají tendenci se přibližovat k nule, a proto element degraduje do prázdného elementu. Například 1ISE topologie je opět speciálním případem 2ISE

ISE topologie se používá pro praktické konstrukční problémy, u kterých hledáme řešení s izotropním modelem složeného z prvků, které jsou alespoň stejně velké jako velikost použitých elementů sítě. Aplikace této metody se hojně využívají ve většině průmyslových odvětví. [7], [6]

3.1.2 Topologie tvořené anizotropními pevnými či prázdnými elementy – ASE topologie

Při diskretizaci lze také použít anizotropní prvky, pokud chceme pracovat s konstrukcí o velkém objemu materiálu. Tento přístup se nazývá ASE-topologie. V elementech se řídí orientace a velikost mechanických vlastností tenzorem E_{ijk} konstantním pro každý prvek. Stejně jako v předchozím přístupu s izotropními elementy se elementy mohou proměnit v prázdné. Na Obrázek 6 je uveden příklad takovéto ASE-topologie za předpokladu, že pracujeme pouze s materiálovými vlastnosti E_{1111} a E_{2222}

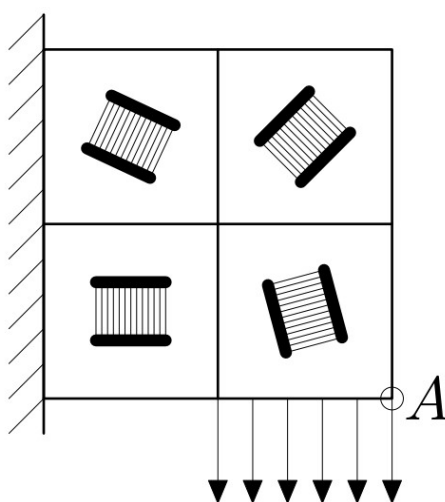


Obrázek 6 příklad ASE-topologie [6]



3.1.3 Topologie tvořené izotropními pevnými, prázdnými či pórovitými elementy – ISEP-, ISEC, ISECP-topologie

Pomocí MKP se můžeme pokusit přiblížit k přesné homogenní topologii kontinua, pokud bychom dosáhli nekonečně malých elementů. Pro každý konečný element použijeme homogenizované anizotropní vlastnosti původně nehomogenních elementů. Tyto topologie se opět skládají z prázdných elementů a jednoho nebo několika izotropních materiálů. Výše uvedené topologie se před homogenizací nazývají ISEP topologie a po homogenizaci s využitím anizotropních vlastností se redukují na ASE topologii. Tento převod je výhodný z hlediska výpočetního času. Na Obrázek 7 je znázorněn příklad takovéto topologie. Podrobněji popsáno v [7], [6]



Obrázek 7. Příklad ISEP-topologie [6]



3.2 Metody řešení zobecněné optimalizace tvaru (GSO) v případě ISE a IS topologií

Jelikož většina praktických problémů je v současné době spojena s topologiemi ISE a IS, omezíme se pouze na metody pro řešení těchto topologií. Metody jsou shrnuty v Tabulce 1.

Tabulka 1. Přehled metod řešení zobecněné optimalizace tvaru (GSO) [7]

	SIMP	OMP	NOM	DDP
Mikrostruktura elementů	Pevný (solid), izotropní	Optimální nehomogenní	Neoptimální nehomogenní	Pevný (solid), izotropní
Dodatečná penalizace	ANO	ANO	NO	Není nutná
Nutná homogenita	NE	ANO	ANO	NE
Počet proměnných parametrů na element	1	2D*: 3 nebo 4 3D: 5 nebo 6	>1	1
Dostupné pro	Všechny kombinace konstrukčních omezení	minimalizaci shody	Všechny kombinace konstrukčních omezení	minimalizaci shody
Přiměřená penalizace	ANO	ANO	NE	-

* ortogonální nebo neortogonální lamináty 2. stupně

Podrobněji zde budou popsány metody, které využívají vybrané software. Další metody uvedené v tabulce 1 jsou podrobně popsány v [6] [7] [4]



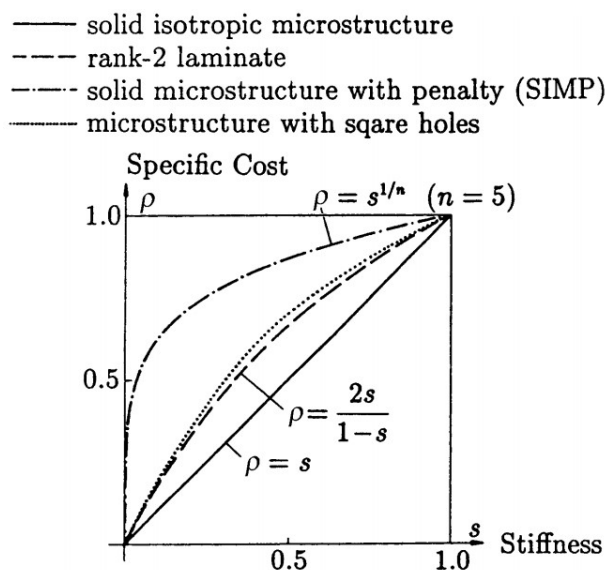
3.2.1 Metoda SIMP

Tato metoda uvažuje pevnou izotropní mikrostrukturu a k řešení využívá penalizaci (*Solid Isotropic Microstructures with Penalization – SIMP*). Použití této metody lze zdůvodnit příkladem na děrované desce v rovinném napětí, která má nulovou, nebo nenulovou (t_0) tloušťku a předpokládáme, že deska se skládá ze 40 000 elementů. Pro tento příklad bychom museli použít velký počet analýz ($2^{40\,000}$ až 10^{12041}) [7], což by bylo velice náročné. Východiskem je uvažovat spojitě se měnící tloušťku desky $t \in (0; t_0)$. Mechanické vlastnosti desky jsou na tloušťce lineárně závislé a můžeme tedy snadno minimalizovat hmotnost dané desky pomocí kritéria optimality, nebo metody matematického programování. Ve skutečnosti má tento problém pro jednotlivé omezení konvexní průběh, a proto je optimální hodnota snadno vypočitatelná.

Jistá nedokonalost tohoto přístupu spočívá, že v ISE-topologiích přicházejí v úvahu pouze dvě hodnoty. Nulová a nenulová tloušťka (t_0) Všechny ostatní tloušťky v intervalu ($0 < t < t_0$) se v návrhu dají omezit na minimum pomocí penalizace těchto hodnot. Tento postup je znázorněn graficky na Obrázek 8 (Pro $p = 1$ plná čára na Obrázek 8, $p = 5$ čerchovaná čára na Obrázek 8; P – v názvu), kde je uveden vztah mezi normalizovanou tuhostí desky (v rovinném napětí) a měrnou hodnotou, respektive parametrem hustotou ρ . U desky pro různé tloušťky bez penalizace je tento vztah přímka. Mezilehlé hodnoty tedy lze penalizovat pomocí zavedení specifické tloušťky, respektive parametru hustoty ρ pomocí které je vyjádřena tloušťka t a je dána vztahem

$$t = \rho^p$$

kde $p < 1$.



Obrázek 8. Tuhost (s) parametr hustoty (ρ) pro různé mikrostruktury [7]



Tento způsob penalizace potlačí mezilehlé hodnoty, nicméně činí danou úlohu nelineární a nekonvexní. Z tohoto důvodu je obvyklé začínat výpočet s hodnotou $p = 1$ a postupně tuto hodnotu zvyšovat na doporučených $p = 5$.

3.2.2 Metoda LEVEL SET

Tato metoda je podstatně mladší cca 10 let oproti metodě SIMP, která je stará cca 30 let. Tato metoda pracuje na jiném principu než metoda SIMP, která je založena na určování parametru hustoty. Metoda LEVEL SET pracuje s hranicemi součásti, které se v průběhu iterací mění pomocí shape function (*Level set function*). Na základě tohoto přístupu má výsledná struktura hladší povrch, což přináší zjednodušení při následném zpracování struktury. Jedná se metodu, kterou lze využít v softwaru ANSYS.

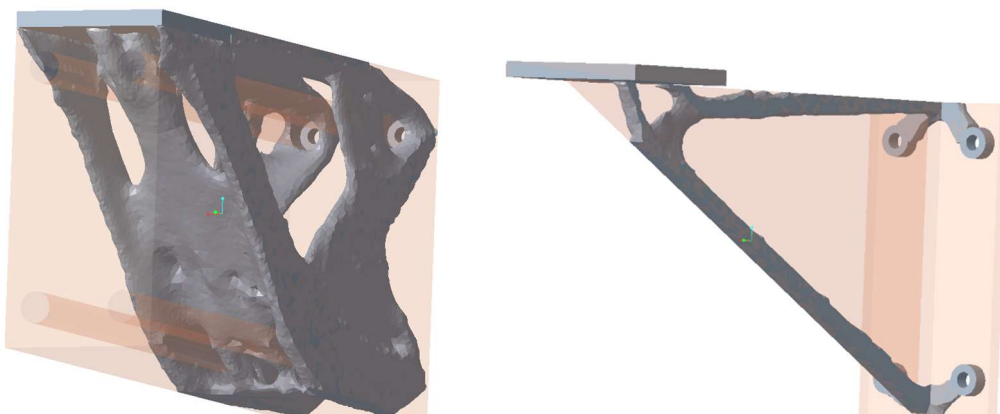
Podrobnější informace a matematické pozadí metody je zpracováno v [8]



4 Obecné zásady optimalizace topologie

Při využívání optimalizace topologie bychom měli dodržovat jisté obecné zásady.

- 1) **Maximalizovat návrhový prostor** – to znamená, pokud provádíme optimalizaci topologie nějaké součásti je zapotřebí, maximalizovat optimalizační prostor, pro dosažení optimálního výsledku. Příklad je zobrazen na Obrázek 9. v pravé části je optimalizační region pouze objem původní součásti a na obrázku vlevo je maximalizovaný optimalizační region. (Výsledky jsou pro jiné omezení)



Obrázek 9. Optimalizační prostor.

- 2) **Volba velikosti elementu** – je nutné volit velikosti elementu ve správném poměru k velikosti součásti. V případě tenkostěnných optimalizací je zapotřebí mít alespoň 2 a více elementů po tloušťce.
- 3) **Shell x Solid** – pokud je možné provést zjednodušení optimalizovaného dílu do ploch, je vhodné to udělat. Dojde tak k výraznému zkrácení optimalizačního času a ušetření elementů.
- 4) **Validace optimalizovaných struktur** – optimalizované struktury slouží pouze jako inspirace pro konstrukční řešení. Všechny optimalizované modely je tedy nutné znovu ověřit pomocí pevnostního výpočtu.



5 Přehled softwaru pro optimalizaci topologie

Pro získání informací o softwarech umožňující optimalizace topologie, byla provedena rozsáhlá rešerše. Výsledkem je Tabulka 2, kde je uvedeno množství (cca 40) různých aplikací, které využívají v různých adaptacích výše uvedené metody. Lze nalézt jednoduché aplikace, sloužící pro demonstrativní účely optimalizace topologie, a také aplikace využívající komplexní a složité algoritmy pro optimalizace topologie složitějších konstrukčních celků. U aplikací je důležité se zaměřit také na verzi, některé nabízí optimalizaci topologie až od vyšších verzí. Například Creo od veze Creo 5.0 a vyšší.

Tabulka 2. *Softwaru a moduly pro optimalizaci topologie*

Abaqus	LS Task
Altair	LS-OPT
ANSYS	Matlab
Autodesk Inventor	Nastran
Autodesk Fusion 360	ODESSY
BESO	OPTISHAPE-TS
BOSS quattro	OptistructPareTO
Catia	PERMAS
CATOPO	ProTop
COMSOL	SFE
Creo 6.0	Simens NX
Dynaflow	SmartDO
Eyeshot	SolidEdge
FELyx	SolidThinking
Femap	Solidworks
FEMTools	TOPLSM
Fomd	TOPO4ABQ
Forcepad	TopOpt
FreeFEM++	Topostruct
GPUPop	ToPy
Impact	TOSCA
LS Dyna	Trinitas

Tabulka 2 obsahuje různé softwary, lze je rozdělit primárně do dvou kategorií, do kategorie CAD software s modulem pro optimalizaci topologie a výpočetní software s optimalizací topologie. V tabulce lze také nalézt softwary, které jsou dostupné zdarma, jako například: Eyeshot, FreeFEM++, ProTop a TopOpt. Například aplikace TopOpt je zdarma dostupná na Google Play a je možno si vyzkoušet základní principy černobílé optimalizace (*White and Black*) ve velice intuitivním prostředí, kde se zadávají pouze podpory, síly a region optimalizace.

Do kategorie CAD software se řadí: Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360, Catia, Creo 6.0, Eyeshot, Simens NX, SolidEdge, SolidThinking, Solidworks.



Do kategorie výpočetních software se dá zařadit zbytek softwarů uvedený v Tabulka 2. Některé tyto aplikace jsou implementovány do jiných softwarů jako například TOSCA je nyní součástí výpočetního softwaru Abaqus.

Z těchto dostupných softwarů umožňující optimalizace topologie se vybraly na základě dostupností a možností použití následující software pro praktickou zkoušku.

Seznam softwarů dostupných pro praktickou zkoušku optimalizace topologie:

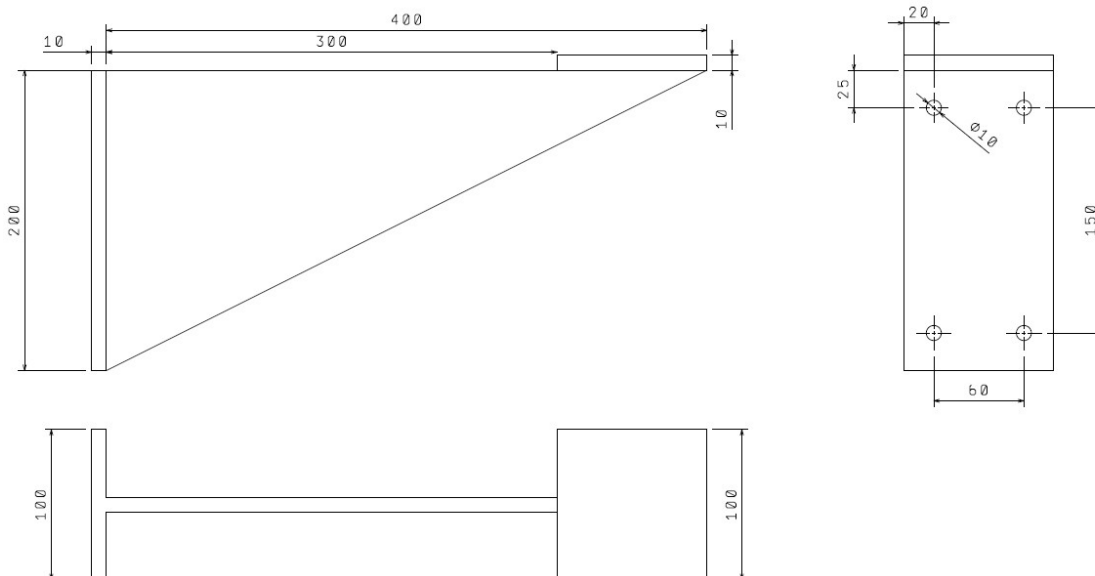
- **Ansys 2021 R1** – Ansys byl vybrán jako vysoce výkonný výpočetní software, s dostupností na ústavu automobilů spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty Strojní ČVUT. Dostupnosti také ve ŠT.
- **Autodesk Inventor** – Jedná se o jeden z nejznámějších CAD software, který je nejčastěji používán, z tohoto důvodu se ověřují jeho možnosti.
- **Creo 6.0** – Rozšířený software s rozsáhlým implementovaným modulem pro topologické optimalizace. Dle popisu dodavatele PTC.
- **Solid Works 2019** – CAD software dostupný skrze ústav konstruování Fakulty Strojní ČVUT. Jednoduchá dostupnost software.

K seznámení s jednotlivými softwarey bylo za potřebí vytvořit zkušební model, na kterém se odzkouší jednotlivé možnosti nástrojů pro optimalizace topologie. Na základě získaných zkušeností s jednotlivými softwarey se podle uživatelského prostředí, možností nastavení, optimalizačních výstupů a dalších aspektů vybere software pro další pokračování v optimalizacích topologie.

Ve výše uvedené Tabulka 2 je mnoho dalších softwarů, které jsou dostupné skrze Fakultu Strojní ČVUT. Časové možnosti a rozsah práce je omezený a nebylo tak možné se naučit pracovat se všemi softwarey, proto byly vybrány jen čtyři. Jeden z dostupných software, který nebyl otestován, je Abaqus, jedná se též o výpočetní a simulační program s nástroji pro optimalizace topologie. Nicméně přechází zkušenosti s tímto programem nebyly příliš kladné, především jeho uživatelské prostředí. Dále stojí za zmínku software Altair. Využívá se pro optimalizace topologie na ústavu materiálového inženýrství Fakulty Strojní ČVUT. Jedná se o software určený především pro optimalizace topologie.

5.1 Profil pro optimalizaci topologie

K prvnímu seznámení se softwarey byla vytvořena zkušební konzole, znázorněna na Obrázek 10. Jedná se o plechový díl s tloušťkou plechu 10 mm. Konzola se skládá z kotvící části se čtyřmi otvory pro šrouby, nosné trojúhelníkové částí a plochy pro aplikaci zatížení.



Obrázek 10. Zkušební konzola

Ve všech softwarech budou použity stejné okrajové podmínky, cíle a omezení optimalizace topologie. Pro následné porovnání výsledků. Následuje přehled:

- Omezení optimalizace topologie: Zachovat 50 % původní hmotnosti dílu
- Cíle optimalizace topologie: Maximalizovat tuhost součásti
- Okrajové podmínky: Zatížení 1000 N, 4x fixní vazba

Je nutné také zachovat stejné materiálové vlastnosti a ideálně i stejnou velikost elementů sítě. Zatížení 1000 N je aplikováno na plochu 100 x 100 mm ve směru svislé osy Z. Ukotvení konzole je v místě otvorů pro šrouby, kde jsou aplikované fixní vazby. Pro všechny případy je aplikovaný materiál ocel.

1.1 ANSYS 2021 R1

Společnost Ansys se pohybuje na trhu simulací již přes 50 let. Po dobu své existence se podílí na řešení těch nejsložitějších konstrukcí, což ji posouvá na světovou špičku v oblasti simulací. Je velice pravděpodobné, že jste se setkali s produkty na kterých se podílely software od společnosti Ansys, například pokud jste řídili auto, používali počítač či překročili most. Společnost nabízí komplexní sadu software, která pokrývá celou škálu fyziky a umožňuje přístup k jakékoli oblasti inženýrské simulace. Společnost Ansys nabízí přes osmdesát produktů, které lze využít pro nejrůznější simulace. Pro optimalizaci topologie tu jsou software jako Ansys Mechanical a Ansys Discovery. [9]



Ansys Discovery představuje kombinaci funkcí interaktivního modelování a vícenásobné simulace. Využívá přímého přístupu k simulacím v reálném čase (*live simulation*) a tím umožňuje odpovědět na konstrukční otázky dříve v procesu návrhu. Tento přístup šetří čas a úsilí při vytváření návrhů, jelikož je možné prozkoumávat více variant řešení, bez nutnosti čekání na výsledky simulace. Výsledky se tvoří v reálném čase simulace. To přináší výhody u optimalizace topologie, kdy lze v krátkém čase vyhodnotit široké spektrum chování produktů a tím odhalit ideální design pro produkt. Schopnosti optimalizace zohledňují výrobní omezení a lze je použít pro více zátěžových stavů, včetně strukturálních a modálních simulací. [9]

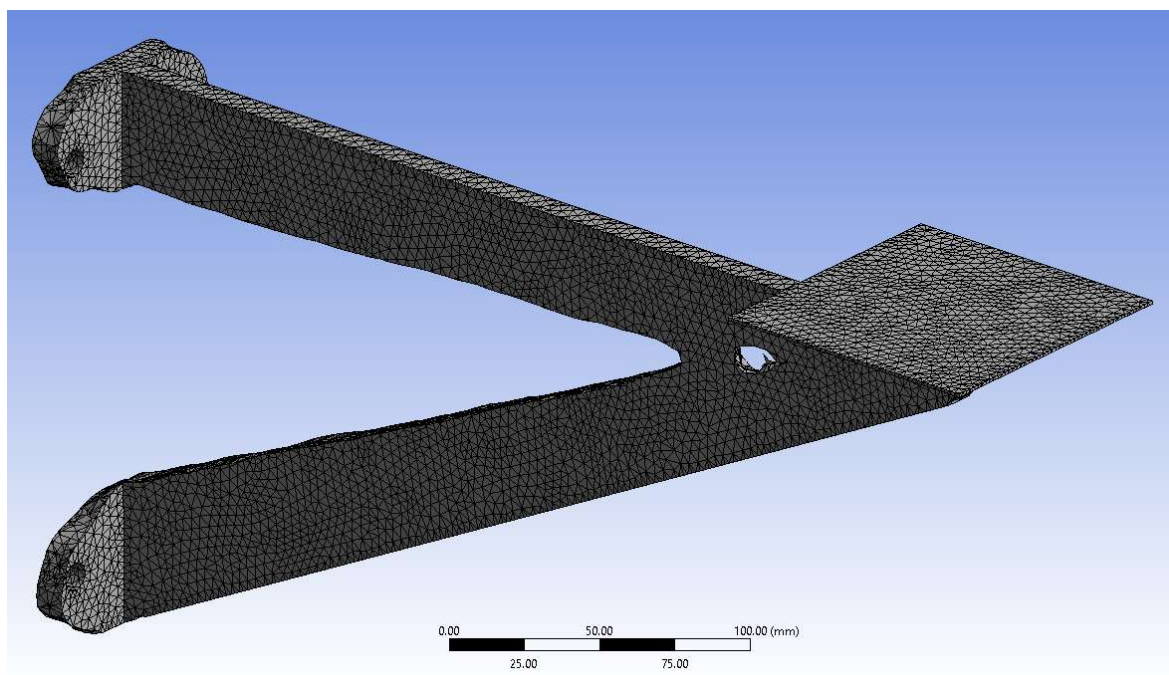
Tento přístup živých simulací má mnoho předností, ovšem má větší nároky na používaný hardware, což může být v některých případech limitující.

Ansys Mechanical umožňuje řešit složité problémy v oblasti konstrukčního inženýrství a dělat lepší a rychlejší závěry než konkurenční software při návrhu produktu. Mechanical nabízí dynamické prostředí s kompletní řadou analytických nástrojů od přípravy geometrie (*SpaceClaim*) až po simulace, na základě metody konečných prvků, a zpracování výsledků. Umožňuje také připojení další fyziky (*například ovlivnění součástí teplem*) pro ještě větší přesnost výsledku. Propojení s Ansys Workbench umožňuje spolehlivé připojení ke konkurenčním nástrojům CAD a poskytuje možnost aktualizovat simulace na jedno kliknutí. Pomocí Ansys Workbench jsou k dispozici integrované funkce multiphysics, které umožňují propojení s kapalinami a elektrickými řešiči. Podporuje také optimalizace topologie, kde optimalizované produkty lze snadno převést zpět do CADu pro další úpravy, nebo pro přípravu produktu na aditivní výrobu. [9]

Jelikož se jedná v tomto případě především o simulační a výpočetní software nabízí Ansys Mechanical rozsáhlé možnosti nastavení sítí, zatížení a vazeb definující okrajové podmínky modelu. Tyto aspekty přispívají ke správnému řešení ideální topologie produktu.

5.1.1 Praktická ukázka a popis Ansys Mechanical

Na Obrázek 11 je vidět optimalizovaný tvar konzole v Ansys Mechanical. Jsou aplikované okrajové podmínky. Tedy zatížení 1000 N na definovanou plochu a fixní vazby v otvorech pro šrouby. Optimalizace topologie je zde provedena pomocí metody Level Set s cílem zachovat 50 % původní hmotnosti. Výsledek optimalizace topologie odpovídá očekávání a splnil účel seznámení se se základy optimalizace topologie v Ansysu. Základní data o výsledné hmotnosti a splnění cílů optimalizace jsou zobrazeny na Obrázek 12.



Obrázek 11. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Ansys Mechanical

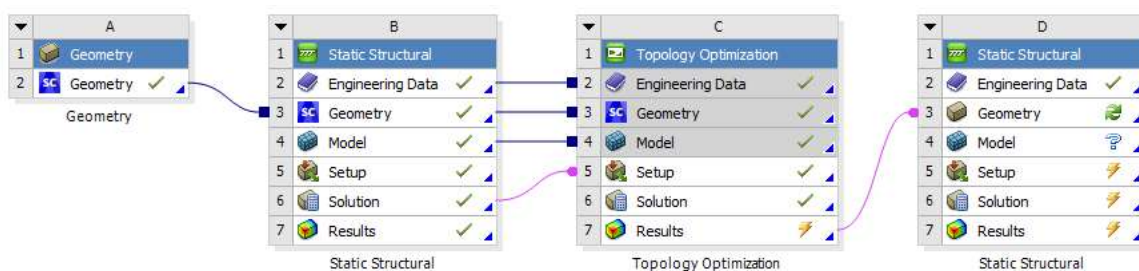
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1.e-006
<input type="checkbox"/> Maximum	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.45324
<input type="checkbox"/> Original Volume	6.9686e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Final Volume	3.4499e+005 mm ³
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	49.507
<input type="checkbox"/> Original Mass	5.4703 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	2.7082 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	49.507
Information	
Iteration Number	20

Obrázek 12. Základní informace o výsledku optimalizace topologie

Jelikož se jedná o výpočetní a simulační software je potřeba do něho nahrát připravenou geometrii. Pomocí Ansys Workbench lze nahrávat geometrie přímo z CAD programu, bez nutnosti převádění do univerzálních formátů. Ve Workbench pomocí nástroje SpaceClaim lze nahané geometrie upravovat a vytvářet, například pro zjednodušení geometrie před výpočtem. Prostředí Ansys SpaceClaim je plnohodnotným CAD program, který nabízí jednodušší přístup než klasické CAD programy a tím urychluje úpravy geometrie před samotným výpočtem. Data z prostředí Ansys SpaceClaim se přímo promítají do prostředí Ansys Mechanical bez nutnosti jakýchkoliv mezikroků, což poměrně značně usnadňuje práci s daty.



Optimalizaci topologie je zde potřeba řešit ve dvou krocích, nejprve připravit statickou strukturální, nebo modální analýzu a na základě této analýzy provádět optimalizaci topologie. Tyto kroky lze provést již v prostředí Ansys Workbench, kde se poskládají jednotlivé bloky do výpočetního cyklu, blok B a C na Obrázek 13 (*blok A představuje soubor geometrie*). Podrobnější nastavení analýz se provádí dále v prostředí Ansys Mechanical. Toto prostředí nabízí široké nastavení sítě a okrajových podmínek pro daný případ výpočtu. U samotné optimalizace topologie nalezneme také poměrně široké nastavení, které lze přizpůsobit na míru danému případu. Blok D na Obrázek 13 představuje zpracování optimalizované struktury. Jako u předchozích příkladů i zde je optimalizovaný tvar pouze předlohou pro finální produkt a je potřeba ho validovat. Ansys nabízí možnost importovat optimalizovaný tvar zpět do SpaceClaimu, kde je možné ho upravit, opravit případné chyby na modelu a následně na upravený model aplikovat statickou, či modální analýzu a tím validovat model.



Obrázek 13. Schéma projektu v prostředí Ansys Workbench

5.2 Autodesk Inventor 2019

Autodesk Inventor je adaptivní, parametrický 3D modelář, vyvíjený společností Autodesk. Jedná se o jeden ze světově nejznámějších a nejprodávanějších 3D softwarů pro strojírenskou aplikaci. Slouží především k navrhování, modelování výrobků a tvoření technické dokumentace, nicméně se dá také využít k simulacím.

Pro optimalizaci topologie můžeme v daném softwaru využít generátor tvarů, který je součástí modulu simulací. Jelikož modul je integrován přímo do aplikace Autodesk Inventor je velice snadné optimalizaci topologie zahrnout do procesu návrhu. Optimalizace topologie zde slouží jako vodítko k optimálnímu návrhu součásti.

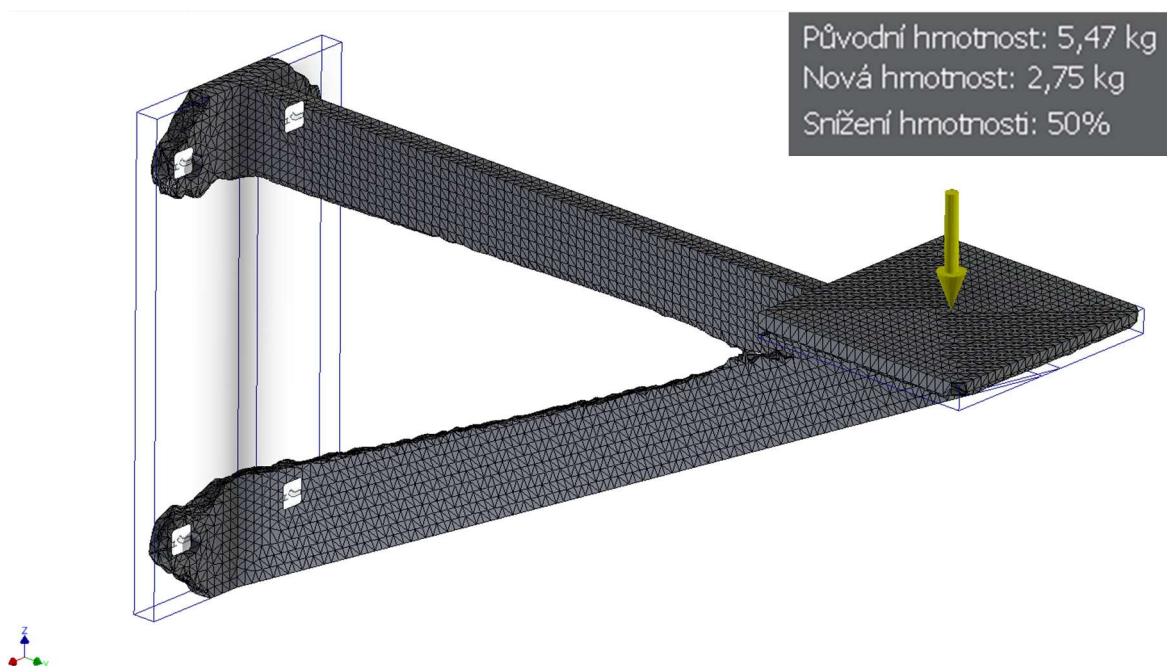
Inventor nabízí velice přehledné prostředí, ve kterém je možné se rychle zorientovat a začít využívat možnosti optimalizace topologie. Nicméně optimalizace lze provádět na velice základní úrovni bez možnosti rozsáhlejšího nastavení cílů a omezení. V této verzi je dostupný cíl maximalizování tuhosti s omezením aplikovaným na hmotnost, například zachovat konkrétní hodnotu hmotnosti v procentech, nebo číselné hodnotě.



5.2.1 Praktická ukázka

Na Obrázek 14 je vidět optimalizovaný tvar konzole v Inventoru 2019. Jsou aplikované okrajové podmínky. Tedy zatížení 1000 N na definovanou plochu a fixní vazby v otvorech pro šrouby.

Celkový čas optimalizace byl velice rychlý (*přímo závislí na počtu prvků sítě*) v řádu 10 vteřin. A pro daný případ optimalizace je výsledek dostačující. Nicméně se jedná o návrh tvaru, to znamená, že výsledek lze brát jako vodítko k optimálnímu tvaru. Pro dokončení návrhu se upraví stávající model podle optimalizace a následně se provede opět pevnostní kontrola, která zaručí, že konečný návrh vyhovuje daným požadavkům.



Obrázek 14. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Autodesk Inventor.

5.3 Creo 6.0

Creo 6.0 od společnosti PTC je 3D CAD software pro inženýrské aplikace. Kombinuje osvědčenou funkčnost s novými technologiemi návrhu designu, jako například generativní design, rozšířená realita, simulace v reálném čase a mnoho dalších. [10]

Pro optimalizace topologie obsahuje Creo přímo funkci Topology optimization. Přímá integrace funkce do CAD programu usnadňuje její použití již při prvotním návrhu součásti. Při práci s výsledky optimalizace, lze také hned zobrazit napětí optimalizované součásti, což nahrazuje validaci výsledku a urychluje postup optimalizace.

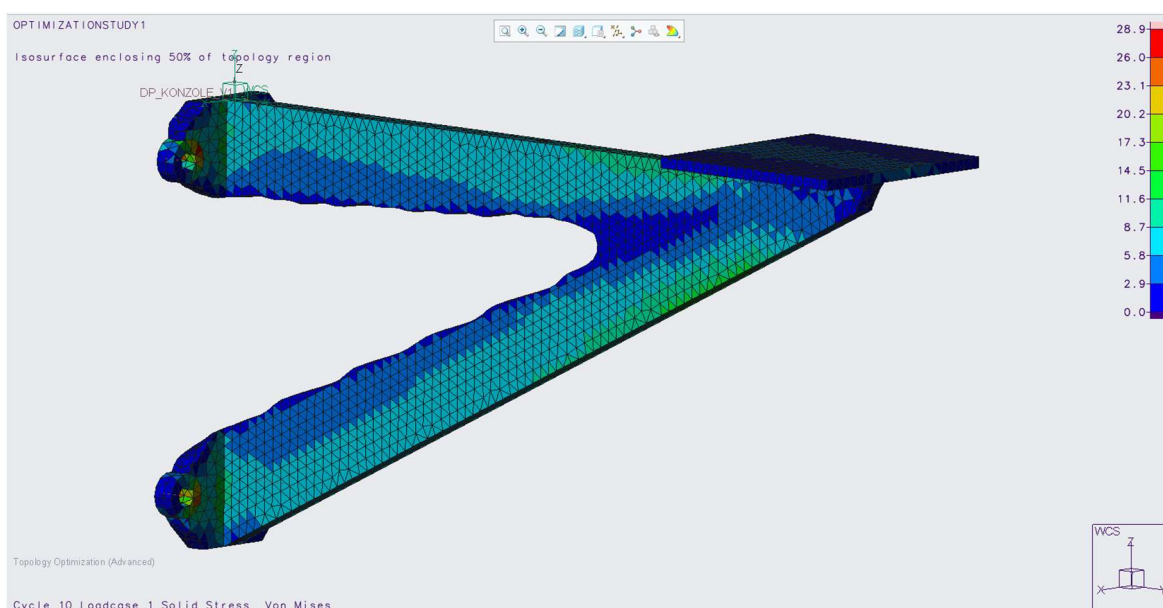
Creo nabízí již poměrně rozsáhlejší možnosti nastavení optimalizace topologie. Počínaje možností nastavení sítě pomocí mesh control, kde se dá síť v lokálních místech upravovat, pro lepší výsledky v místech očekávané koncentrace napětí. Nabízí také lehce



přehledný modul na určování oblastí pro optimalizaci a vyloučených oblastí z optimalizace. U nastavení samotné optimalizace je k dispozici celá řada cílů a omezení. Například: hmotnostní zlomek, deformační energie, posunutí, napětí, frekvence a další. Cíle a omezení se dají různě kombinovat.

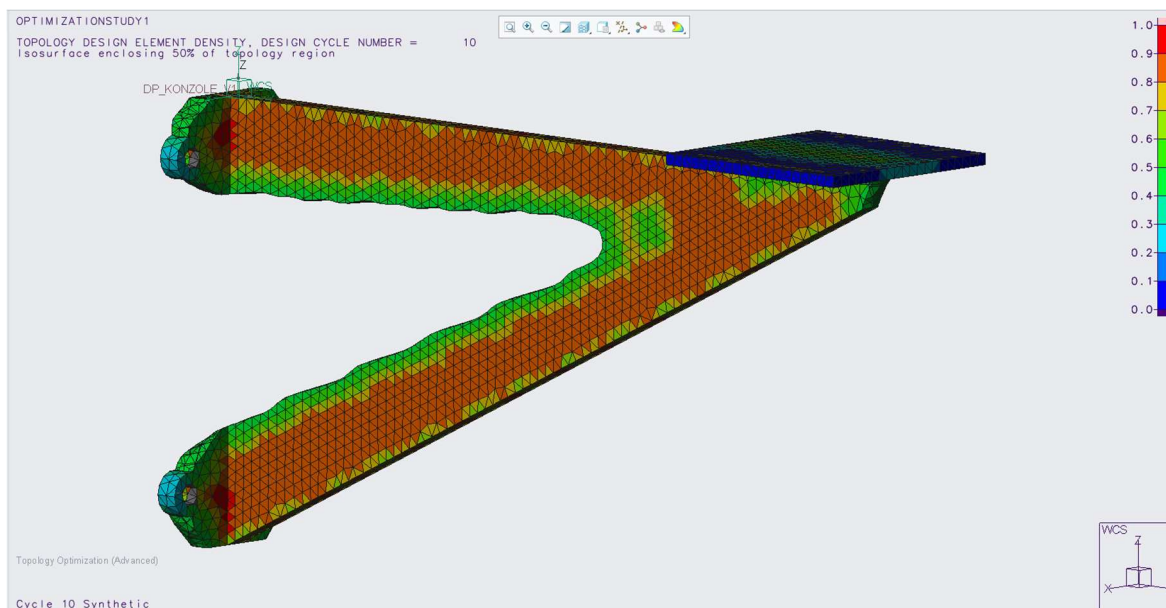
5.3.1 Praktická ukázka

Na Obrázek 15 je vidět optimalizovaný tvar konzole v Creu 6.0. Jsou aplikované okrajové podmínky. Tedy zatížení 1000 N na definovanou plochu a fixní vazby v otvorech pro šrouby. Z výsledku optimalizace lze odečíst napětí na optimalizovaném díle, což zjednodušuje vyhodnocení použitelnosti dílu. Celková doba optimalizace byla velice krátká v řádu desítek vteřin a pro daný účel je dostatečná.



Obrázek 15. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Creo 6.0

Creo 6.0 podle zobrazených výsledků na Obrázek 16 využívá adaptaci metody SIMP, která přiřazuje jednotlivým elementům parametr hustoty podle napětí a na základě této hodnoty určuje, zda element bude anebo nebude zachován. Modrá plocha, na kterou působí síla je zachována, jelikož je vyloučena z oblasti pro optimalizace topologie, pro schopnost přenesení zatížení.



Obrázek 16. Zobrazení parametru hustoty elementů

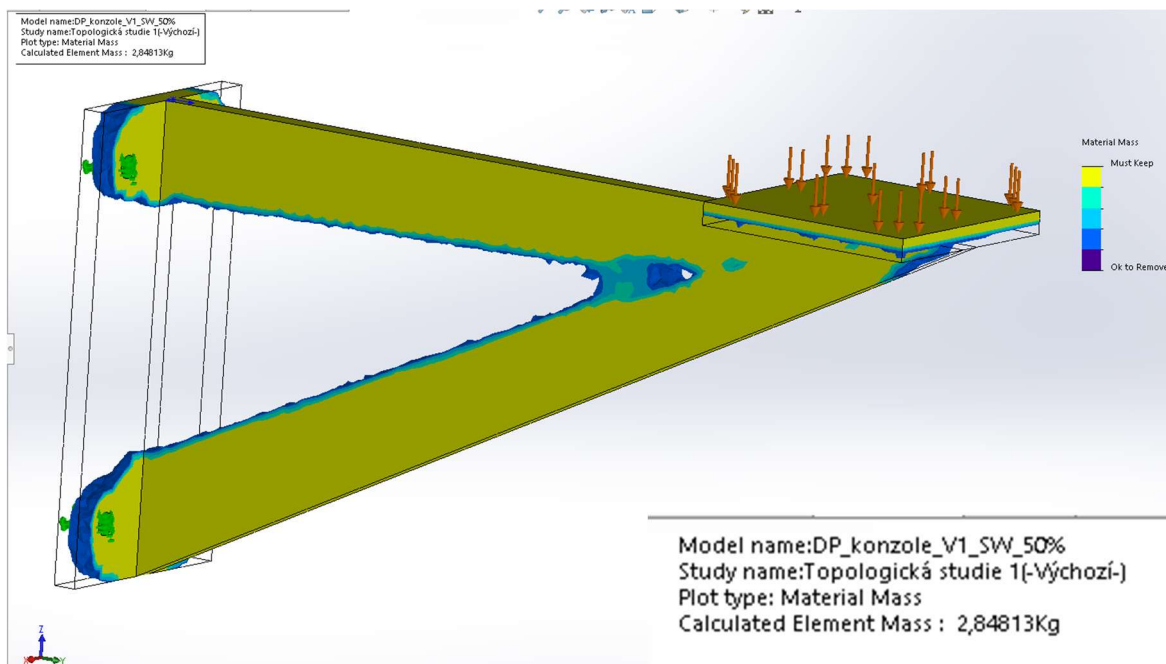
5.4 Solid Works

SolidWorks od společnosti Dassault systemes je 3D CAD software, pro modelování navrhování, simulace, kalkulace nákladů, kontroly vyrobiteľnosti a vyvíjení produktů. Při návrhu lze využít implementovanou funkci optimalizace topologie, která je dostupná při modulu simulací. Po zorientování nabízí poměrně přehledné uživatelské prostředí.

SolidWorks nabízí pro optimalizace topologie omezené množství nastavení cílů a omezení. Jakou jsou cíle nejlepší poměr šířky a váhy, minimalizovat maximální posunutí a minimalizovat hmotnost. Při omezeních dílu jako jsou maximální posunutí, hmotnostní omezení, frekvenční omezení a omezení maximálního napětí. Pro nastavení sítě má pouze základní nastavení velikosti, což může v některých případech omezovat přesnost výpočtu. Pro nastavení oblastí pro optimalizaci a vyloučených regionů je zde k dispozici funkce výrobní omezení, kde se tyto regiony dají bez problému nadefinovat.

5.4.1 Praktická ukázka

Na Obrázek 17 je vidět optimalizovaný tvar konzole v SolidWorks. Jsou aplikované okrajové podmínky. Tedy zatížení 1000 N na definovanou plochu a fixní vazby v otvorech pro šrouby. Podle barevného schématu výsledku rozlišujeme elementy pro zachování (*žluté elementy*) a elementy které můžeme odstranit (*fialové elementy*) Jedná se tedy opět o adaptaci metody SIMP. Celkový čas optimalizace dosahoval řádově jednotek minut. Optimalizace topologie konzoly splnila svůj účel seznámení se s prostředím SolidWorks a zhodnotit možnosti optimalizace topologie. I v tomto případě je nutné optimalizovaný tvar dále upravit a zkontrolovat.



Obrázek 17. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole SolidWorks

5.5 Zhodnocení SW

V této kapitole jsem vyzkoušel optimalizaci topologie ve čtyřech softwarech. Jednalo se o tři CAD softwary (*Autodesk Inventor 2019*, *Creo 6.0*, *SolidWorks 2019*) a jeden výpočetní software ANSYS 2021 R1. Optimalizace jsem provedl na jednoduché součásti konzoly. Postupem zkoušení se ukázalo, že tato volba nebyla příliš vhodná a daly by se najít lepší součásti pro tuto zkoušku. Především s větším objemem pro optimalizaci. Nicméně i tato úloha splnila svůj účel, kterým bylo vyzkoušení jednotlivých softwarů a zhodnocení použití pro složitější konstrukční prvky kolejového vozidla. V Tabulka 3 je srovnání výsledných hmotností a časů optimalizovaného dílu při omezení zanechání 50 % původní hmotnosti, která činila 5,47 kg. Výsledná hmotnost také záleží na konečné interpretaci výsledku, výsledek se dá dodatečně upravovat.

Tabulka 3. Srovnání optimalizované hmotnosti. (Původní hmotnost 5,47 kg)

SW	Hmotnost [kg]	Čas optimalizace
Ansyp	2,71	00:06:16
Autodesk Inventor	2,75	00:02:28
Creo 6.0	2,94	00:00:46
Solid Works	2,84	00:05:51

Creo 6.0 ve srovnání se dvěma dalšími CAD softwary vyniká širší možností natavení sítí a možností optimalizace topologie. Tím se dají dosáhnout přesnější výsledky a urychlit návrh součásti pomocí optimalizace topologie. Šikovným pomocníkem je především



zobrazení napětí na optimalizované součásti, při zpracovávání výsledků optimalizace. Tyto přínosy k výsledkům jsou kompenzovány méně intuitivním prostředím při nastavování optimalizace oproti dalším softwarům. Tento program je vhodný pro jednoduché i složitější optimalizace v krátkém časovém horizontu.

SolidWorks 2019 představuje střední cestu mezi dalšími dvěma softwary. Nabízí obsáhlejší nastavení optimalizace a po seznámení i příjemné uživatelské prostředí. Je zde opět pouze základní nastavení sítě, tedy velikosti prvku sítě. Hodí se pro jednoduché a mírně náročnější optimalizace.

Autodesk Inventor 2019 nabízí nejvíce intuitivní prostředí pro optimalizaci topologie, tedy generativní design. Není problém již při prvním setkání nastavit optimalizaci a dopracovat se k požadovanému výsledku, který pomáhá při návrhu produktu. Jednoduché a přehledné prostředí má úskalí ve značně omezených možnostech nastavení. Pouze jediný cíl pro optimalizaci topologie. Je tedy vhodný pro prvotní optimalizaci jednoduchých dílů a dosažení rychlého výsledku.

ANSYS 2021 R1 je simulační a výpočetní software, tedy nelze ho přímo srovnávat s dalšími třemi CAD softwary. Jeho slabinou je, že není přímo implementován v návrhovém CAD programu (*existuje propojení s Creo a dalšími CADy*) kompenzuje uceleným systémem který nabízí jak výpočetní modul (*ANSYS Mechanical*) tak CAD modul (*SpaceClaim*) pro rychlou úpravu modelů. Nabízí široké nastavení parametrů sítě a vstupů do statických analýz. Následně i obsáhlé nastavení pro optimalizaci topologie, kde jsou k dispozici dvě optimalizační metody. Ansys je uživatelsky náročnější, nicméně nabízí široké možnosti na poli optimalizací. Je vhodný i pro optimalizace složitějších produktů.

Na základě zkušeností ze zkoušení optimalizace topologie na konzoli jsem vybral pro další optimalizace ANSYS 2021 R1. Tento software je také dostupný ve firmě Škoda Transportation, která je zadavatelem téma diplomové práce. Nutno podotknout časovou náročnost s učením se ovládání a funkcí v jednotlivých softwarech, jelikož každý má odlišnou filozofii ovládání.



6 Zvolený SW

Ansys 2021 R1 byl obecně popsán v předchozí kapitole. V této kapitole se zaměříme na jednotlivé nastavení simulace, jako je příprava modelu, síťování a optimalizace topologie.

6.1 Příprava modelu

Příprava modelu je možná v jakémkoli CAD softwaru. Z CAD softwaru model lze přímo importovat do prostředí Workbench jak je již výše zmíněno. Úprava modelu je možná ve dvou prostředích, SpaceClaimu anebo v Designmodeleru. Obě prostředí nabízí nástroje dostupné běžně v CAD softwarech. Při práci s modelem se osvědčil SpceClaim jak pro přípravu, tak pro následné zpracování optimalizovaných struktur.

6.2 Síťování modelu

Síťování modelu ve značné míře ovlivňuje přesnost, konvergenci a časovou náročnost výpočtu, je zapotřebí mu věnovat zvýšenou pozornost. ANSYS Mechanical nabízí široké nastavení typů sítí. Jak pro plošné modely, kde se dají použít trojúhelníky, čtverce anebo jejich kombinace jako prvky sítě. Dále pro 3D geometrie to jsou třístěny a čtyřstěny či jejich kombinace. Na výběr je několik metod síťování, od automatické až po konkrétní nastavení pro třístěny či čtyřstěny. Dále možnost síťovat tažená tělesa (*Sweep*) a metoda MultiZone. Pro síťování hrubších povrchů je zde metoda Cartesian, kterou je zapotřebí využít při síťování modelů při validaci optimalizovaných struktur. Podrobnější informace o funkcích jednotlivých metod lze nalézt zde: [11].

Pro lepší rozložení sítě je k dispozici několik nástrojů pro lokální úpravy sítě. Například funkce Sizing, která určuje velikost elementů v dané ploše, přímce či vymezeném kulovém objemu okolo bodu. Při síťování sestav lze spojovat jednotlivé díly na úrovni uzlů sítě pro lepší kontakt a přesnější výsledek. Velice důležitým bodem je nastavení velikosti elementů, které je zapotřebí volit podle velikosti a povahy modelu, tedy pokud máme v geometrii tenké stěny je zapotřebí mít po stěně minimálně dva a více elementů.

6.3 Nastavení optimalizace

Při samotném nastavení optimalizace topologie je v první řadě důležité vybrat metodu optimalizace. Na výběr je z více možností, nicméně se omezíme pouze na metodu Density Based a LEVEL SET. Pro metodu DB lze využít všechna dostupná výrobní omezení, zatímco u metody LS nejsou některá dostupná jako například symetrie optimalizované součásti.

Při nastavování oblasti optimalizace lze určit vyloučené regiony, které metoda zachová, následně u metody LS je možné určit tloušťku vyloučených regionů na konkrétní hodnotu. Oblast optimalizace lze určit také jen na části sestavy kterou chceme optimalizovat.



Na výběr je několik cílů optimalizace, jako například maximalizovat tuhost, minimalizovat napětí, minimalizovat hmotnost nebo objem. V dalších optimalizacích se bude využívat především maximalizování tuhosti produktu.

Z nabídky omezení optimalizace je na výběr několik možností jako jsou, hmotnostní/objemové omezení, omezení napětí a další, v této práci se omezíme především na omezení hmotnostní a omezení maximálního napětí. Tyto omezení se dají navzájem kombinovat, nicméně je zapotřebí dbát na rozsah omezení, aby výpočet byl schopný konvergovat k řešení.

Z výrobních omezení nás bude zajímat omezení maximální a minimální velikosti tloušťky stěny organické struktury, dále aplikování symetrie na optimalizované součásti, pouze u metody DB.

6.4 Postup ověření optimalizovaného modelu

Optimalizované modely je zapotřebí vždy ověřit. Prostředí Workbench nabízí možnost přesunu optimalizované geometrie do bloku statické strukturální analýzy, kam zkopíruje nastavení z výchozí statické analýzy. Optimalizovaný model spolu s původním modelem je možno upravovat v prostředí SpaceClaim, kde jsou oba naimportovány. V tento okamžik přicházejí dvě varianty dalšího postupu. Leze přistoupit k úpravě stávajícího modelu podle optimalizované geometrie. Tato cesta přináší poměrně složité a zdlouhavé úpravy modelu. Zde záleží na složitosti optimalizované součásti. Nicméně pak přináší zjednodušenou geometrii, kterou lze snadno síťovat a následně i vyrábět konvenčními metodami. Druhé řešení nabízí úpravu optimalizované geometrie, která je reprezentována modelem v plochách. SpaceClaim nabízí dobře fungující modul pro úpravu těchto ploch a jejich zacházení je s nimi snadné. Tímto způsobem lze například vyhladit plošný model a dále ho zpracovat v ANSYS Mechanical. Nedoporučuje se plošný model převádět na solid v prostředí SpaceClaim, tento převod je velice datově náročný a problematicky se následně zpracovává.

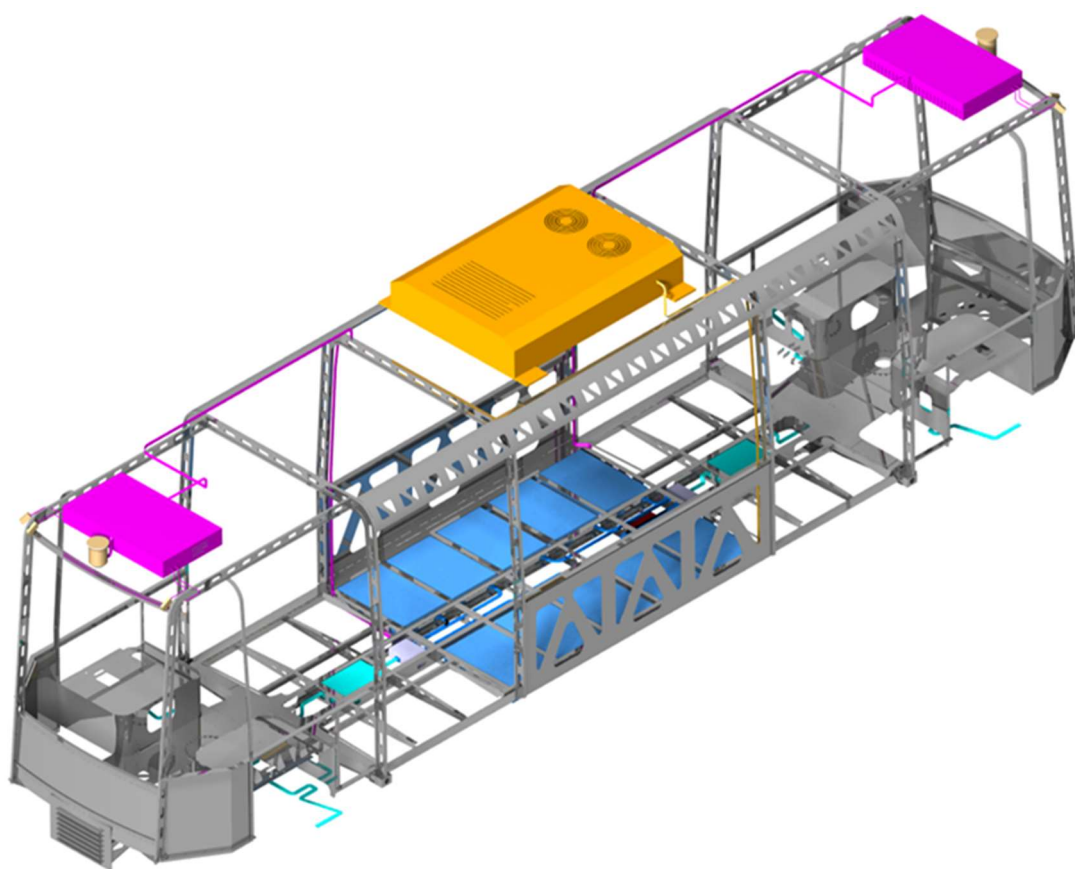
V Mechaniclu je zapotřebí opět nastavit působíště sil a vazeb na model a upravit síťovací metodu. Pro součásti s hrubšími povrchy je zde na výběr kartézská metoda síťování. Následně stačí nechat proběhnout výpočet.



7 Výchozí koncept SATram

Nástroj optimalizace topologie bude aplikován na skříň konceptu SATram. Který byl zpracován v dřívější diplomové práci na Fakultě Strojní ČVUT, viz [12].

Z toho konceptu přebírám umístění elektrické výzbroje, jak je zobrazeno na Obrázek 18. Od umístění jsou odvozeny síly působící na skříň vozidla SATram. Fialovou barvou jsou znázorněny CPU jednotky, oranžová představuje umístění klimatizace, modrá umístění baterií v podlaze a světle zelená silikon-grafitové trakční měniče. Souhrn hmotností je znázorněn v Tabulka 4. K tomuto konceptu je přidán ještě sběrač proudu, který bude umístěn v meziprostoru na střeše vozidla, jako alternativní možnost napájení vozidla.



Obrázek 18. Umístění elektrovýzbroje v konceptu SATram [12]

Tabulka 4. Souhrn hmotností elektrické výzbroje

Trakční měnič silikon-grafitový	243	kg
Klimatizace salón pro cestující	500	kg
Baterie v podlaze	870	kg
Řídící jednotka na střeše vozidla (odhadnuto a předimenzováno)	50	kg
Sběrač proudu	181	kg



Na Obrázek 19 je znázorněn grafický design konceptu SATram. Jedná o samostatné autonomní jednotky pro zařazení do tramvajové sítě. Jednotky budou vypravovány podle aktuální poptávky a lze je virtuálně spřahovat do souprav a následně rozpřahovat za běžného provozu v závislosti na aktuální poptávce v daném městě. Počítá se s napojením na koncept Smart City, založený na sdílení dat v městském prostředí. Více o konceptu SATram v [12]



Obrázek 19. Grafické zobrazení konceptu SATram [ŠT]



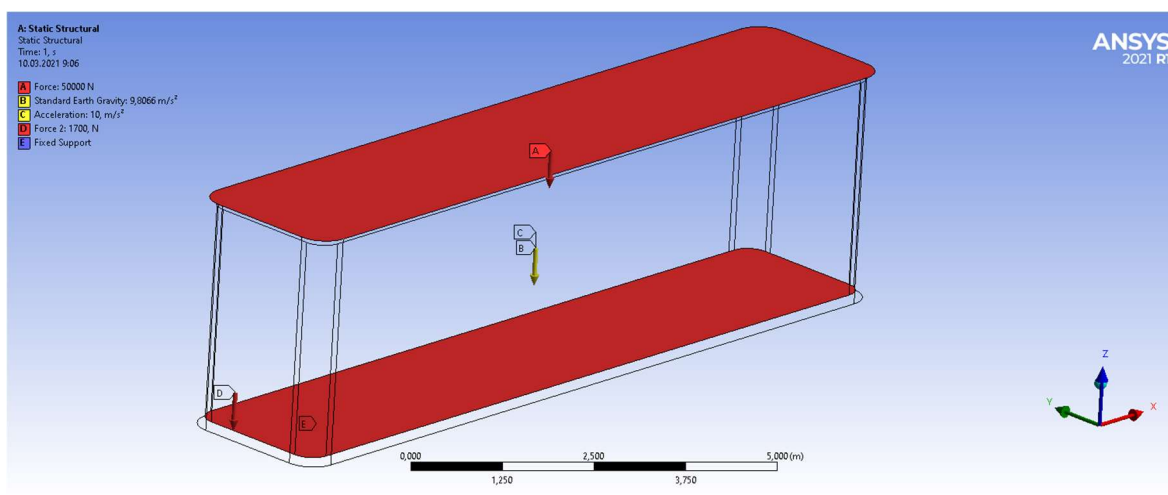
8 Optimalizace topologie V ANSYS 2021 R1

Pomocí nástroje optimalizace topologie, chceme dosáhnout ideálního rozložení materiálu ve skříni vozidla, z hlediska jednotlivých zátěžových stavů. Optimalizace topologie se nejprve aplikují na co nejjednodušší modely, které se dále budou zesložitovat a přibližovat reálnému produktu, tedy skříni tramvaje.

Optimalizaci využíváme zde především proto, abychom zjistili vhodné toky materiálu ve skříni vozidla. Optimalizované struktury bereme jako inspiraci, kam umístit hlavní nosné prvky konstrukce. Výslednou strukturu optimalizace nelze považovat za 3D model reálné hrubé stavby.

8.1 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje

První pokus o optimalizaci skříně byl proveden na jednoduchém modelu, který získal pracovní označení „Plechovka“ dále bude uveden v několika verzích. Zatížení bylo aplikováno na dvě plochy, podlahu a střechu, jak je vidět na Obrázek 20, zatížení na střechu je 50 000 N jako zatížení od střešní výzbroje a na podlahu zatížení 1700 N. Toto zatížení je pro testovací účely a je zvolené. Červené plochy znázorňují působíště sil a zároveň plochy pro zachování při optimalizaci. Jako dynamické síly působí gravitační zrychlení a k tomu zrychlení 1 g ve svislém směru, tedy 2-g. Podvozky, na kterých je model uložený jsou nahrazeny dvojicí fixních vazeb, což zamezuje natáčení okolo osy Y a posun jednoho podvozku ve směru osy X. Podlaha se tedy chová jako vetknutý nosník. Toto zatížení je aplikováno pro první pokus optimalizace rozměrnějšího modelu a pro zjištění chování optimalizace.

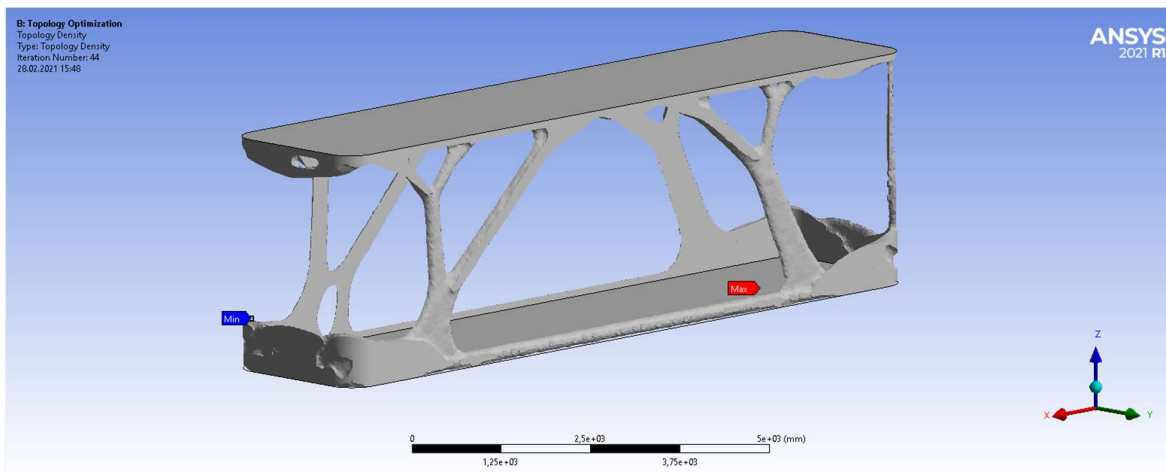


Obrázek 20. Zatížení modelu Plechovka_V1.4

Obrázek 21. znázorňuje optimalizovaný model s cílem zachovat 50 % původní hmotnosti modelu. Pro tento případ je použita metoda LEVEL SET. Na modelu je zajímavé, že i když se



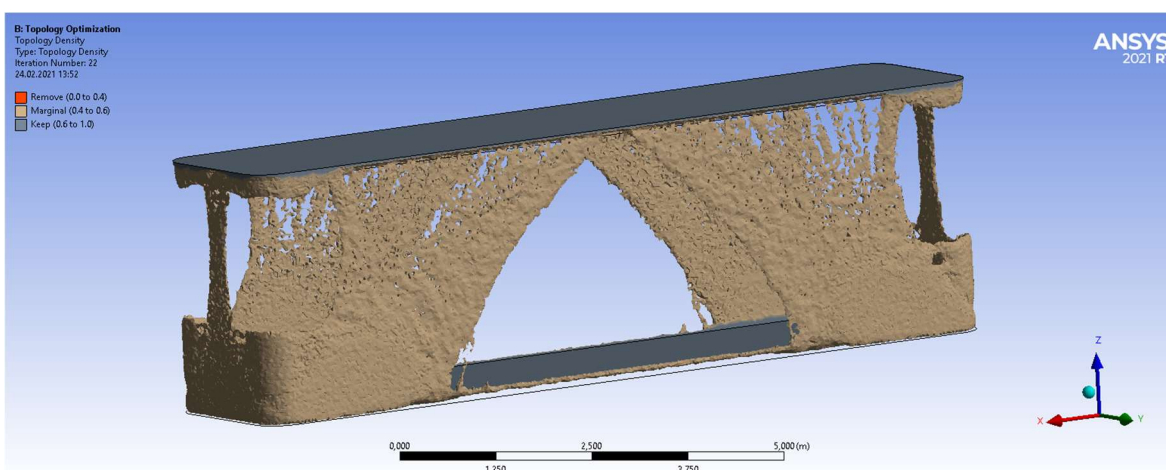
jedná o symetrickou úlohu podle dvou roviny XZ a YZ optimalizovaný model není symetrický. Tento jev je pravděpodobně vyvolán vlastností iteračního procesu, který dává pokaždé rozdílné výsledky. Optimalizovaná struktura připomíná známé mostové konstrukce, které jsou logické z hlediska povahy aplikovaného zatížení.



Obrázek 21. Optimalizace modelu „Plechovka_V1.4“ Metoda LEVL SET

Tento model posloužil jako první seznámení s optimalizací topologie celé skříně a určení cesty kterou metodou využívat v dalších optimalizacích. Na Obrázek 22 je znázorněn stejný model optimalizovaný metodou Density Based. Na modelu je zajímavé proč tato metoda zachovala materiál uprostřed čel a nechala volné rohy. Dále se také přiblížila k mostové konstrukci. Na první pohled lze z obrázků usoudit, která metoda je vhodnější, nicméně vždy zaleží na nastavení optimalizace.

Dále se budeme více zabývat metodou LEVEL SET.

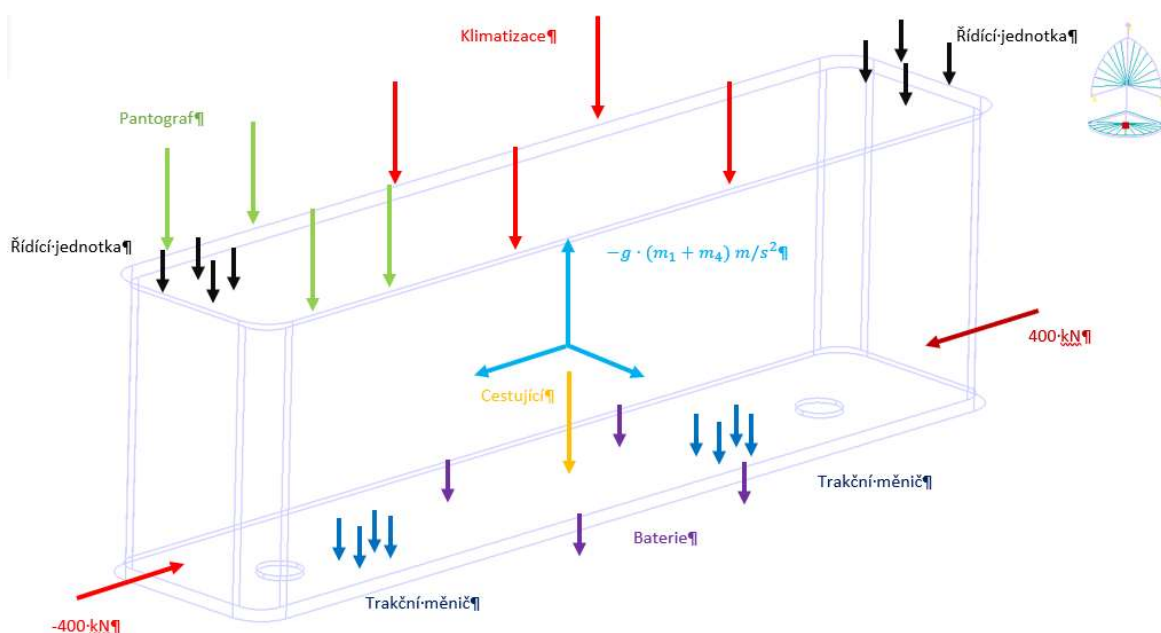


Obrázek 22. Optimalizace modelu „Plechovka_V1.3“ metoda Density Based



8.2 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje podle zátěžového stavu 1

Zátěžové stavy jsou přesně definovány v několika normách (EN 12 663, EN 15 663, EN 15 227, EN 13749, VDV 152). V této práci vycházíme ze zadání pro výpočet tramvaje 39T ze Škody Transportation, které je vytvořeno na základě těchto norem. Pro zatížení byl vybrán jeden ze stavů, který se zdál být nejméně příznivý. Předpokládáme, že jednotlivé komponenty elektrické výzbroje jsou ukotveny vždy podél bočnice na čtyřech podporách a jejich hmotnost je rovnoměrně rozložena. Pro další zjednodušení je vzhledem k značné hmotnosti původního modelu z úvah také vyloučené gravitační zrychlení. Uvažuje se obsazení 8 osob na metr čtvereční, z čehož je pro každý model vypočítaná síla zatížení podle plochy podlahy.

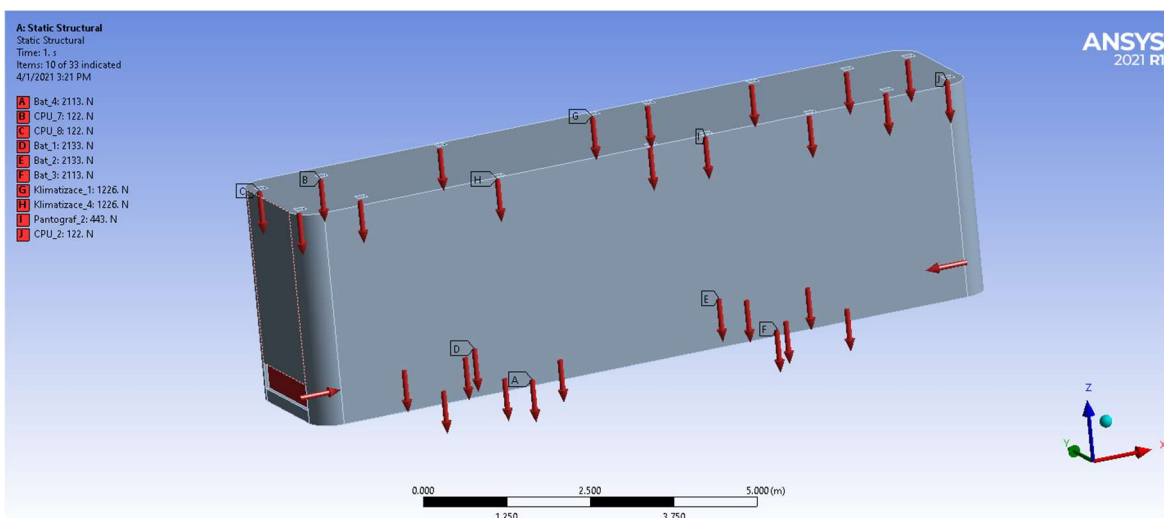


Obrázek 23. Zátěžový stav 1

Na Obrázek 24 je znázorněn aplikovaný zátěžový stav. Hlavní podélné síly 400 kN na nárazníky dominují zatížení modelu, vytváří největší deformace. Upevnění modelu na podvozcích je nahrazeno dvojicí vazeb, umístěných na otočném ložisku skříně, které umožňují natáčení podle příčné osy Y a jeden z podvozků je volný v podélném směru X. Pro možnou deformaci skříně ve směru osy X.

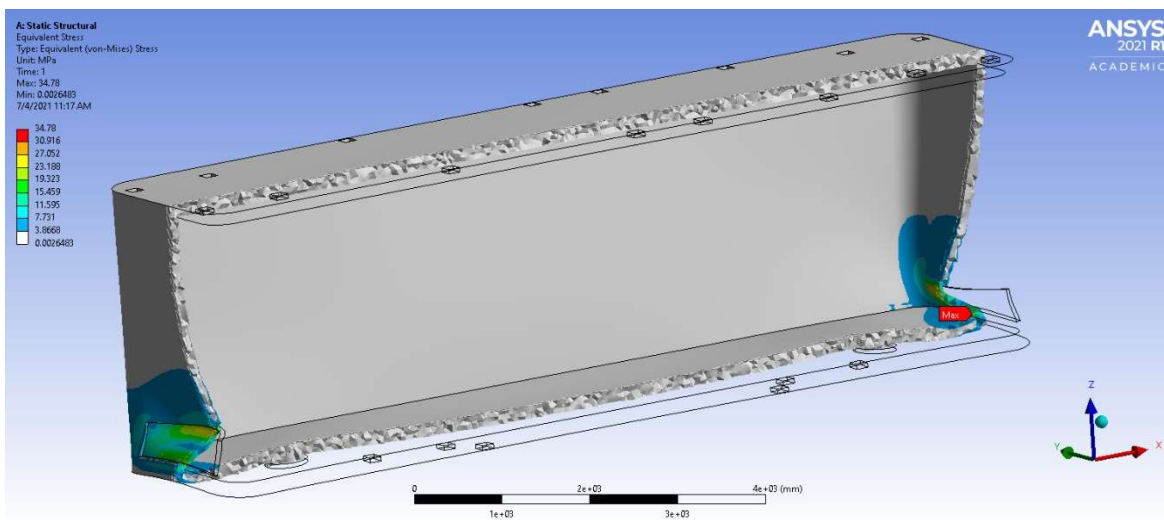
Tabulka 5. Shrnutí zatížen v zátěžovém stavu 1

Klimatizace	1226 N	Trakční měniče	596 N
Pantograf	443 N	Baterie	2133 N
CPU jednotka	122 N	Cestující	8 os/m ²
Podélná síla	400 kN		



Obrázek 24. Zobrazení zatížení v ANSYSU Plechovka_V2

Obrázek 25 zobrazuje deformovaný stav. Je zde vidět deformace od hlavních podélných sil a zbytek materiálu v modelu je z hlediska přenosu sil nevyužitý. Síly působící na střechu vozidla jsou řádově nižší a z toho důvodu nevyvolávají významné napětí. Maximální napětí je označeno červenou značkou s hodnotou 34 MPa a je na okraji plochy na kterou působí podélná síla.

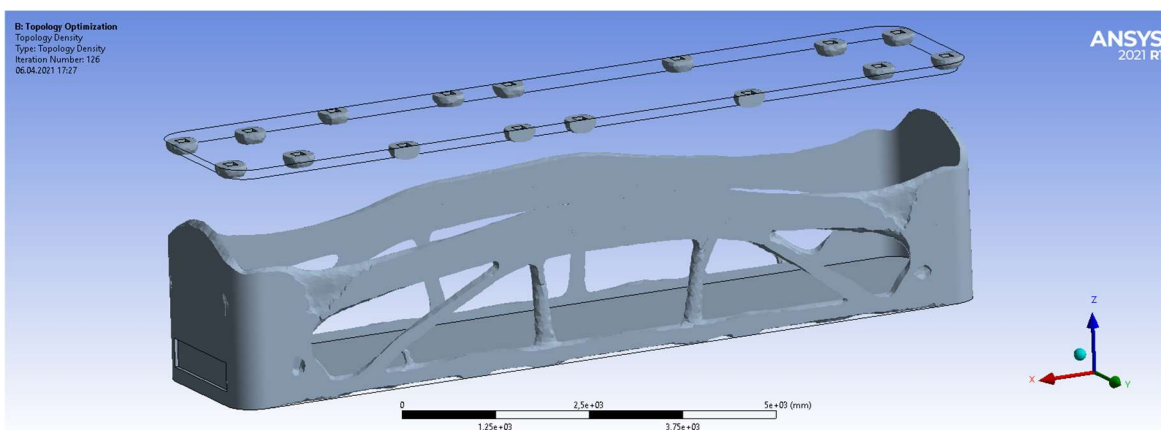


Obrázek 25. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V2



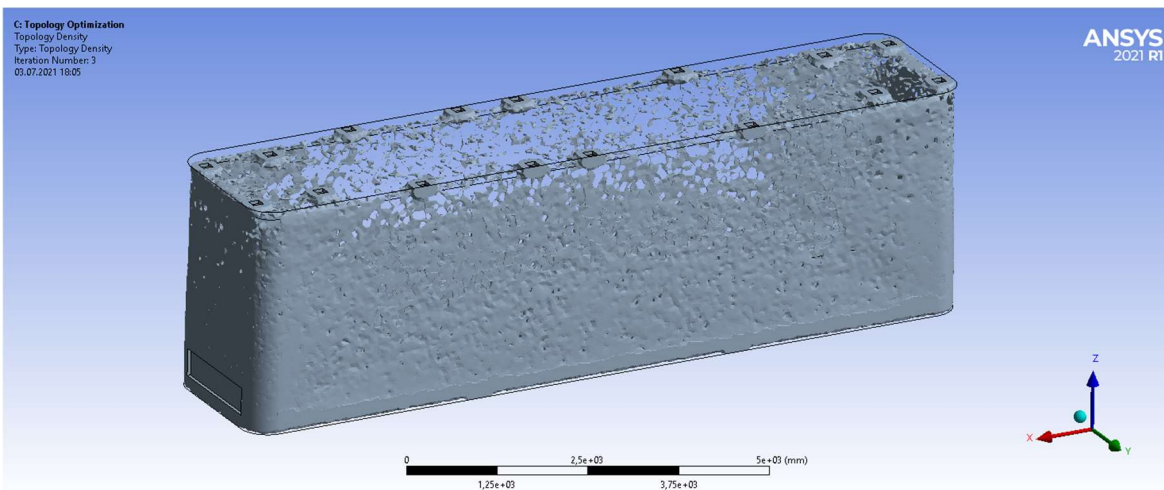
Optimalizovaná struktura, která je zobrazena na Obrázek 26 přináší značné komplikace. Na první pohled je jasné, že takto nespojitý model nemůže do vazeb přenést zatížené ze střešní výzbroje. Tím se dostáváme k problematice spojitosti optimalizovaného modelu. Dále je vidět podélný nosník pro přenesení hlavní podélné síly 400 kN uprostřed bočnice vozu. Nosník by zamezoval umístění dveří do bočnice, což je nepřípustné z hlediska funkčnosti. Také je třeba zachovat prostor pro okna. Lze si povšimnout, jak software zanechal poměrně velké množství materiálu v oblasti bočnice, v místě podvozků a rozích modelu. I zde je patrný náznak mostové konstrukce, který je z hlediska zatížení logický.

Výsledek optimalizace je z velké části závislý na velikosti a tvaru použitých elementů. V tomto případě jsou použity tetrahedrony o velikosti elementu 50 mm. (498 058 elementů sítě). Není zde užito dalších nastavení sítě. U takto tenkostěnných modelů je také důležitým aspektem počet elementů po tloušťce stěny modelu. Při malém počtu elementů lze jen omezeně pracovat s tloušťkou stěny. Cílem této optimalizace je maximalizovat tuhost modelu. Je zde aplikováno hmotnostní omezení, kde je nastaveno na zachování 35 až 45 % původní hmotnosti. Výsledný model konvergoval k hodnotě 45 % původní hmotnosti za 8 hodin a 4 minuty.



Obrázek 26. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET Plechovka_V2_2_A

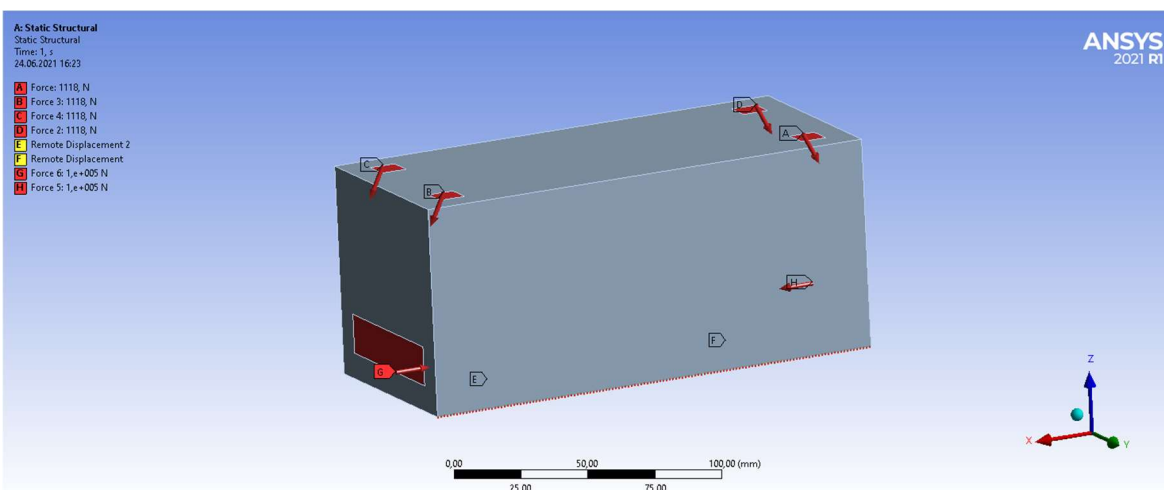
Jako snadné řešení nespojitosti modelu se nabízí navýšit hmotnostní omezení, aby bylo k dispozici více materiálu pro spojení modelu. Jak lze vidět na Obrázek 27 při navýšení omezení na hodnotu 45 až 55% optimalizace nekonverguje k žádnému řešení a nastane rozpad modelu. Tento rozpad nastal i při jiných konfiguracích nastavení omezení.



Obrázek 27. Optimalizovaný tvar pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET – rozpad Plechovka_V2_2_B

8.2.1 Problematika spojitosti modelu

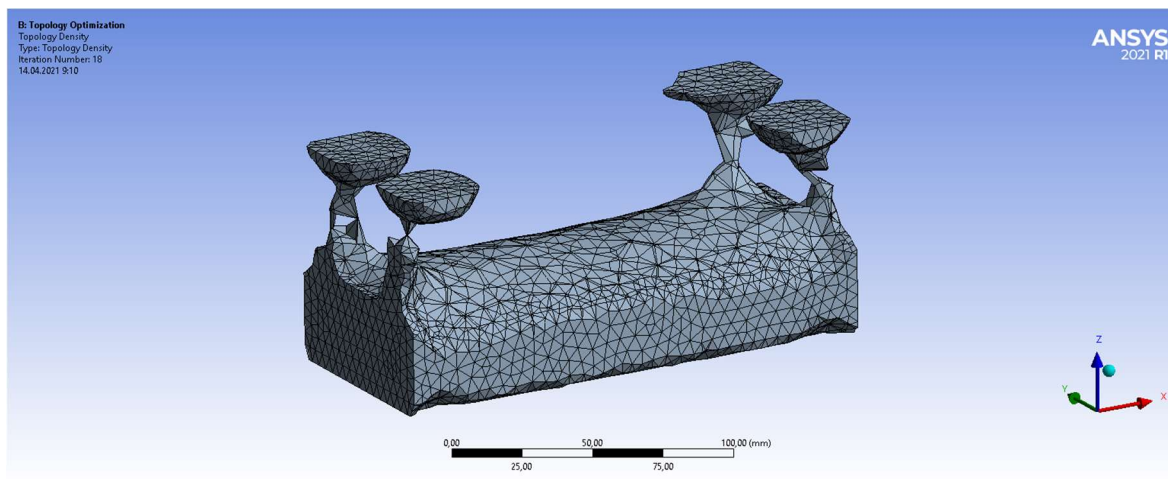
Na základě předchozích optimalizací, kde docházelo k nespojitým výsledkům a za předpokladu, že nespojitost způsobují příliš velké elementy. Vznikl pomocný zkušební model pro ověření této myšlenky. Jelikož velké elementy vykazují nízký parametr hustoty a následně jsou metodou optimalizace vyhodnoceny jako prázdné elementy, tak vzniká nespojitost. Na Obrázek 28 je znázorněn již zmíněný model. Jedná se o plný kvádr o rozměrech $180 \times 80 \times 80 \text{ mm}$, který má napodobovat výpočetní model Plechovky. Na horní plochu kvádru působí 4 šikmé osamělé síly o velikosti 1118 N (500 N v ose X a 1000 N v ose Z) a řádově větší podélná tlaková síla 100 kN působí na čelní plochy. Model je ukotven dvojicí vazeb na spodní straně, které souhlasí s vazbami nahrazující podvozky u „Plechovky“.



Obrázek 28. Působení sil na pokusný kvádr



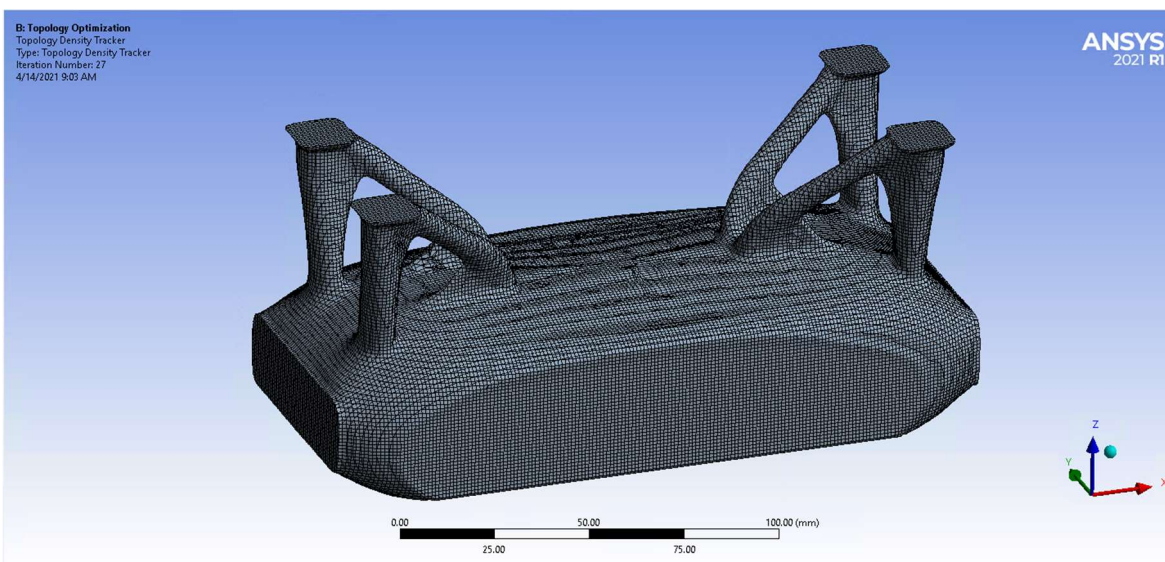
Následující Obrázek 29 zobrazuje optimalizovaný model s použitím tetrahedrické sítě o velikosti elementu 5 mm (*38 297 elementů*). Doba optimalizace byla přibližně 6 minut. Lze si všimnout zachované střední části pro přenos hlavní síly, nicméně pro přenos sil z horní části modelu není věnováno příliš velké množství materiálu a například v levém bližším rohu se elementy dotýkají pouze rohy, což je pro přenos sil do vazeb nedostatečné.



Obrázek 29. Optimalizovaný kvádr, síť 5 mm LEVEL SET

Výsledek optimalizace tedy podporuje myšlenku, která považuje za důvod nespojitosti modelu velikost a tvar elementů optimalizovaného modelu.

Pro srovnání byla provedena další optimalizace jejíž výsledek je zobrazen na Obrázek 30 Jedná se o stejný případ zatížení, se stejnými cíli a omezeními, s rozdílným nastavením sítě. Je zde použita síť s hexahedrony o velikosti 1 mm (*1 155 445 elementů*). Doba optimalizace se vyšplhala na 38 hodin a 19 minut, poté byla optimalizace zásahem uživatele ukončena, jelikož nevykazovala další změny struktury. Na první pohled vidíme velký rozdíl v optimalizovaných modelech. Vezmeme-li v potaz původní zatížení kvádrů s působením šikmých sil je optimalizovaný tvar z hlediska konstrukce logický. Především je spojitý a je schopen přenášet zatížení do vazeb.



Obrázek 30. Optimalizovaný kvádr, síť 1mm LEVEL SET

Na tomto výše popsaném případě, lze zcela názorně pozorovat závislost přesnosti výsledku a výpočetního času na nastavení a velikosti elementů konečno prvkové sítě.

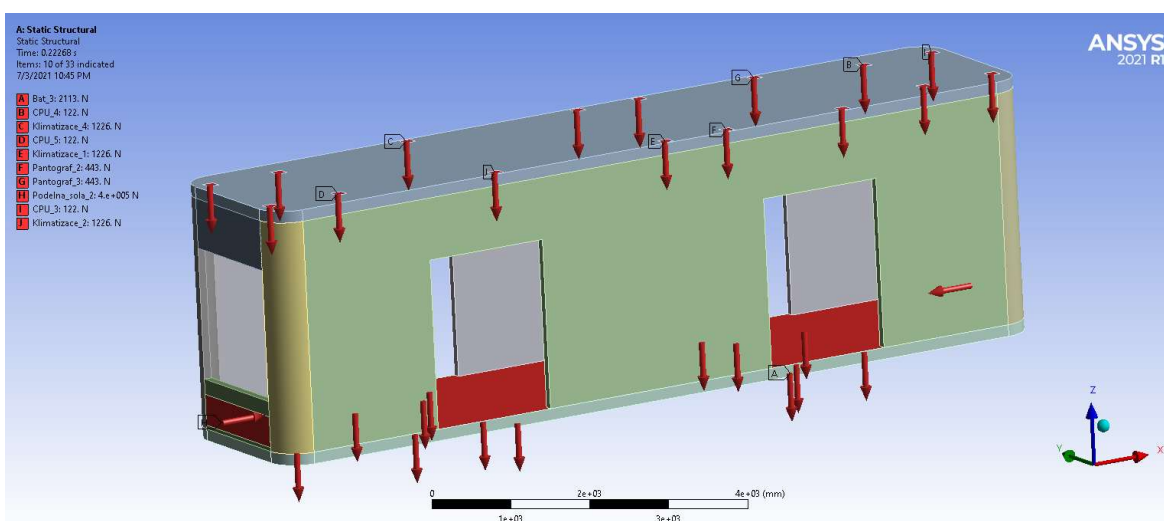
Navrhované řešení nespojitosti modelu

Nespojitost modelu lze tedy řešit zjemněním sítě celého modelu, zde narážíme na limit používaného hardwaru (*dostupný hardware je schopný zpracovat max cca 1 300 000 elementů*). Případně zjemněním sítě v konkrétních částech modelu, kde dochází k nespojitostem. Pomocí nástrojů pro lokální úpravu sítě. Jako druhá možnost se nabízí využití vyloučených regionů optimalizace. To znamená spojit plochy na které je aplikované zatížení s vazbami pomocí ploch které nejsou zahrnuty do optimalizace a zůstanou zachovány. Tento přístup velice ovlivňuje výsledný model zásahem uživatele, definováním ploch pro zachování. Oddálí se tedy od optimální topologie modelu, čím je limitován přínos optimalizace topologie.



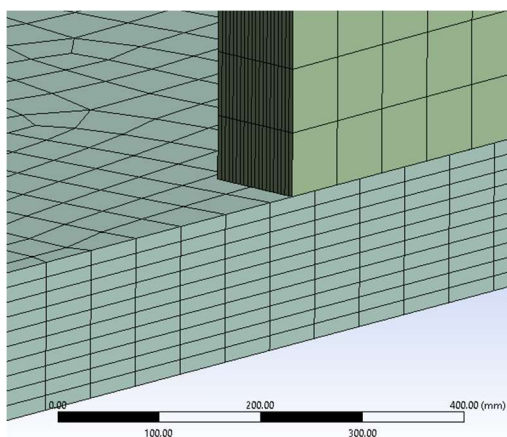
8.3 Optimalizace zjednodušeného modelu skříně tramvaje s dveřmi a okny podle zátěžového stavu 1

Dalším krokem je vytvoření modelu, respektujícího funkční otvory pro nástup a výstup cestujících a oken v přední a zadní části vozidla. Model respektuje první zátěžový stav podle Obrázek 23. Použitý případ zatížení je zobrazen na Obrázek 31. Upevnění modelu na podvozcích je zde také nahrazeno dvojicí vazeb, které umožňují natáčení podle příčné osy Y a jeden z podvozků je volný v podélném směru X. K tomuto modelu je pozměněn přístup a je řešen jako sestava více těles. Model se skládá ze samostatných solidů podlahy, střechy, levé a pravé bočnice, předního a zadního čela a ze čtyřech rohových sloupků. Na Obrázek 31 jsou solidy barevně odlišeny.



Obrázek 31. Zobrazení zatížení v ANSYSU Plechovka_V3

Tento přístup je zvolen z důvodu síťování. Celkový mode je rozdělen na jednodušší geometrická tělesa. Síťování těchto těles je jednodušší a přesnější. Je zde použito hexahedrické síťe a lokálně zvýšen počet elementů po tloušťce stěny na 20. Toto nastavení je znázorněno na Obrázek 32. To umožňuje větší variabilitu tloušťky stěny při optimalizaci.

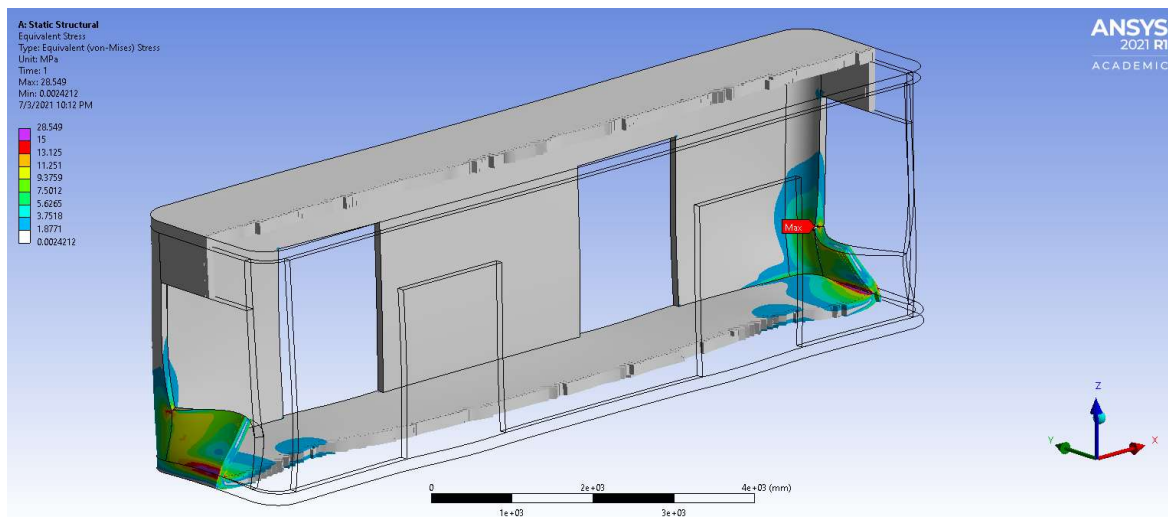


Obrázek 32. Detail síťování



Maximální rozměr elementu je 65 mm (*400 170 elementů*). Což by při použití tetrahedrické sítě znamenalo, že by po tloušťce stěny byly jen dva elementy, to je nedostatečný počet.

Obrázek 33. zobrazuje výsledek statické analýzy v řezu pro lepší viditelnost deformace. Na první pohled lze vidět hlavní deformace v oblasti působení podélné síly 400 kN. Maximální hodnota napětí v tomto modelu činí pouze necelých 30 MPa, model je tedy pro tento případ zatížení předdimenzovaný (*stěna 100 mm*). Maximální napětí se objevuje především v ostrých přechodech, jako jsou například rohy v oblasti působení zatěžujících sil.

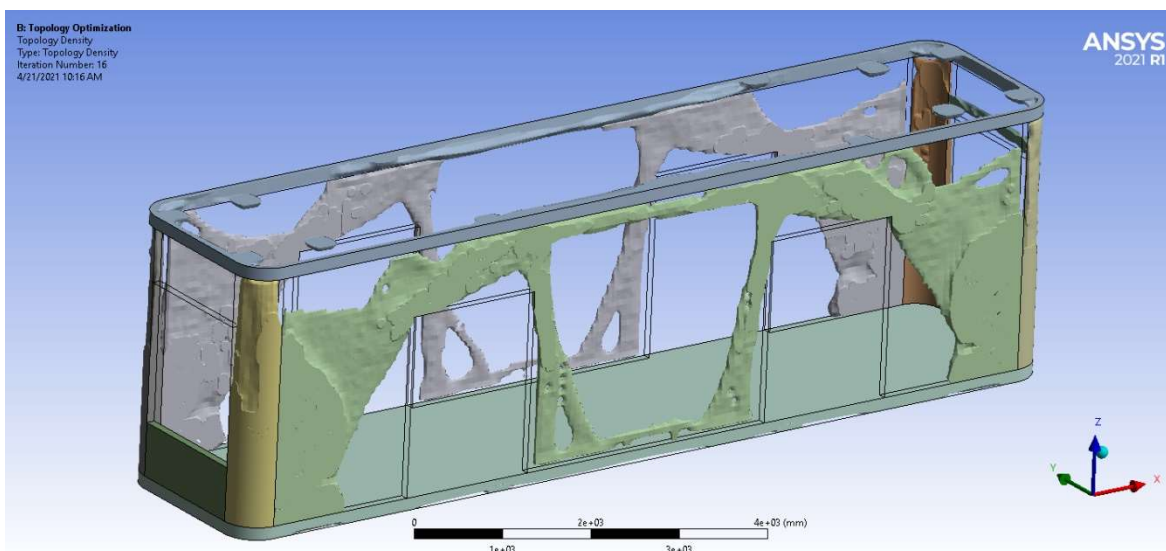


Obrázek 33. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V3

Zde se již přibližujeme k reálnějšímu výsledku optimalizace, který je zobrazen na Obrázek 34. Sále je možno si povšimnout nespojitosti modelu v oblasti zatížení od střešní výzbroje tentokrát pouze už jen ve čtyřech případech. Je zde využito vyloučené oblasti z optimalizace, která je vymezena po obvodu střechy „Plechovky“. Optimalizace je tímto způsobem ovlivněna, nicméně vrchní vaznice je z hlediska dnešní konstrukce důležitý konstrukční prvek.

Při zaměření se na tvar konstrukce je opět patrná podobnost s mostovou konstrukcí. Materiál se od zatížených míst pomocí zesílených rohů přenáší do střední části vaznice vozidla, kde je poměrně robustnější než na okraji. V tomto případě lze i sledovat proměnnou tloušťku stěny.

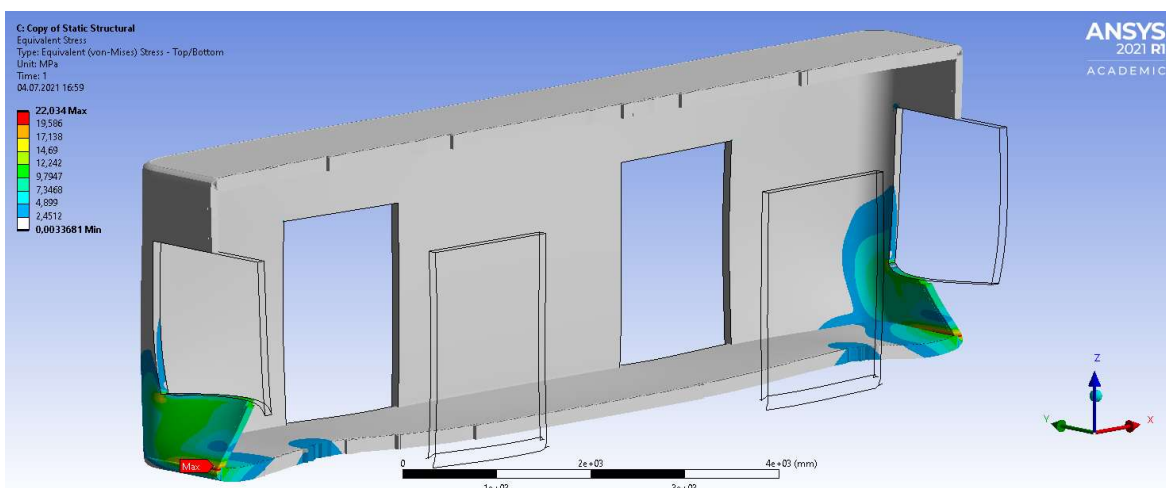
Jako cíl optimalizace je maximalizovat tuhost „Plechovky“ při zachování 40 až 50 % původní hmotnosti. Výsledek zachoval horní hranici omezení, tedy 50 %. Původní hmotnost „Plechovky“ je 106 940 kg a byla snížena na 53 084 kg. V tomto stádiu optimalizace hledáme toky materiálu a k finálnímu produktu bude nutné podniknout mnoho dalších kroků. Z tohoto důvodu se tedy nezaměřujeme na konkrétní hodnoty hmotnosti. Které jsou mnohonásobně vyšší, než u stávajících řešení skříní vozidel.



Obrázek 34. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET Plechovka_V3

8.3.1 Optimalizace plošného modelu

U takto tenkostěnného modelu je na místě uvažovat o nahrazení solidového modelu shellovým modelem. Tedy modelem skládajícího se z ploch. Toto zjednodušení přináší uspořnění elementů a výpočetního času a pokud ho lze provést doporučuje se. Jak se můžeme přesvědčit porovnáním Obrázek 33 a Obrázek 35 maximální napětí se liší pouze o hodnotu 5 MPa.

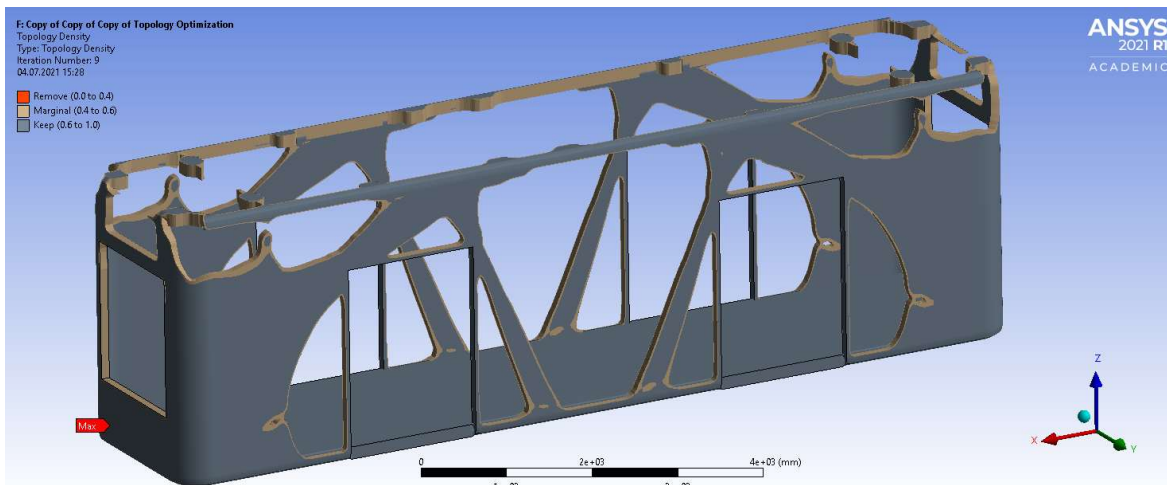


Obrázek 35. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V4

Shellový model se skládá ze tří ploch, střechy a podlahy o tloušťce 150 mm a bočnic spolu s čely o tloušťce 100 mm. Na Obrázek 36 je znázorněn optimalizovaný model s hmotností 53 % původního modelu. Lze si všimnout, že model má konstantní tloušťku stěn oproti předchozímu optimalizovanému modelu na Obrázek 34. Až na tento rozdíl jsou modely velice podobné, jejich konečná hmotnost se pohybuje okolo 50 % původní hmotnosti.

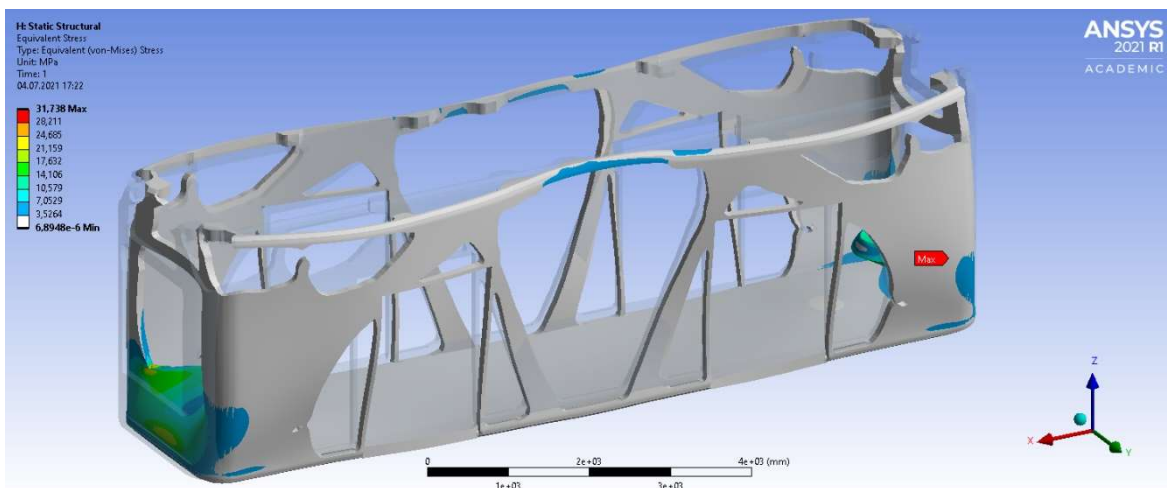


Z hlediska optimalizace se konstantní tloušťka stěny zprvu zdála jako problém, jelikož jsme se chtěli zaměřovat i na optimální tloušťku stěny. Po přehodnocení přístupu k optimalizaci ve výsledku nebude záležet na tloušťce stěny. Více se tímto tématem budeme zabývat v kapitole Metodika pro optimalizaci topologie.



Obrázek 36. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda Density Based Plechovka_V4

Na Obrázek 37 je vyobrazen výsledek validace optimalizovaného modelu „Plechovka_V4“. I po optimalizaci se v modelu nachází spousta nevyužitého materiálu právě na stěnách, které mají konstantní tloušťku a kde by šel materiál, respektive hmotnost ušetřit.



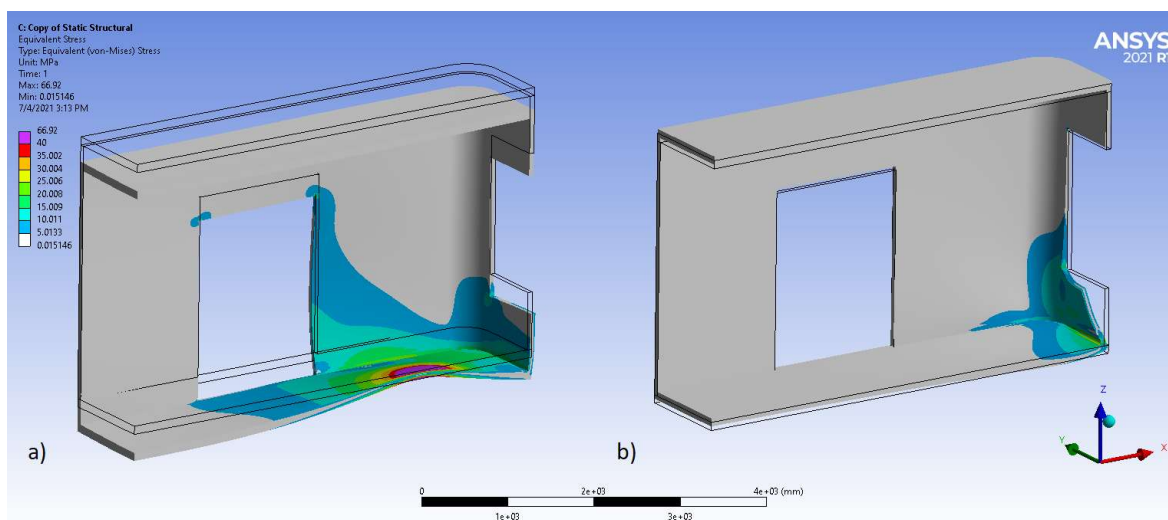
Obrázek 37. Validace optimalizovaného modelu Plechovky_V4



8.3.2 Optimalizace čtvrtiny původního modelu.

Další možností zjednodušení modelu je využití symetrie. Zatěžovací stav 1 (Obrázek 23) je nesymetrický. Nesymetrii způsobuje rozložení střešní výzbroje, kde na jedné straně je ukotven pantograf a na druhé klimatizace. V případě drobné úpravy zatížení, tedy uvažování pantografu na obou stranách a posunutí klimatizace do středu vozidla získáme symetrické zatížení, podle rovin XZ a YZ. V této fázi zkoušení a testování je tato změna přípustná. Touto adaptací předchozí verze V3 vznikl nový model „Plechovka_V5“, na kterém bude testováno použití rovin symetrie.

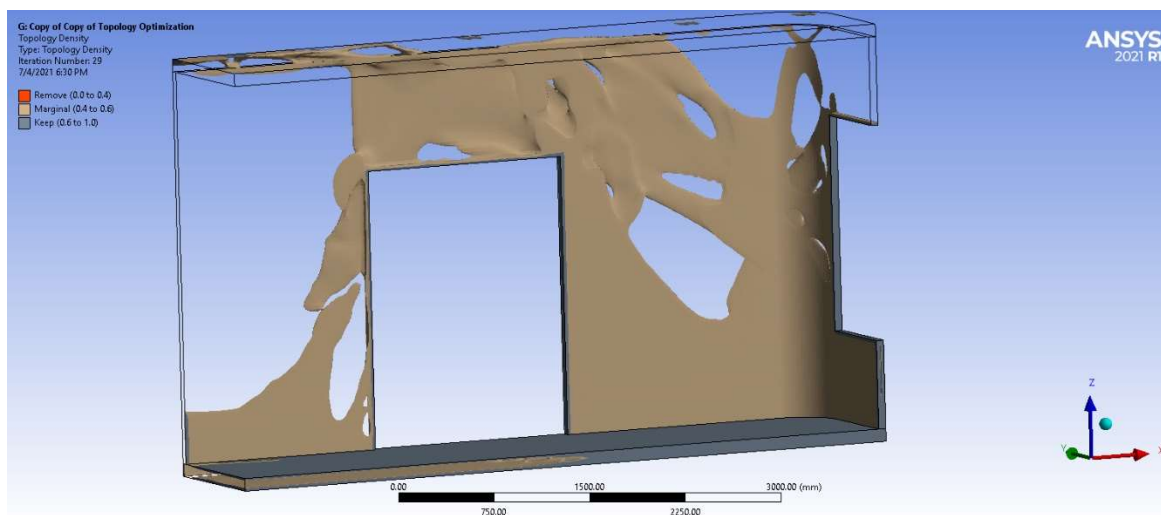
Další změnou je rozdělení zatížení podle směru a velikosti působení, do dvojice statických výpočtů. První z výpočtů zahrnuje provozní zatížení „Plechovky“ a jeho řešení je zobrazeno na Obrázek 38 (a). Druhý výpočet se zabývá pouze podélnou silou na nárazník „Plechovky“ a řešení je zobrazeno na Obrázek 38 (b). Následné optimalizace topologie mají nastavené cíle tak, aby zvýšily tuhost v závislosti na obou statických výpočtech. Toto rozdělení je aplikováno z důvodu zachování spojitosti modelu, optimalizace se řeší pro oba případy samostatně a tím by nemělo docházet k upřednostňování řádově větších zatížení. Poté na základě, obou stavů vznikne optimalizovaný model.



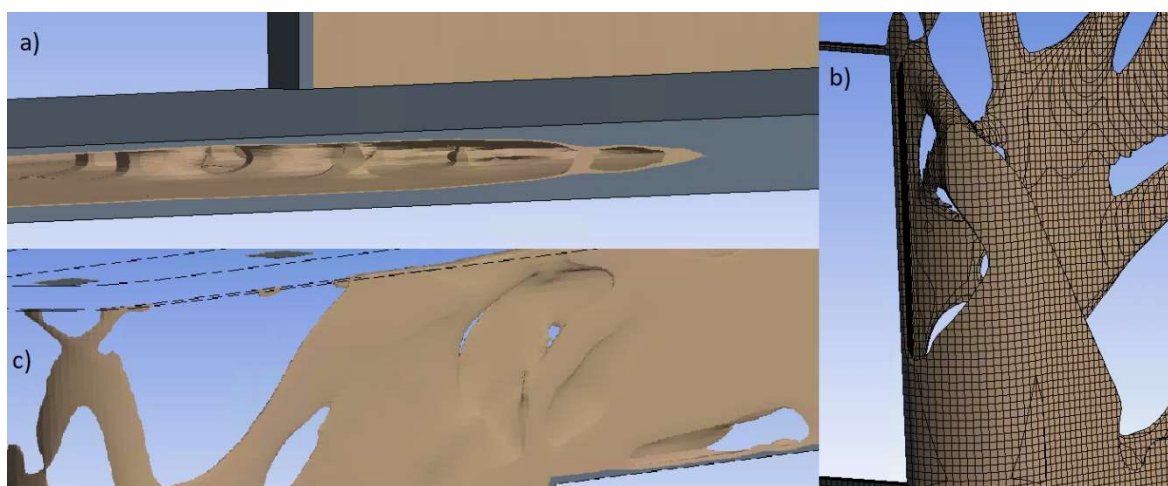
Obrázek 38. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V5

Domněnka výše uvedeného postupu se nicméně příliš neosvědčila, jak je viditelné na Obrázek 39, kde si stále lze všimnout nespojitostí v oblasti zatížení od střešní výzbroje.

Čtvrtinový model přináší výhody s možností použití většího počtu elementů, a tedy větší variability optimalizace. Pro tuto optimalizaci bylo použito 667 880 elementů v hexahedrické síti. Byl zde zvýšen i počet elementů po tloušťce stejně jako v předchozím modelu. Na Obrázek 40 si lze všimnout například duté podlahy (a) ve středu a dále rozložení vrstev po bočnici modelu (b,c). V rohové části modelu je vnitřní a vnější vrstva (b).



Obrázek 39. Čtvrtinový optimalizovaný model pro zátěžový stav 1 Density Based Plechovka_V5



Obrázek 40. Detail optimalizovaného modelu Plechovka_V5

Použití symetrie pro optimalizaci topologie vyvolává otázku, zdali optimalizovaný model s aplikováním symetrie a optimalizovaný model počítaný vcelku bude stejný a bude mít stejné mechanické vlastnosti. Touto otázkou se bude zabývat následující podkapitola.



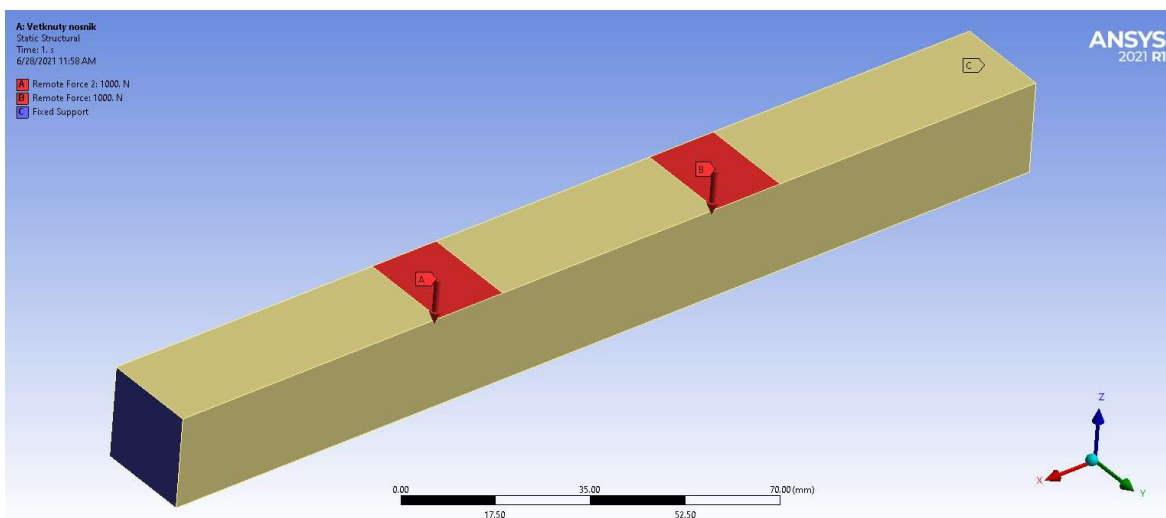
8.4 Využití symetrie

Symetrie se v Ansysu dá chápat dvěma způsoby. V prvním případě využití symetrie pro rozdělení modelu a počítání pouze jeho části. To nám šetří množství elementů a výpočetní čas. V druhém případě využití symetrie v optimalizaci topologie. Nešetří elementy ani výpočetní čas, jedná se pouze o výrobní omezení (*použitelné jen pro metodu Density Based*) které zrcadlí optimalizovanou strukturu podle zadaných rovin symetrie. V této kapitole se budeme zabývat prvním případem použití symetrie.

Pro ověření vznikla jednoduchá úloha (*Obrázek 41*) zatížení čtvercového profilu o rozměrech 200x20x20 mm. Profil je symetricky zatížen ve dvou místech silou 1000 N na danou plochu 20x15 mm. Úloha je symetrická podle dvojice rovin XZ a YZ. Dále jsou dvě varianty ukotvení:

- a) Oba konce nosníku jsou vetknuté
- b) Oba konce nosníku se mohou otáčet kolem osy Y

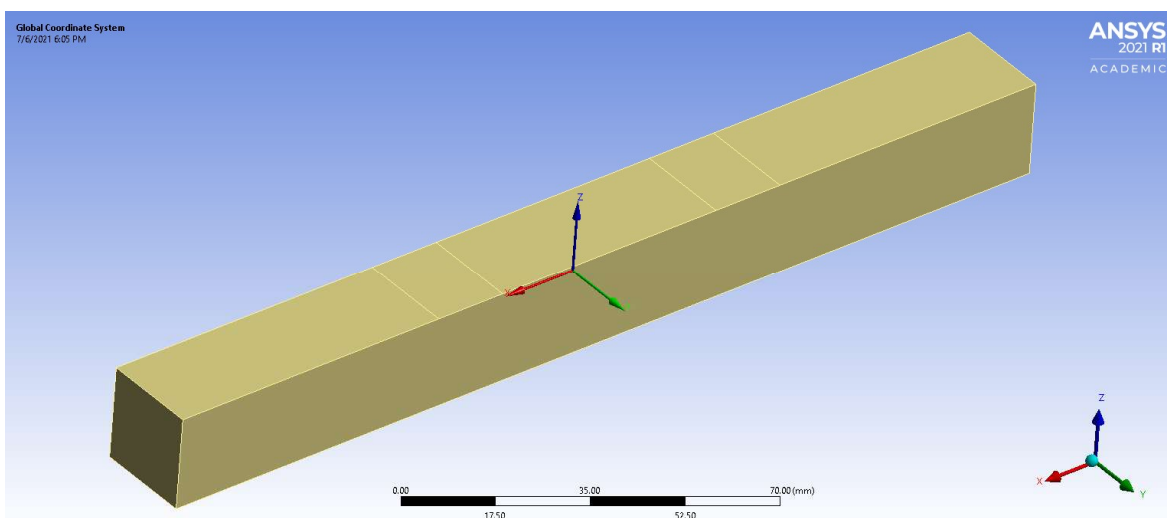
Optimalizace jsou provedeny metodou LEVEL SET a Density Based, které v této úloze také porovnáme z hlediska napětí a průhybů u jednotlivých výsledků metod.



Obrázek 41. Úloha zatíženého nosníku

Optimalizované modely mají stejné hmotnostní omezení – snížení hmotnosti na 0,13 kg, s cílem maximalizovat tuhost. Na tuto hodnotu hmotnosti jsou také navrženy duté čtvercové profily.

Na Obrázek 42 je znázorněna poloha centrálního osového kříže ve středu nosníku. Všechny roviny symetrie se vztahují k této orientaci.



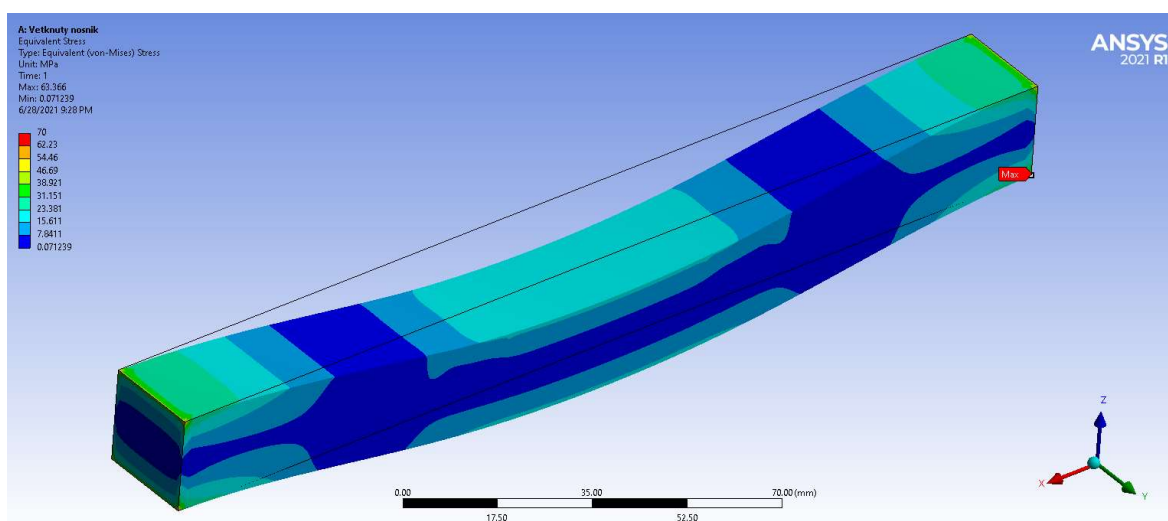
Obrázek 42. Umístění centrálního osového kříže.



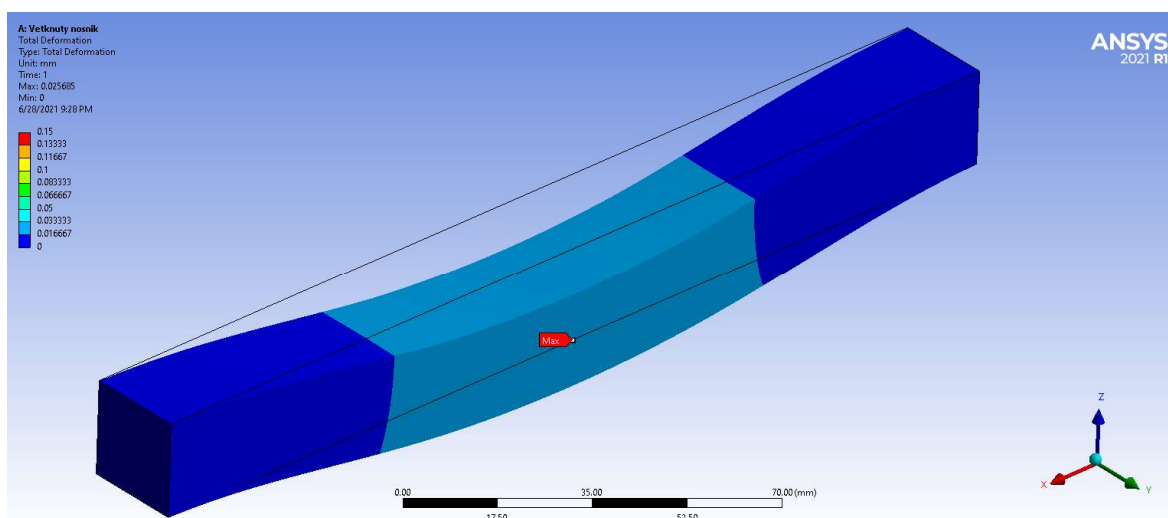
8.4.1 Nosník fixní uložení

Následující obrázky představují stav výchozího tvaru nosníku. To je plný materiál s velkým podílem nevyužitého materiálu pro přenos napětí. Obrázek 43 znázorňuje průběh napětí. Maximální hodnota dosahuje 63 MPa. Na dalším Obrázek 44 je znázorněna celková deformace s maximální hodnotou 0,0257 mm. Následující optimalizovaná řešení představují možná zlepšení stávajícího řešení.

Aktuální hmotnost stávajícího řešení činí 0,628 kg.



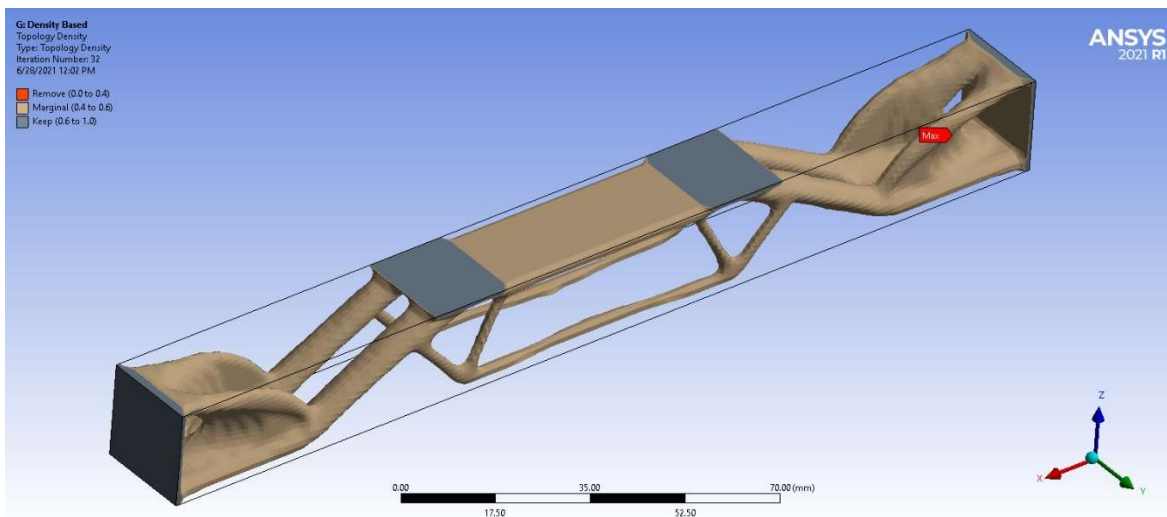
Obrázek 43. Nosník fixní vazby, napětí



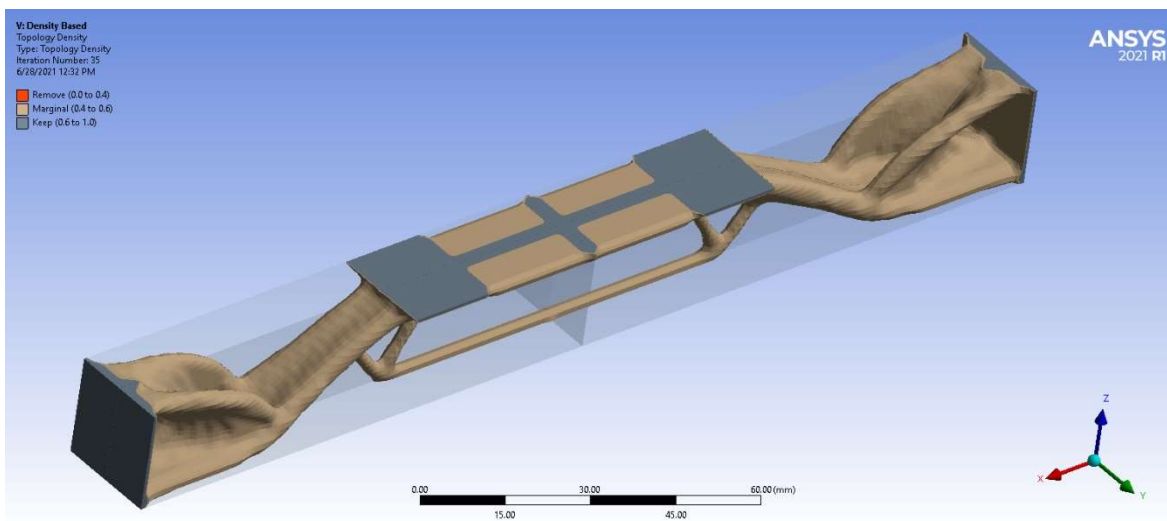
Obrázek 44. Nosník fixní vazby, deformace



Následující dva obrázky představují návrh pomocí metody Density Based. Na Obrázek 45 je model bez využití symetrie, tedy optimalizovaný v celku. Za povšimnutí stojí tenká konstrukce ve spodní části nosníku, která nebude pravděpodobně vykazovat vysokou tuhost. Další Obrázek 46 zobrazuje model optimalizovaný pomocí symetrie, metodě byla k dispozici pouze čtvrtina optimalizačního prostoru. V tomto případě symetrie ovlivnila výsledky optimalizace ve značné míře.



Obrázek 45. Optimalizovaný tvar celého nosníku, fix, DB

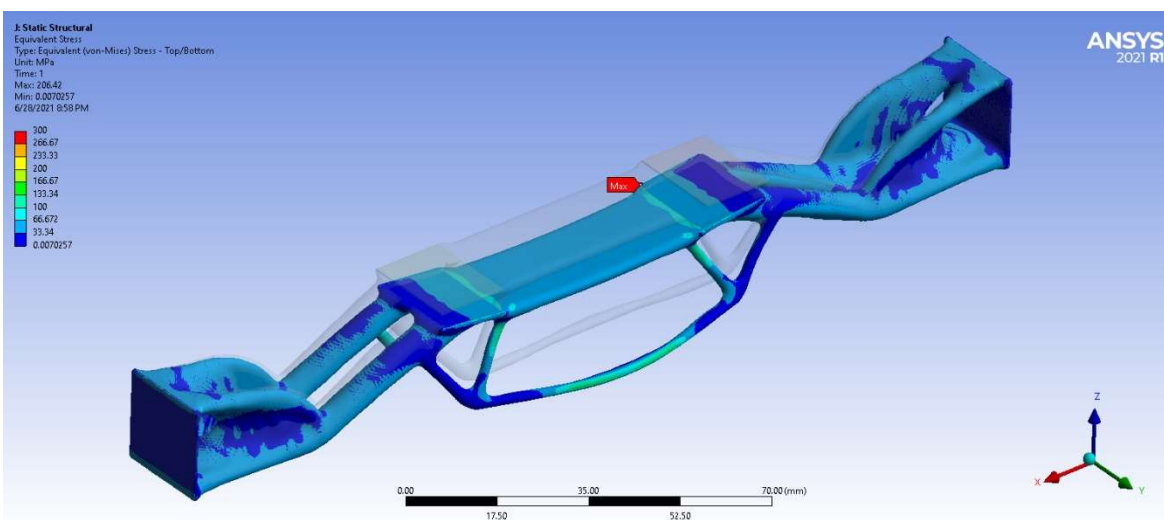


Obrázek 46. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, fix, DB

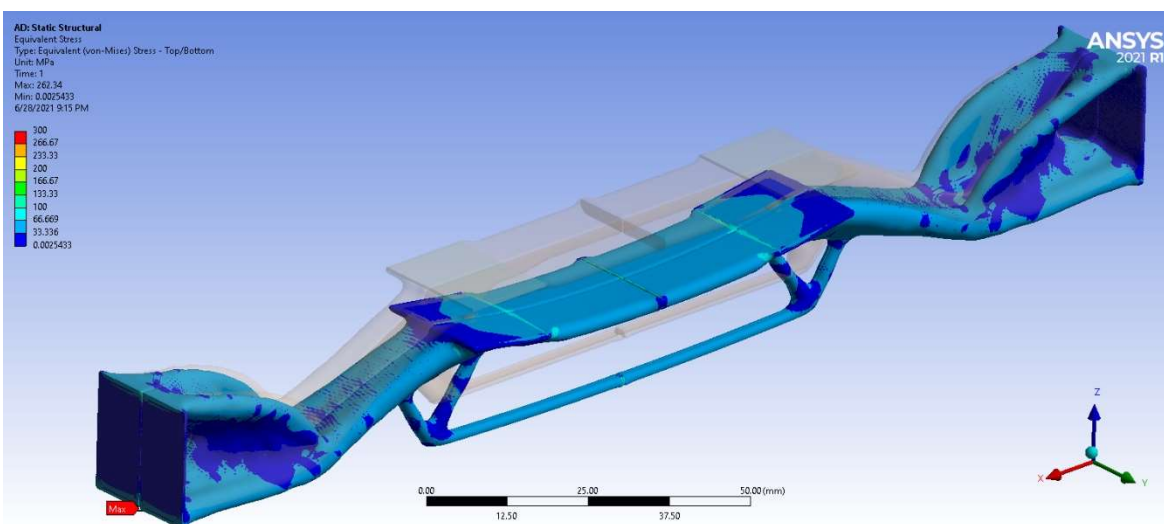


Obrázky níže zobrazují validaci optimalizace pomocí metody Density Based. Na Obrázek 47 vidíme průběh napětí skrze nosník. Většinové napětí se pohybuje v oblasti 66 až 100 MPa, pouze v tenkých částech konstrukce na spodu se napětí zvyšuje a pohybuje se ve značné míře v hodnotách 133 až 166 MPa. Oproti tomu na Obrázek 48 lze pozorovat také průběh napětí, nicméně po celé konstrukci se napětí pohybuje v řádu 66 až 100 MPa.

Z tohoto lze usoudit, že model optimalizovaný s pomocí symetrie vykazuje v tomto případě lepší vlastnosti.



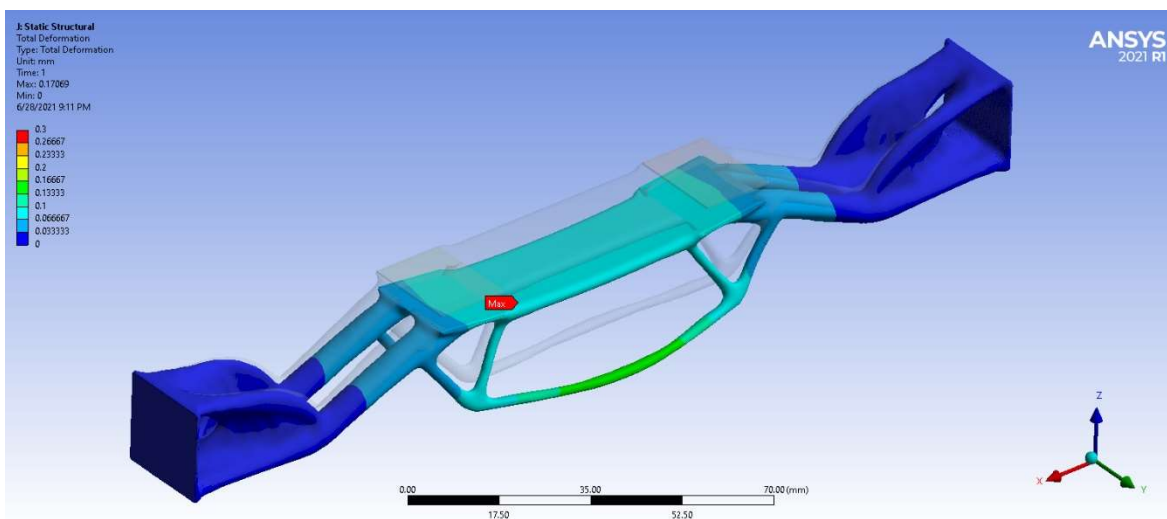
Obrázek 47. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, DB



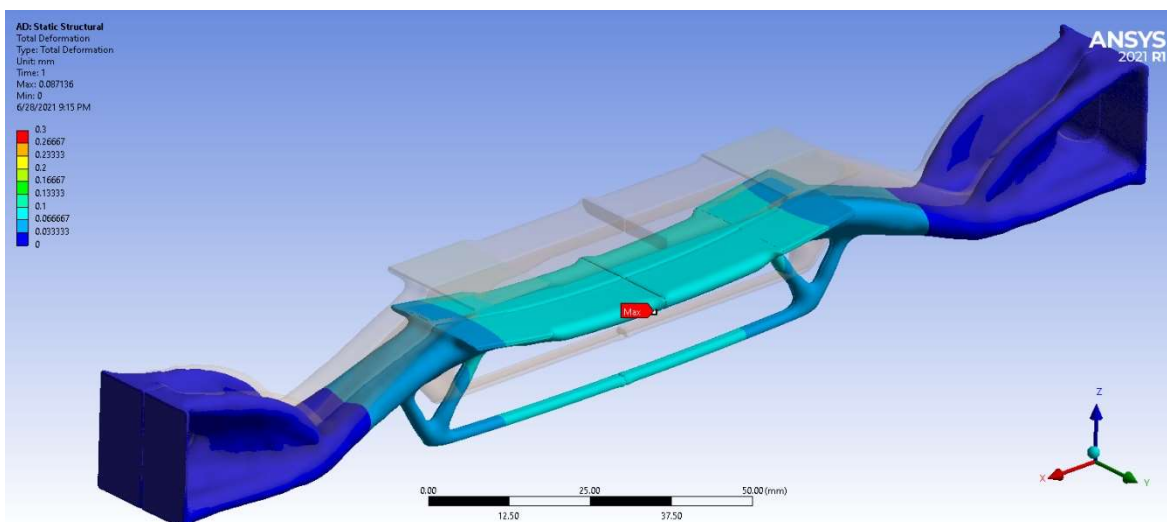
Obrázek 48. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosíku, fix, DB



Ještě zůstaneme u metody Density Based. Následující obrázky zobrazují průběh deformace optimalizovaných nosníků. Na Obrázek 49 se pohybujeme vprostřed nosníku v deformacích 0,06 až 0,1 mm. Opět tenké části konstrukce vykazují vyšší deformace až 0,16 mm. Když to srovnáme s Obrázek 50, kde se deformace vprostřed nosníku pohybují pouze v rozmezí 0,06 až 0,1 mm. Tak v tomto porovnání vychází lépe opět nosník s použitím symetrie. Především díky robustnější spodní struktuře.



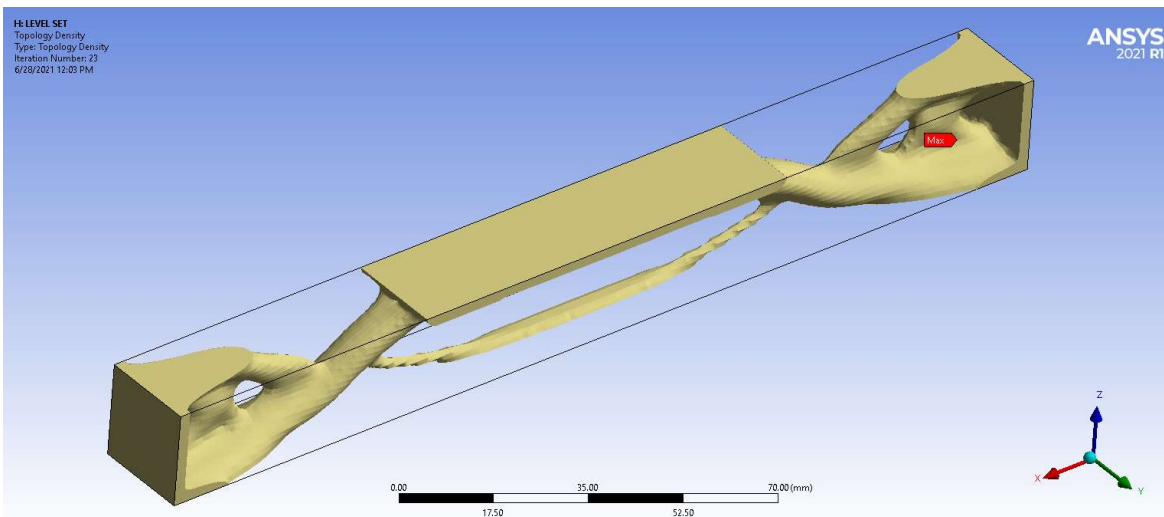
Obrázek 49. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, DB



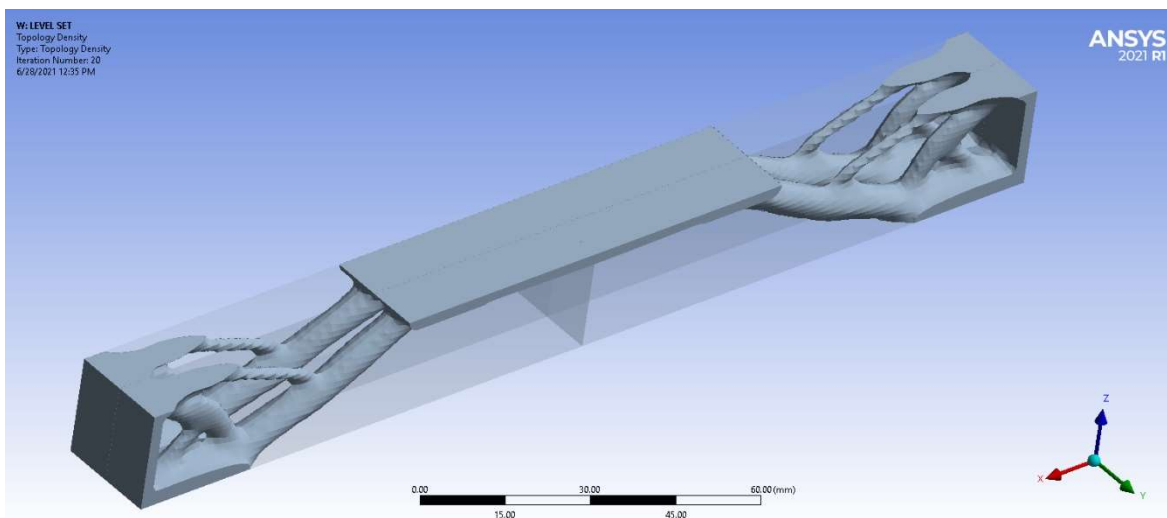
Obrázek 50. Deformace optimalizovaného nosíku, čtvrtina nosíku, fix, DB



Následující obrázky jsou výsledky metody LEVEL SET podle prezentovaných informací by se mělo jednat o lepší výsledky oproti metodě Density Based. Když porovnáme Obrázek 51 s Obrázek 52 na první pohled vidíme dva naprosto odlišné nosníky. Tedy dvě „optimální“ řešení dané úlohy, které následně porovnáme.



Obrázek 51. Optimalizovaný tvar celého nosníku, fix, LS

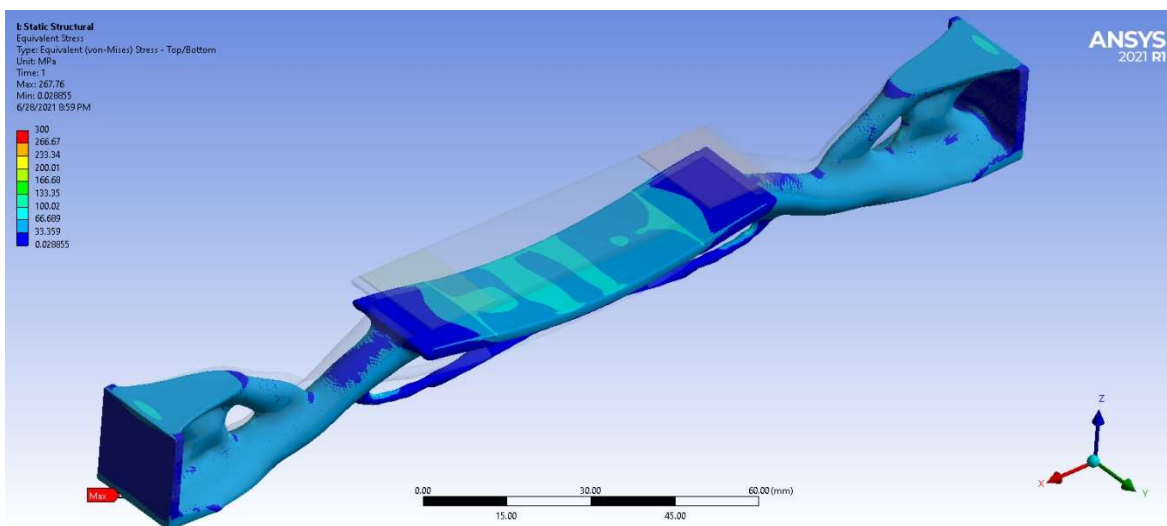


Obrázek 52. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, fix, LS

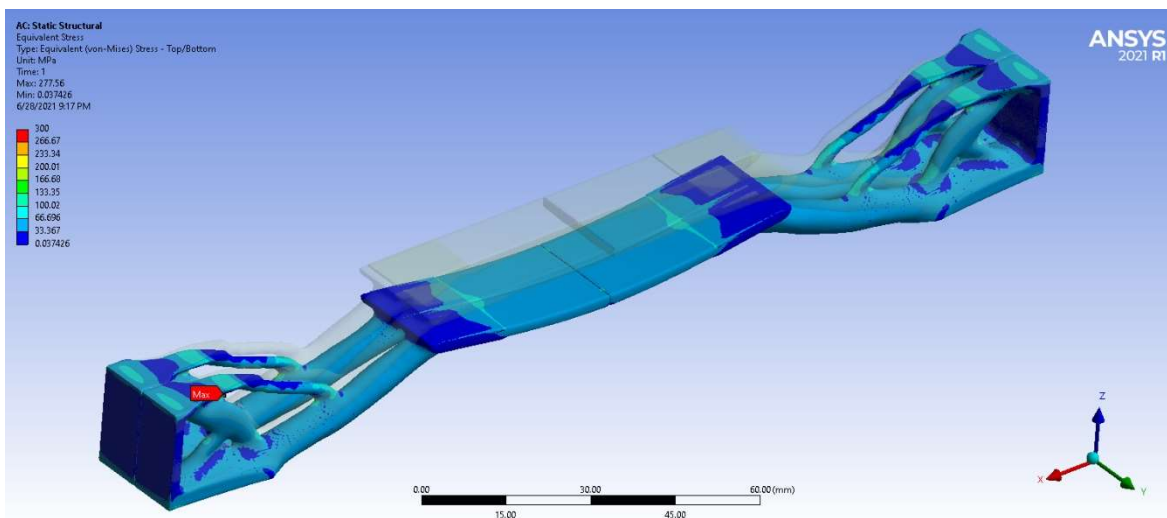


Validace výsledků optimalizace metodu LEVEL SET. Na Obrázek 53 je znázorněn průběh napětí, ve středu nosníku se přibližujeme k hodnotám až 133 MPa a na okraji se dostáváme k poměrně stejnému napětí po celé ploše. Oproti tomu na Obrázek 54 se ve střední části pohybujeme v nižších hodnotách do 100 MPa, na okraji se nabízí nevyrovnané přechody napětí.

Z hlediska vizuálního porovnání výsledků je těžké říct které řešení je lepší. V globálním pohledu se zdá být rozložení napětí podobné. Ovšem při řešení celého modelu není úplně jasný význam tenké spojovací struktury ve spodu. V porovnání s metodou Density Based má metoda LEVEL SET větší oblasti s vyšším napětím. Tedy předpoklad lepšího řešení není splněn.



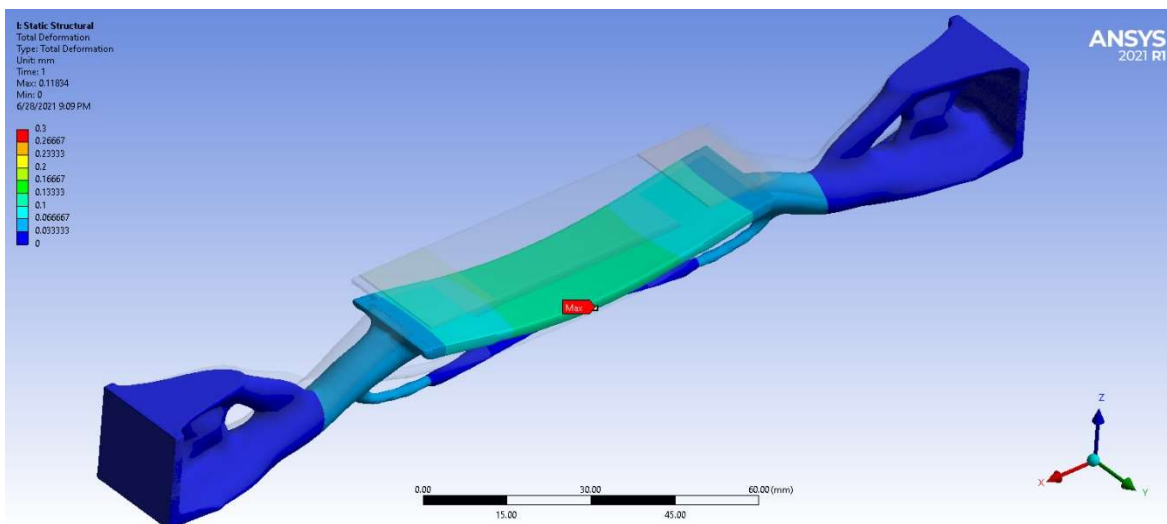
Obrázek 53. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, LS



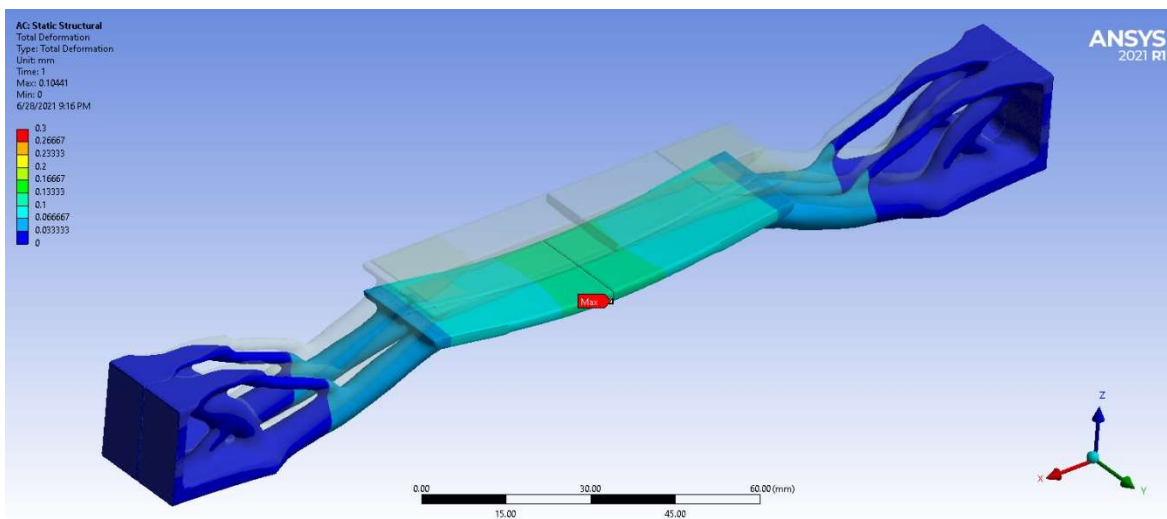
Obrázek 54. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, fix, LS



Zobrazení průběhu deformací je zobrazeno na Obrázek 55 a Obrázek 56. Porovnání mezi těmito dvěma obrázky se provádí velice obtížně, jelikož vykazují dosti podobné průběhy deformací. Deformace v obou případech dosahují až 0,16 mm ve střední části. Metoda LEVEL SET vykazuje větší průhyby oproti metodě Density Based, kde byly hodnoty deformace do 0,1 mm a v jednom případě 0,13 mm.



Obrázek 55. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, LS

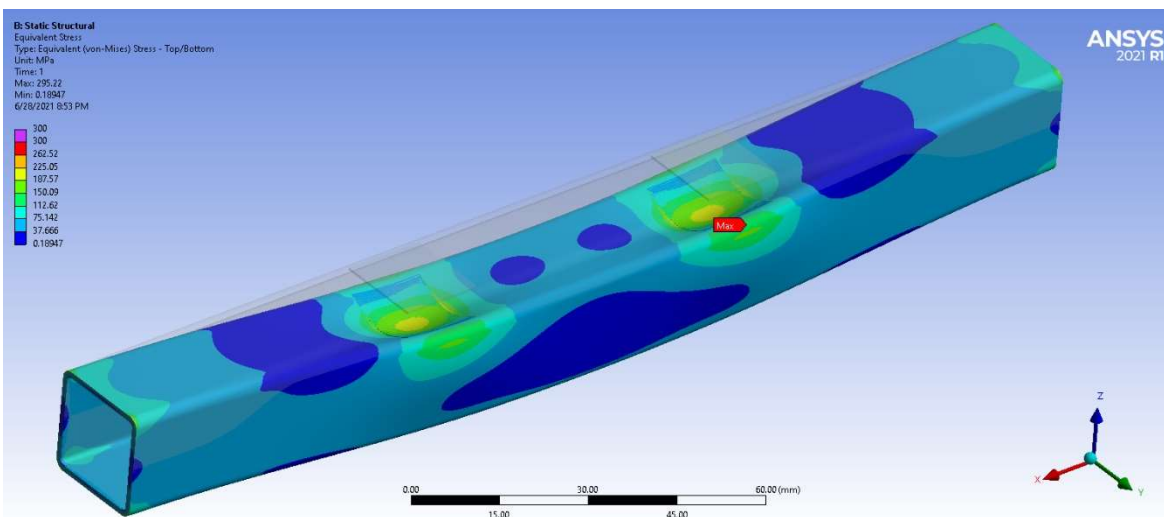


Obrázek 56 Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, fix, LS

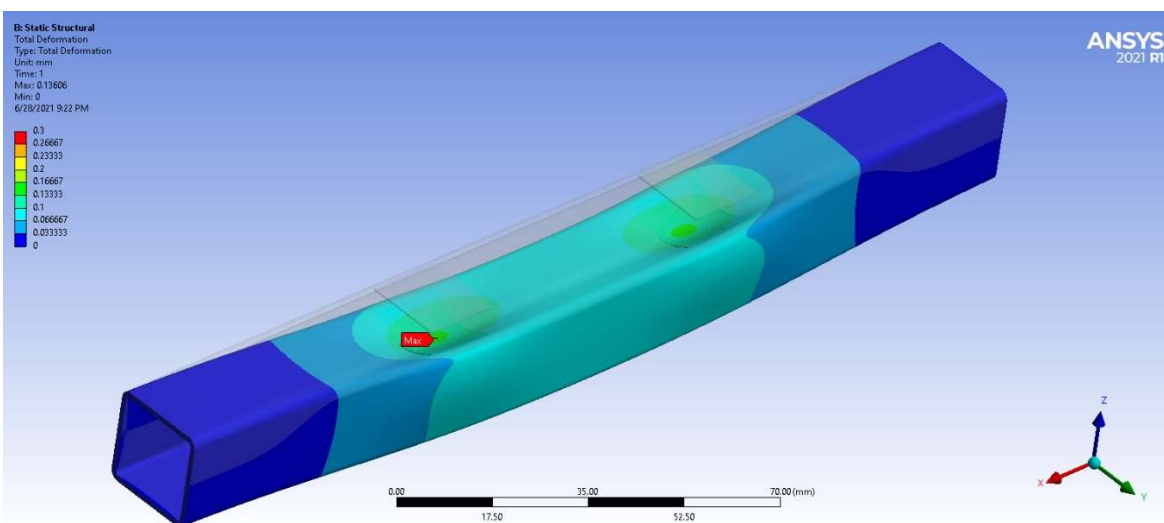


Na Obrázek 57 a Obrázek 58 je znázorněno řešení pomocí klasického dutého čtvercového profilu o hmotnosti 0,13 kg. Tedy nosník bez využití optimalizace topologie. Při srovnání průběhu napětí s optimalizovanými nosníky, zde dochází k napětí až 225 MPa (*způsobeno nízkou tloušťkou pod zatížením*), zatímco na optimalizovaných nosnících se napětí pohybuje do 133 MPa. Přesuneme-li se k průběhu deformace, kde se lokálně dostáváme na hodnotu 0,13 mm je to srovnatelné s nosníky optimalizovanými metodou LEVEL SET. Nicméně nosník zobrazený na Obrázek 50 optimalizovaný metodou Density Based s využitím symetrie nabízí nižší hodnoty průhybu, a to v maximální hodnotě 0,08 mm.

Nosníky s využitím optimalizace topologie vykazují stejné nebo lepší vlastnosti, oproti klasickému řešení bez využití optimalizace topologie. Je nutné podotknout, že pro srovnání, zdali jsou optimalizované nosníky lepší není tato součást nejvhodnějším příkladem a v praxi by se použil dutý profil se silnější stěnou.



Obrázek 57. Dutý nosník – napětí, fix

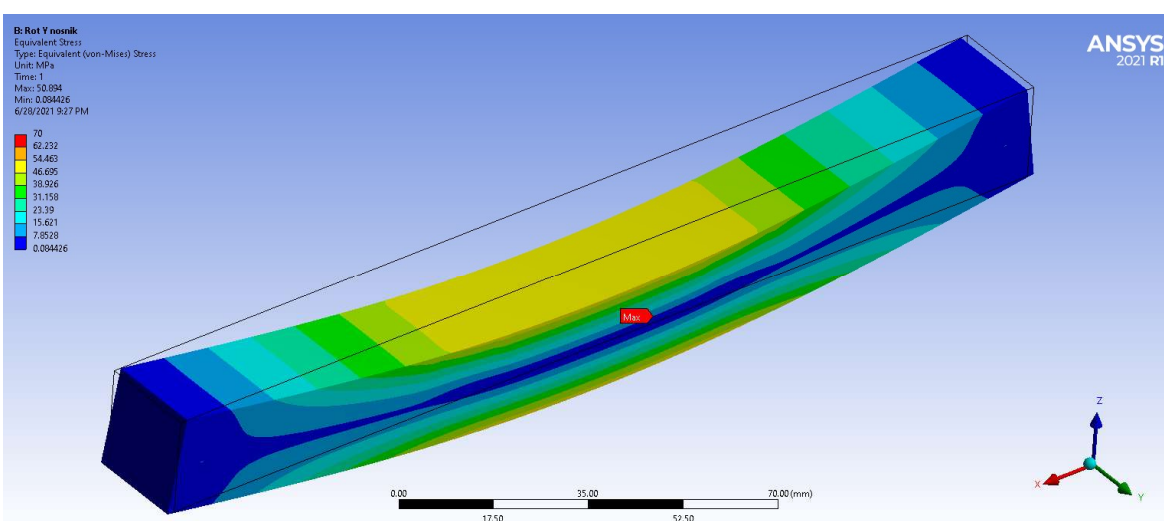


Obrázek 58 Dutý nosník – deformace, fix

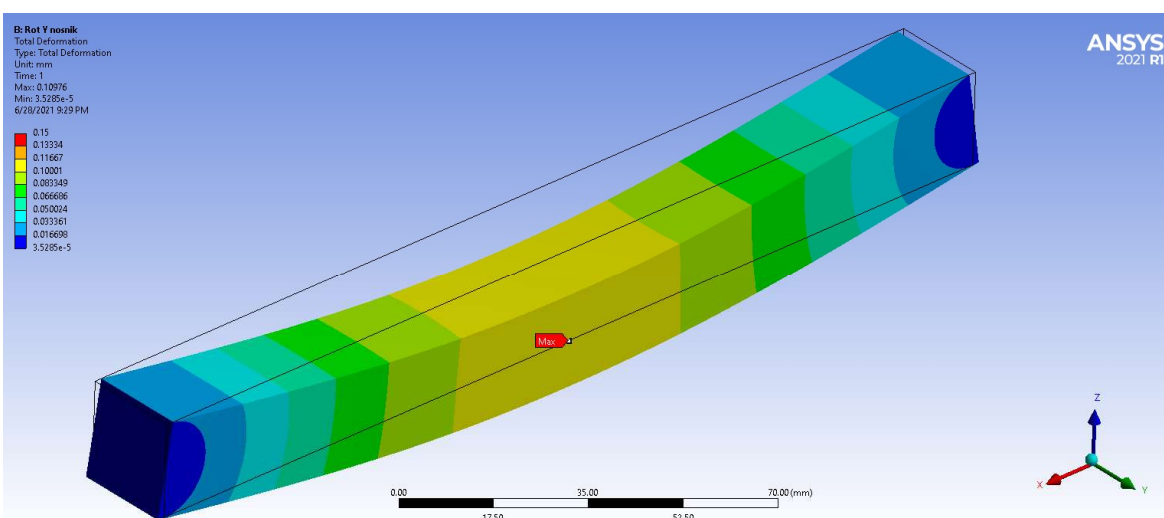


8.4.2 Nosník uložený s volnou rotací kolem osy Y

Zde se budeme zabývat druhým případem ukotvení nosníku. Na obou koncích nosníku jsou umožněny pouze rotace kolem osy Y. Na prvním Obrázek 59 je znárodněný průběh napětí skrze nosník. Lze si povšimnout vyšších napětí v horním a spodním vláknu nosníku. Vzhledem k optimalizaci lze předpokládat zachování těchto vláken. Maximální hodnota napětí je 50 MPa právě ve zmíněných vláknech. Dále lze předpokládat odstranění středu a okrajových částí nosníku, kde je z hlediska napětí mnoho nevyužitého materiálu. Obrázek 60 zobrazuje průběh deformace nosníku jehož maximální hodnota je 0,1 mm ve středu nosníku.



Obrázek 59. Nosník rotační vazby, napětí

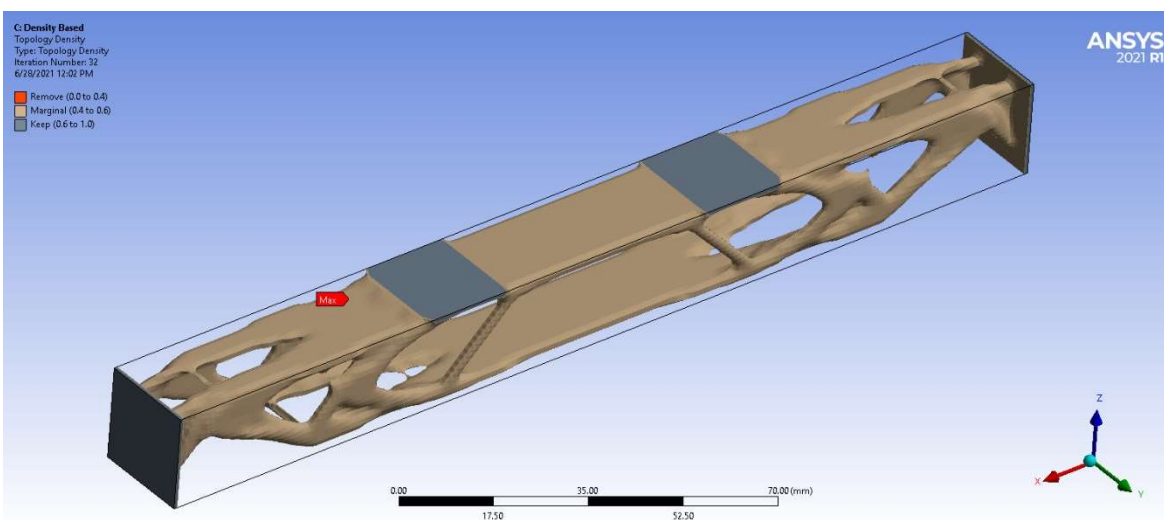


Obrázek 60. Nosník rotační vazby, deformace

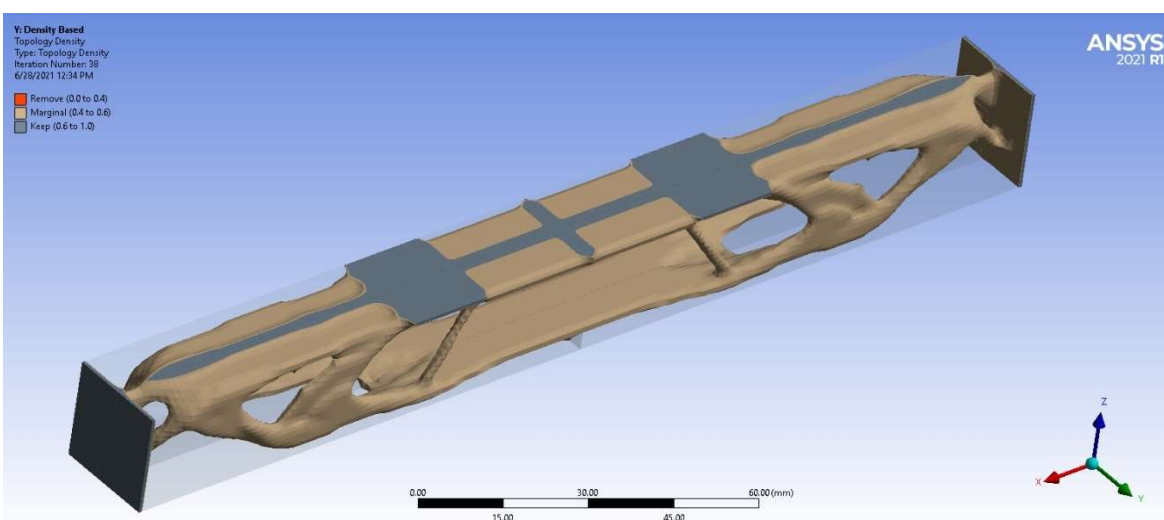


Optimalizace pomocí metody Density Based se zachovala podle předpokladu a zachovala vrchní a spodní vlákno materiálu. Střední nevyužitou část materiálu také podle předpokladu odebrala. Při porovnání optimalizace bez využití symetrie na Obrázek 61 a optimalizace s využitím symetrie na Obrázek 62. lze pozorovat velkou podobu ve střední části nosníku, ovšem značně jiné provedení okrajů nosníku s přechodem do vazby. Dále porovnáme obě řešení.

Při optimalizaci s využitím symetrie nastávají problémová místa podlé rovin symetrie v podobě švů. Při následném zpracování těchto optimalizovaných modelů v kroku vyhlazení povrchu materiálu dojde, také k zaoblení ploch náležících rovinám symetrie a vznikne vrub v součásti. Tento vrub je patrný na Obrázek 64.



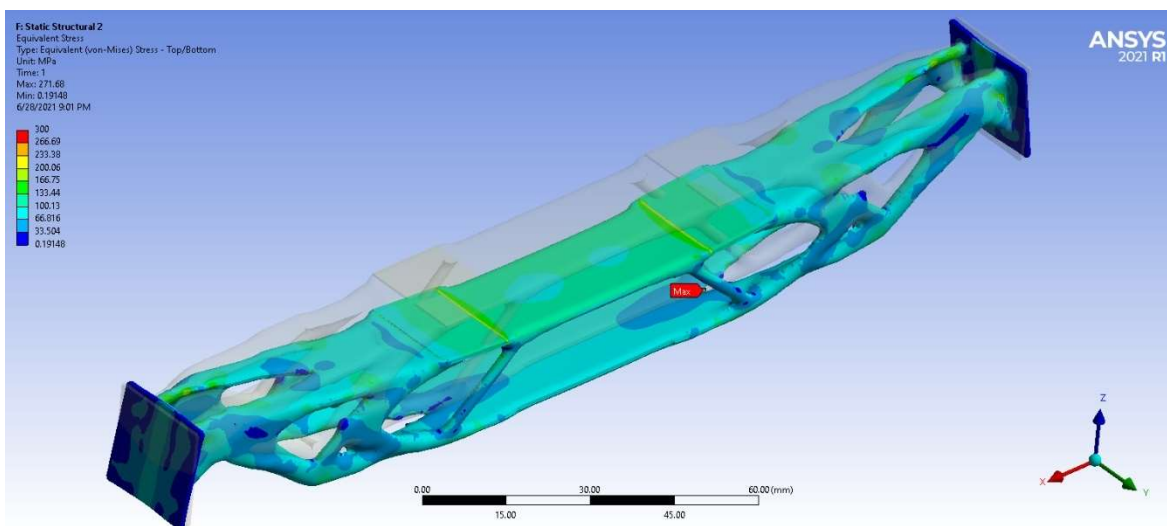
Obrázek 61. Optimalizovaný tvar celého nosníku, rot, DB



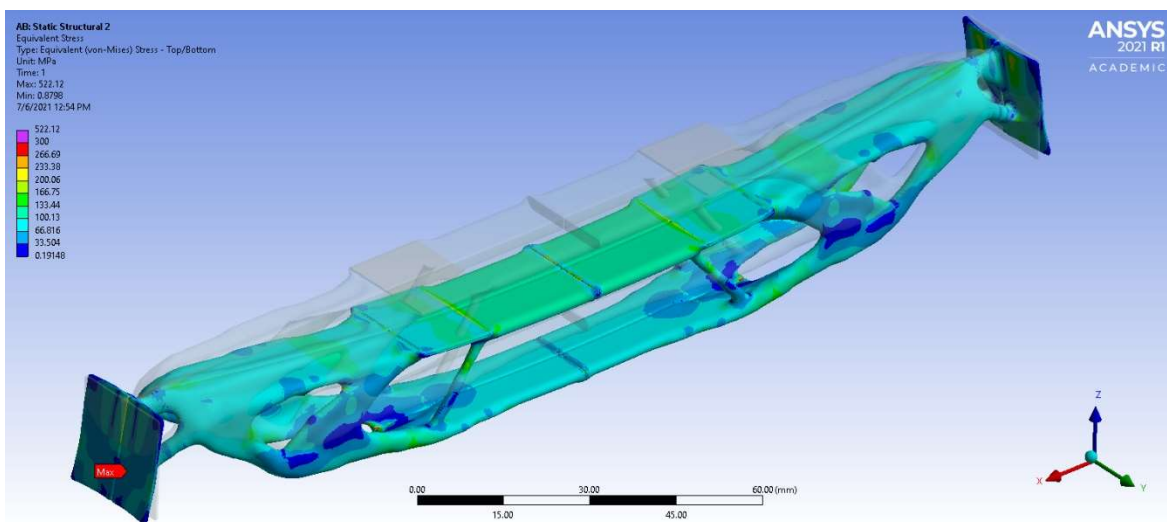
Obrázek 62. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, rot, DB



Následující obrázky srovnávají oba způsoby z hlediska napětí. Na prvním Obrázek 63 se ve střední části pohybujeme v rozmezí 100 až 133 MPa s lokálním zvýšením na okraji plochy na kterou působí síla až na 233 MPa. Na Obrázek 64 je z hlediska napětí srovnatelné řešení. Navíc se objevuje ve vrubu lokální napětí až 300 MPa, což je nežádoucí. Při porovnání přechodové části ze středu nosníku směrem k vazbám, zdá se být řešení na Obrázek 64 lepší. Je zde rovnoměrně rozloženo napětí po celém přechodu.



Obrázek 63. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník DB

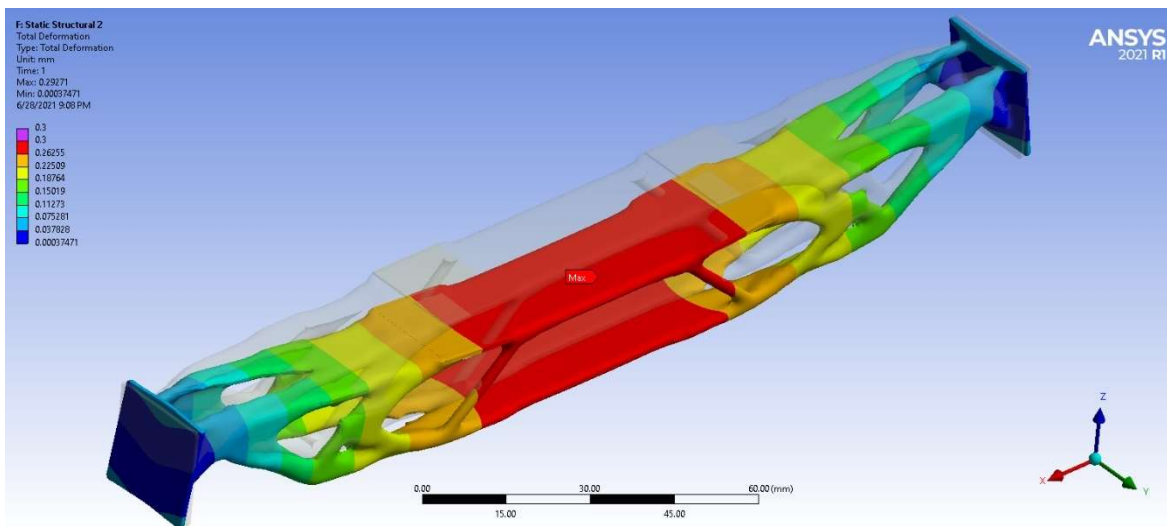


Obrázek 64. Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku DB

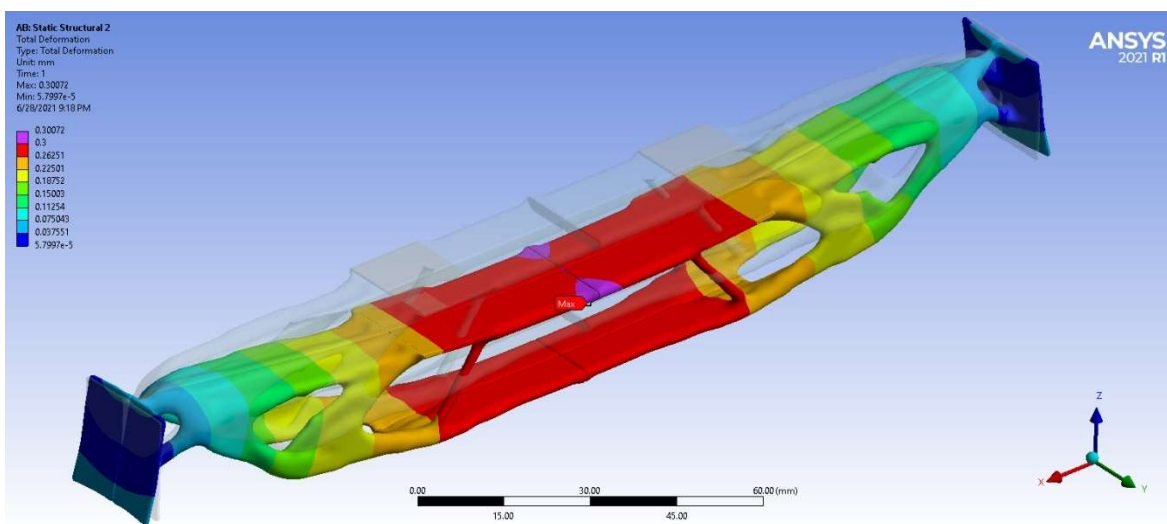


Při srovnání deformovaných tvarů na Obrázek 65 a Obrázek 66 je znát pouze nepatrný rozdíl, ve kterém optimalizovaný nosník s pomocí symetrie se prohýbá více, cca o 0,01 mm. Což je zanedbatelný rozdíl.

Při celkovém zhodnocení pro tento stav uložení vyšel nosník optimalizovaný za pomocí symetrie o něco hůře, ale rozdíl je zanedbatelný.



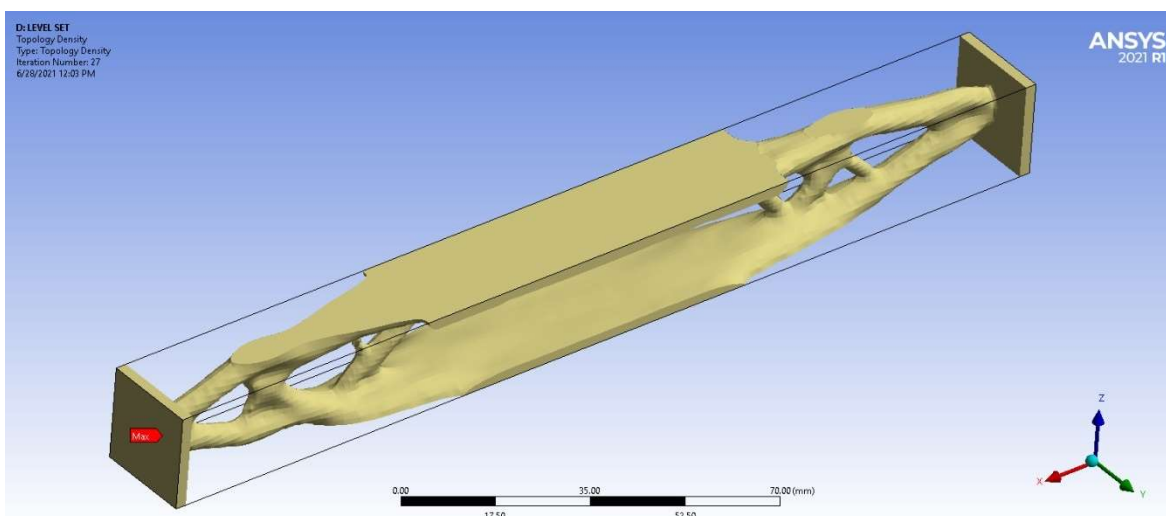
Obrázek 65. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, DB



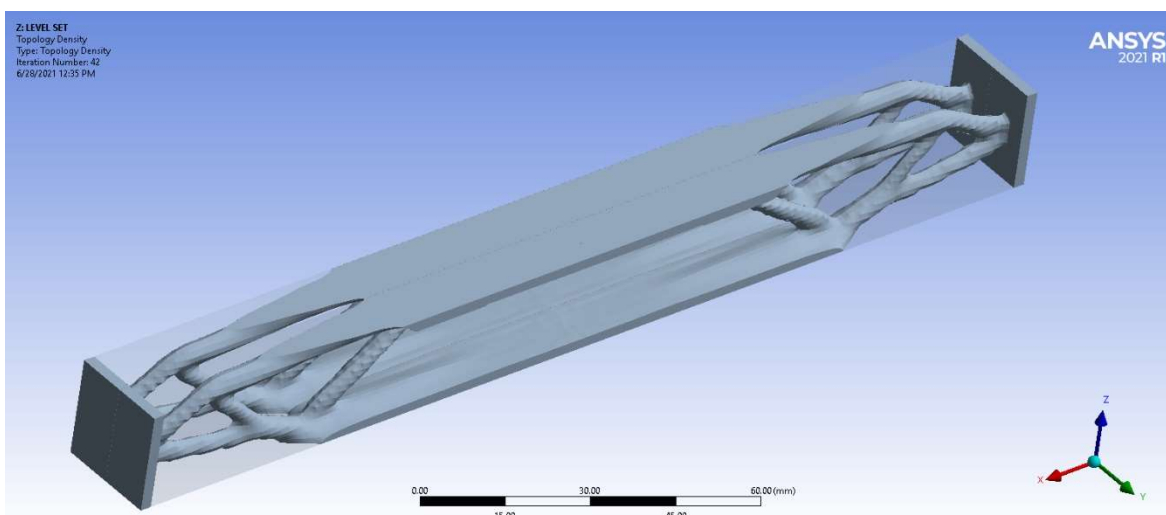
Obrázek 66. Deformace optimalizovaného nosíku, čtvrtina nosíku, rot, DB



Při porovnání optimalizace pomocí metody LEVEL SET zde máme opět dva naprosto rozdílné výsledky. Na Obrázek 67 je zobrazen výsledek optimalizace celého modelu. Opět lze vidět zachování vrchního a spodního vlákna, jako u předchozí metody. Na optimalizovaném tvaru je zajímavá jeho nesymetrie podle roviny YZ i přesto, že se jedná o symetrickou úlohu. Nesymetrické provedení může být způsobeno vlastnostmi iteračního procesu. Obrázek 68 představuje výsledek s využitím symetrie a řešením jen čtvrtinového modelu. Opět je zachováno vrchní a spodní vlákno. Dále je spojení s vazbou řešeno pomocí více tenčích struktur.



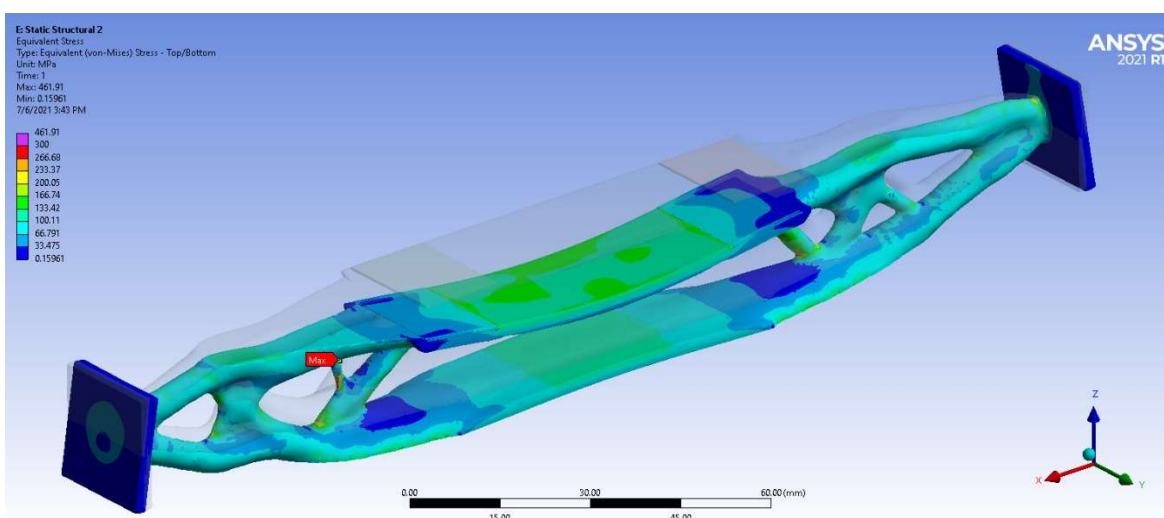
Obrázek 67. Optimalizovaný tvar celého nosníku, rot, LS



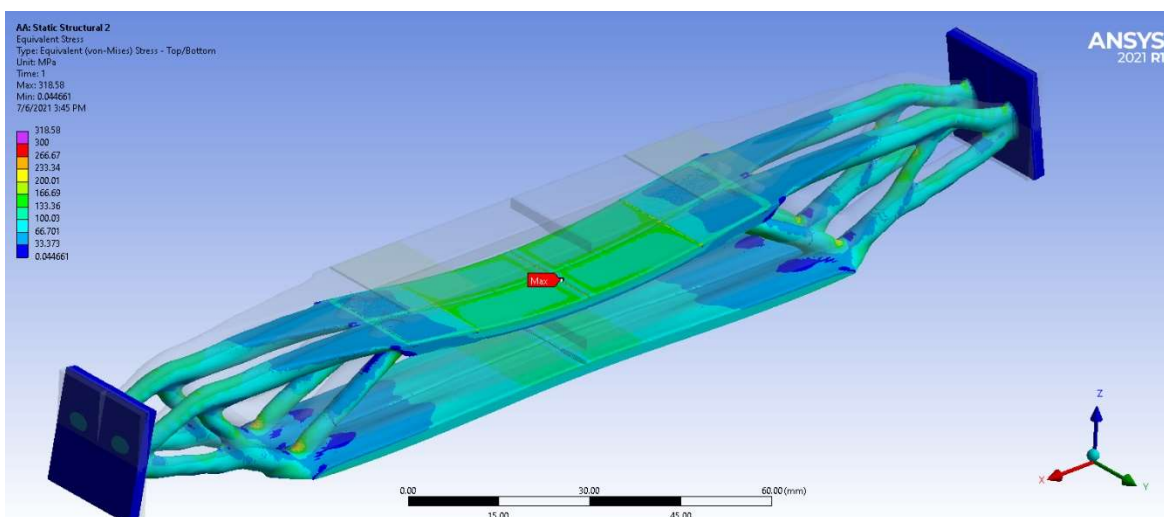
Obrázek 68. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, rot, LS



Na Obrázek 69 si lze povšimnout jaký je průběh napětí u nesymetricky řešených částí. V levé části nosníku se nachází úzká podpora, která vykazuje vyšší hodnoty napětí oproti druhé straně, kde je napětí rozloženo do více silnějších podpor. Na zatížené ploše se ve značné míře pohybujeme v hodnotách kolem 133 MPa a jsou i zde patrná značná místa s nízkým napětím. Maximální napětí je zde způsobeno nedokonalým síťováním modelu, v ostrém rohu o hodnotě 461 MPa. Při srovnání s Obrázek 70, kde je výsledek symetrický lze pozorovat rovnoměrnější napětí a méně míst s nízkým napětím. Ve střední části nosníku se pohybujeme opět v hodnotách okolo 133 MPa.



Obrázek 69. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, LS

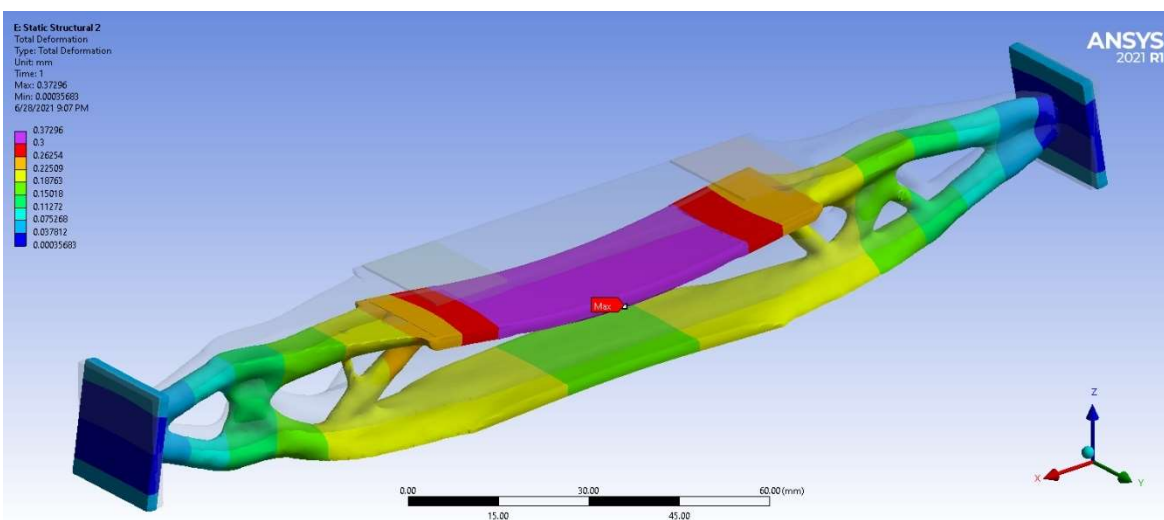


Obrázek 70. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, rot, LS

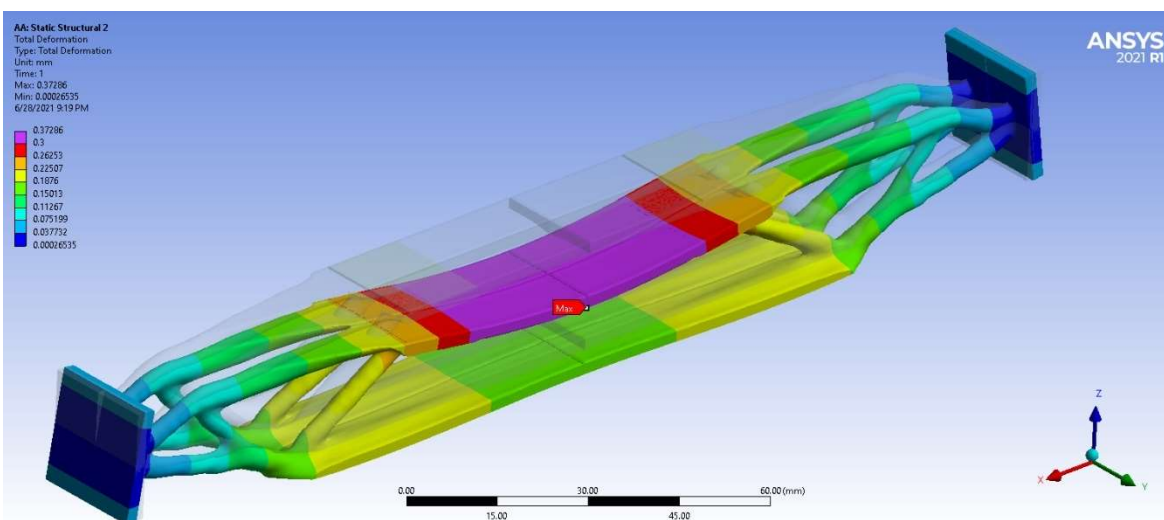


V porovnání deformace u jednotlivých metod řešení se opět setkáváme se shodnými výsledky. Oba nosníky vykazují maximální průhyb 0,37 mm ve střední části nosníku. Jediný rozdíl je zde z hlediska symetrie průhybu. Na Obrázek 71 je možné si povšimnout zvětšení průhybu v levé části nosníku. Oproti Obrázek 72, kde je deformace symetrická, vychází z použité symetrie.

Z tohoto srovnání vychází lépe nosník s využitím symetrie, především z hlediska rozložení napětí a symetrické deformace.



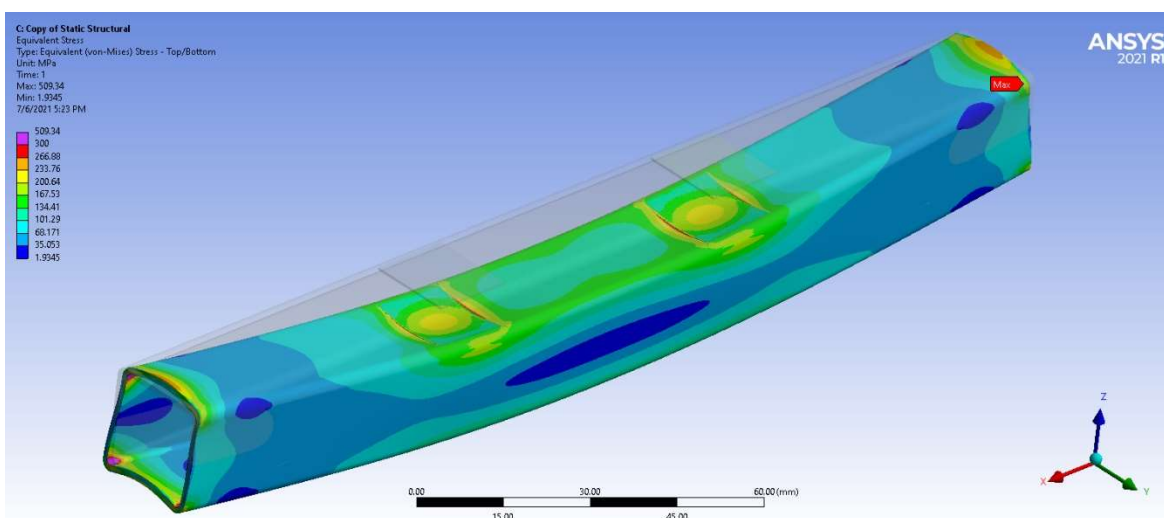
Obrázek 71. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, LS



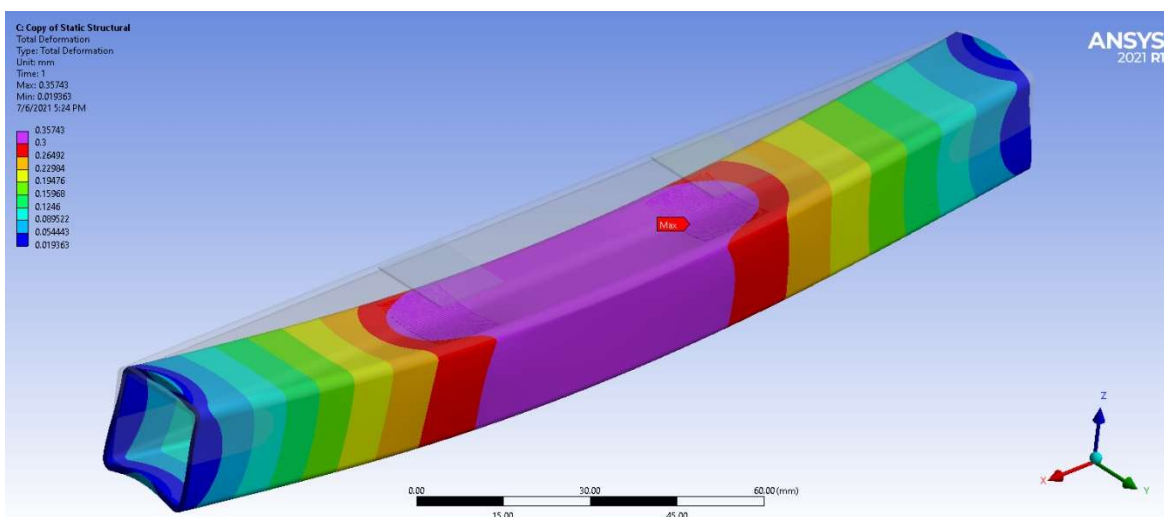
Obrázek 72. Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, rot, LS



Obrázek 73 a Obrázek 74 představuje možné řešení pomocí čtvercového dutého profilu. Na zobrazeném průběhu napětí si lze všimnout, velkého nárůstu napětí v oblasti zatížení, to je způsobeno tenkou stěnou profilu. Napětí zde dosahuje hodnot až 270 MPa, dále jsou patrné i vysoké koncentrace při ukotvení nosníku ve vazbě. Oproti optimalizovaným nosníkům je zde hůře rozložené napětí s velkým gradientem. Z hlediska deformace se pohybuje mezi použitými metodami optimalizací. Nosník vykazuje větší průhyb oproti metodě Density Based (cca 0,05 mm) a menší průhyb oproti metodě LEVEL SET (cca 0,02 mm). Maximální deformace je zde 0,35 mm.



Obrázek 73. Dutý nosník – napětí, rot



Obrázek 74. Dutý nosník – deformace, rot



8.4.3 Zhodnocení výsledku testu

Tímto testem byl zkoumán vliv použití symetrie pro optimalizaci topologie na symetrické úlohy. Jednotlivé optimalizace jsou hodnoceny z hlediska napětí a celkové deformace. U všech použitých metod se neprojevilo, že by jiný tvar nosníku, způsobený využitím symetrie, zásadně změnil průběh napětí a deformací v optimalizované struktuře. Například u metody Density Based s vetknutým nosníkem optimalizace součásti s využitím symetrie vykazovala lepší hodnoty než optimalizovaná součást bez využití symetrie, a to jak z hlediska napětí, tak i celkové deformace. Mezi optimalizovanými nosníky s použitím symetrie nebyly zpozorovány žádné velké rozdíly, které by byly důvodem nevyužívat tohoto zjednodušení.

Součástí testu bylo i porovnání s klasickým řešením pomocí dutého nosníku o stejné hmotnosti a tloušťce stěny 1,13 mm (*vychází z požadované hmotnosti*). Optimalizované nosníky vykazovaly rovnoměrnější rozložení napětí v materiálu a často i nižší maximální hodnotu. I z hlediska celkové deformace nosníky vykazovaly až na jeden případ (*Fix_DB*) nižší nebo velice podobné hodnoty. Výsledná data jsou shrnuta v Tabulka 6. U některých variant je maximální napětí způsobeno síťováním modelu a vytvořením ostrých přechodů, kde dochází ke koncentraci napětí.

Tabulka 6. Srovnání hodnot napětí a deformace

Název	Max napětí [MPa]	Max deformace [mm]
Fix_DB	206,4	0,170
Fix_DB_S	262,3	0,087
Fix_LS	267,76	0,118
Fix_LS_S	277,6	0,104
Fix_Č	295,2	0,136
Rot_DB	271,7	0,293
Rot_DB_S	522,1	0,3
Rot_LS	461,9	0,373
Rot_LS_S	318,6	0,373
Rot_Č	509,34	0,357

Rot – uložení s rotací

DB – Density Based

S – využití symetrie

Fix – fixní uložení

LS – LEVEL SET

Č – čtvercový profil

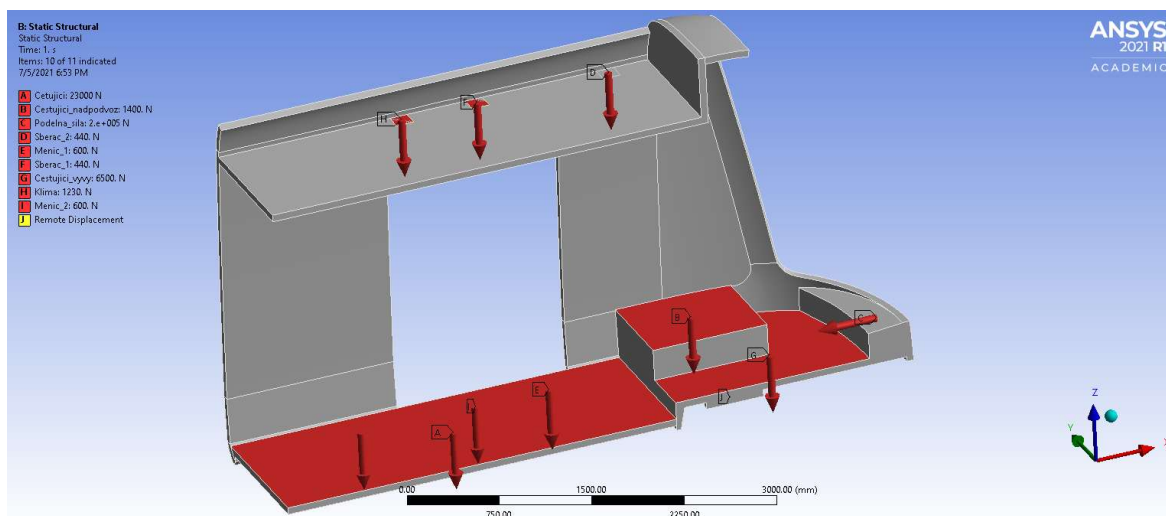


9 Optimalizace SATram

Všechny předchozí optimalizace jak na „Plechovce“ tak na testovacích modelech, vedly k aplikování optimalizace topologie na reálný koncept SATram. „Plechovka“ představovala pouze co nejjednodušší geometrii pro seznámení se s optimalizací. Při aplikaci na SATram se geometrie zásadním způsobem zesložituje a reprezentuje reálný uvažovaný design konceptu. Jsou uvažována prostorová omezení pro podvozky v podlaze vozidla a velká okna na předním a zadním čele SATram. Koncept SATram je představen v kapitole Výchozí koncept SATram.

9.1 Zátěžový stav 1

Zátěžový stav je zde upraven oproti stavu na Obrázek 23 nicméně filozofie zatížení je stejná. Působí zde zatížení od cestujících, elektrické výzbroje pod podlahou a eklektické výzbroje na střeše. Ta je mírně upravena. Jsou zanedbány CPU jednotky, protože nepředstavovaly významné zatížení cca 50 kg. Mimo klimatizace uprostřed vozidla se aplikovalo zatížení od dvou sběračů proudu, každého na jedné straně. Místo sběrače se dá případně umístit jiný komponent o stejné maximální hmotnosti. Tento stav zatížení zobrazuje Obrázek 75.

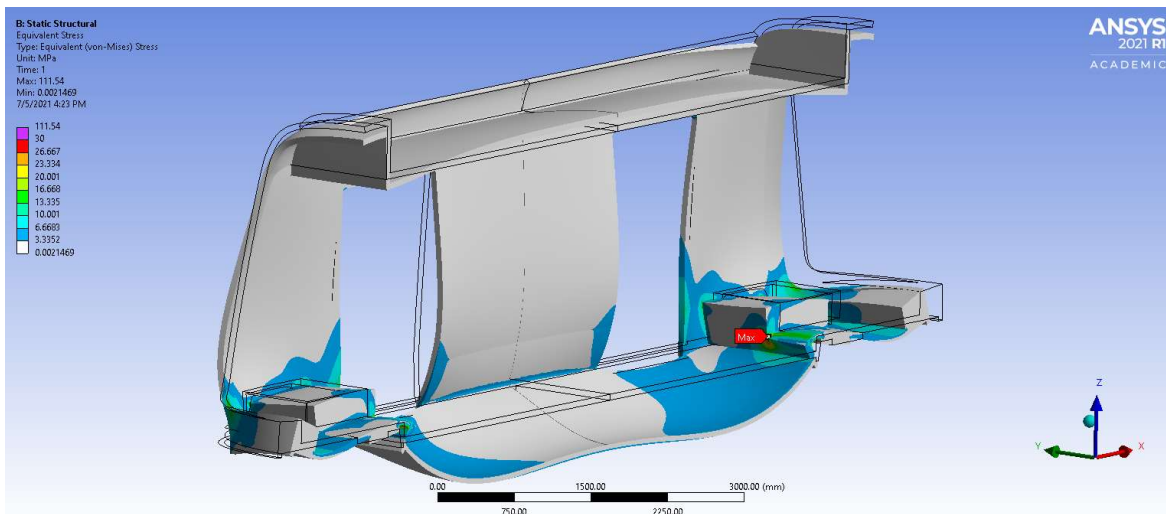


Obrázek 75. Zatížení článku tramvaje stav 1

Pro tento zátěžový stav lze použít zjednodušení pomocí symetrie, zatížení jsou zde jen ve směru osy X a Z. Na Obrázek 76 je zobrazena polovina modelu s průběhem napětí. Z obrázku je patrné zatížení především od cestujících a od podélné síly. Zatížení od cestujících počítá s obsazením 8 osob na metr čtvereční. V části s nízkou a vyvýšenou podlahou se uvažuje maximální obsazení bez prostoru pro sedící cestující. Na plochu nad podvozkem jsou uvažovány dva sedící lidé, tedy síla 1400 N. Bylo by vhodnější i zde aplikovat maximální zatížení, tedy počítat s osmi osobami. Maximální napětí je v oblasti ostrých přechodů podlahy okolo podvozků.



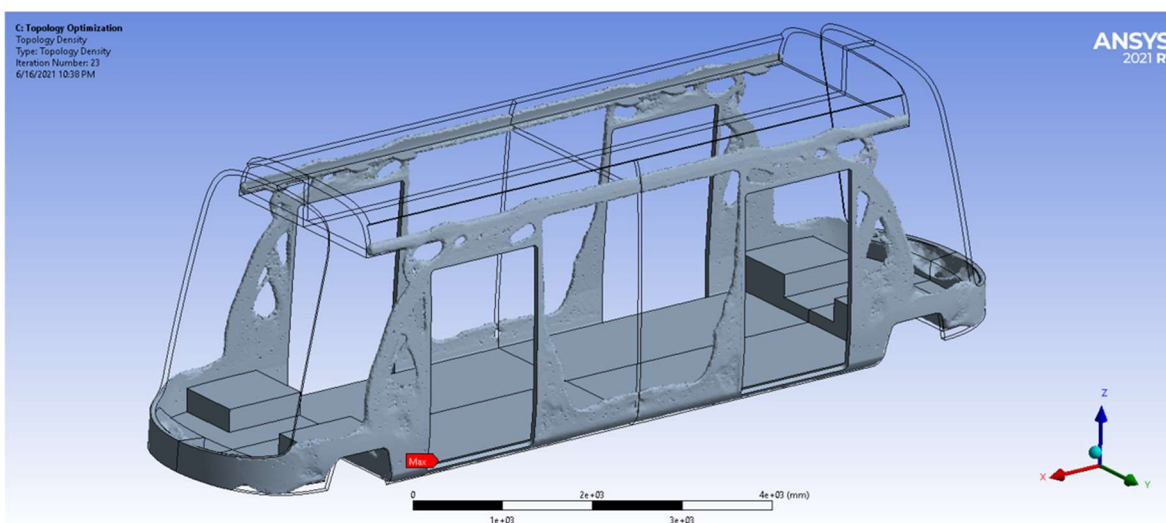
Tento zátěžový stav je zjednodušen pomocí symetrie, což umožňuje využití jemnější sítě pro optimalizaci. Je zde použita tetrahedrální síť o minimálním rozměru elementu 10 mm. V místech předpokládaného růstu napětí je síť lokálně zjemněna na minimální velikost elementu 2 mm. Celkový počet elementů pak činí 861416.



Obrázek 76. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí SATram_V2 stav 1

Optimalizovaná struktura na Obrázek 77 kopíruje zvýšené napětí především v oblasti podvozků při přechodu na bočnici. Při optimalizaci je využito několik vyloučených oblastí, jako jsou rámy dveří, boční vaznice a plochy spojující jednotlivé úrovně podlah.

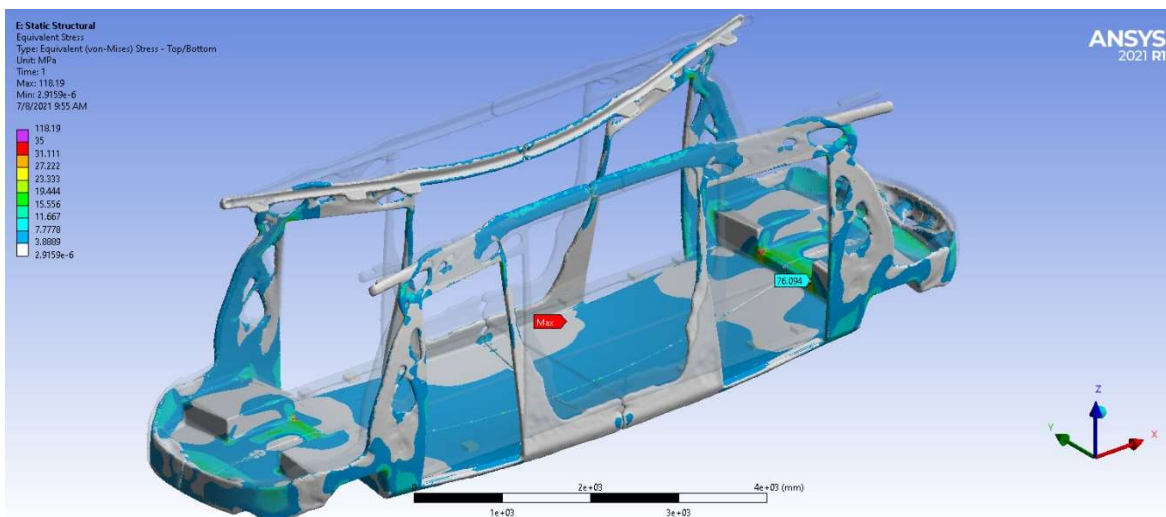
Cíl optimalizace byl maximalizovat tuhost skříně SATram. Byly aplikovány omezení maximálního napětí 200 MPa a hmotnostní omezení zachovat 25 až 50% původní hmotnosti. Celková doba optimalizace trvala 3 hodiny a 15 minut pro strukturu bez střešních příčniců a pro strukturu se střešními příčkami 2 hodiny a 40 minut. Příčnicové prvky jsou vynuceny vyloučenými regiony.



Obrázek 77. Optimalizovaná struktura SATram_V2 stav 1

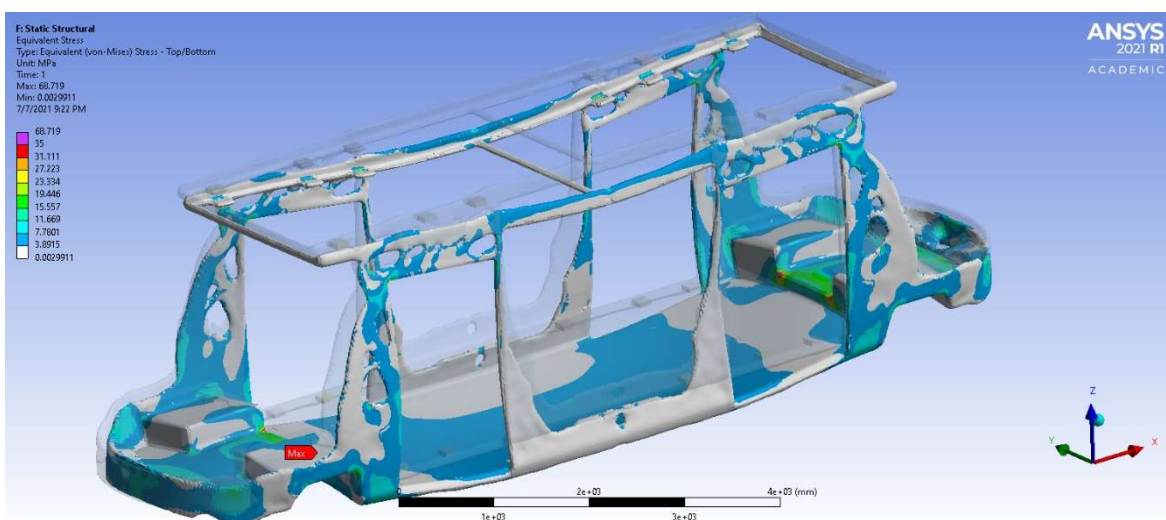


Na optimalizované struktuře si lze také všimnout absence propojení modelu v jeho vrchní části, tedy na střeše. Tato absence má za následek deformaci stěn modelu podle Obrázek 80 a Obrázek 78. Právě pro umístění dveří se předpokládá co nejužší rám s minimální deformací. Tato nespojitost se dá vyřešit pomocí vyloučených oblastí z optimalizace. V tomto případě se tím kladně ovlivní optimalizovaná struktura. Validace optimalizované struktury se střešními příčnicí je zobrazena na Obrázek 81 a lze si povšimnout zmenšení deformace. Vliv příčnicí je zde srovnán i z hlediska napětí a to na Obrázek 78 a Obrázek 79. Pro strukturu s příčnicí je viditelný značný pokles napětí a lepší rozložení napětí po vaznici.



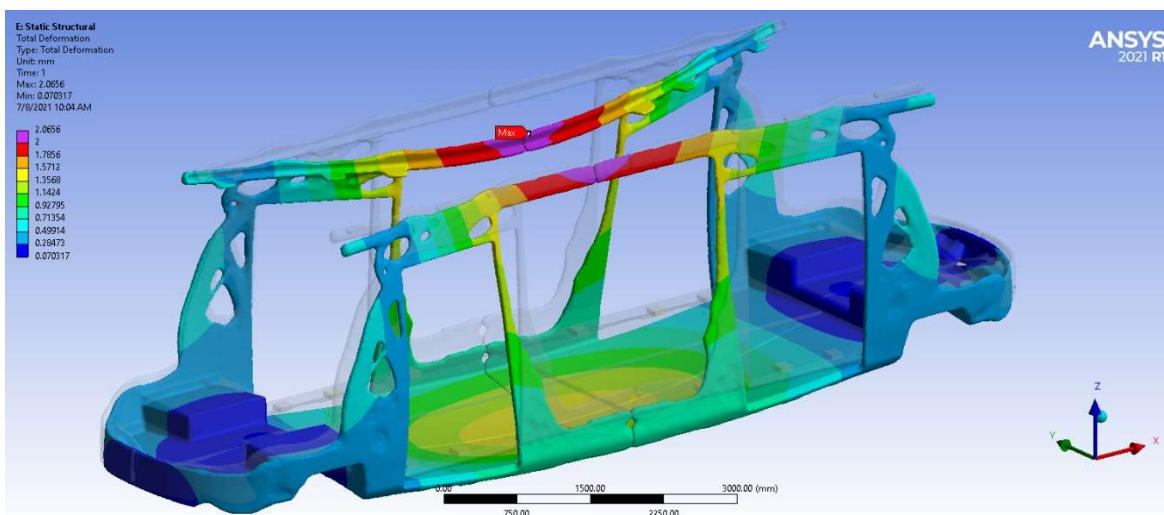
Obrázek 78. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1

Součástí přílohy je animace průběhu napětí na DVD – SATram_V2_stav_1

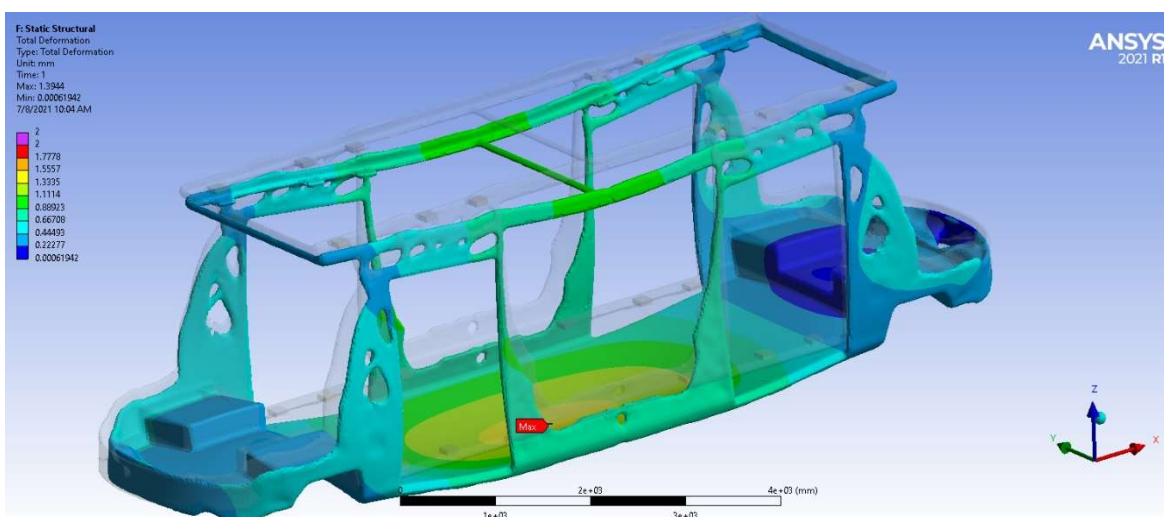


Obrázek 79. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1 s příčnicí

Součástí přílohy je animace průběhu napětí na DVD – SATram_V2_stav_1_pricniky



Obrázek 80. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1, deformace

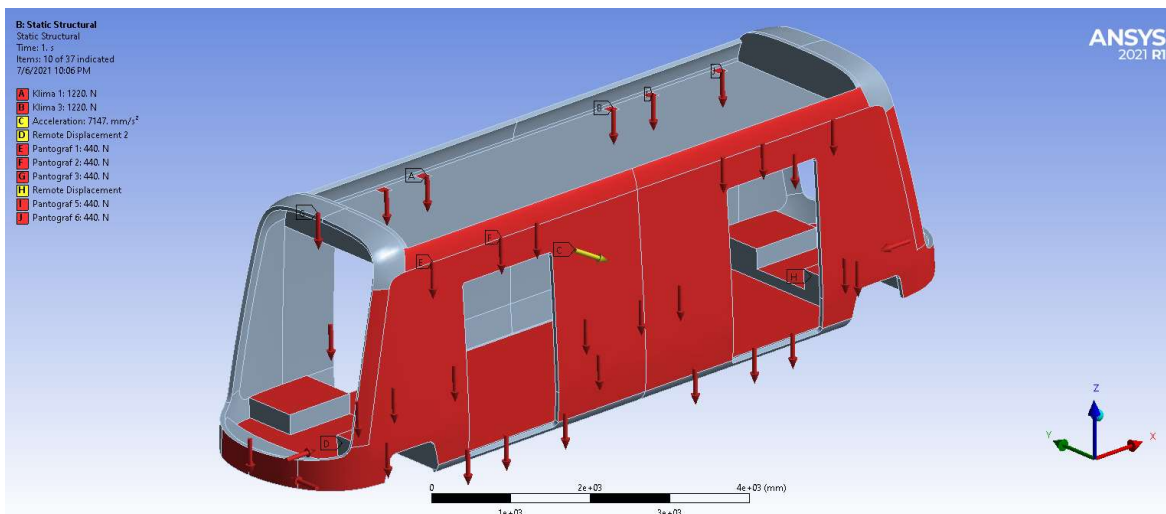


Obrázek 81. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1 s příčnicí, deformace



9.2 Zátěžový stav 2

Druhý zátěžový stav předpokládá jízdu přes křížení a výhybku, za předpokladu působení bočního větru. Na skříň vozidla působí stejné síly jako u zatěžovacího stavu 1, ke kterým je přidán tlak od bočního větru 600 Pa. Tlak je přepočítán na konkrétní sílu na plochu bočnice $20,5 \text{ m}^2$ a činí $12\,312 \text{ N}$. všechny síly jsou shrnuty v Tabulka 7. Dále jsou přidány dynamické složky, jsou shrnuty v Tabulka 8.



Obrázek 82. Zatížení článku tramvaje, zatěžovací stav 2

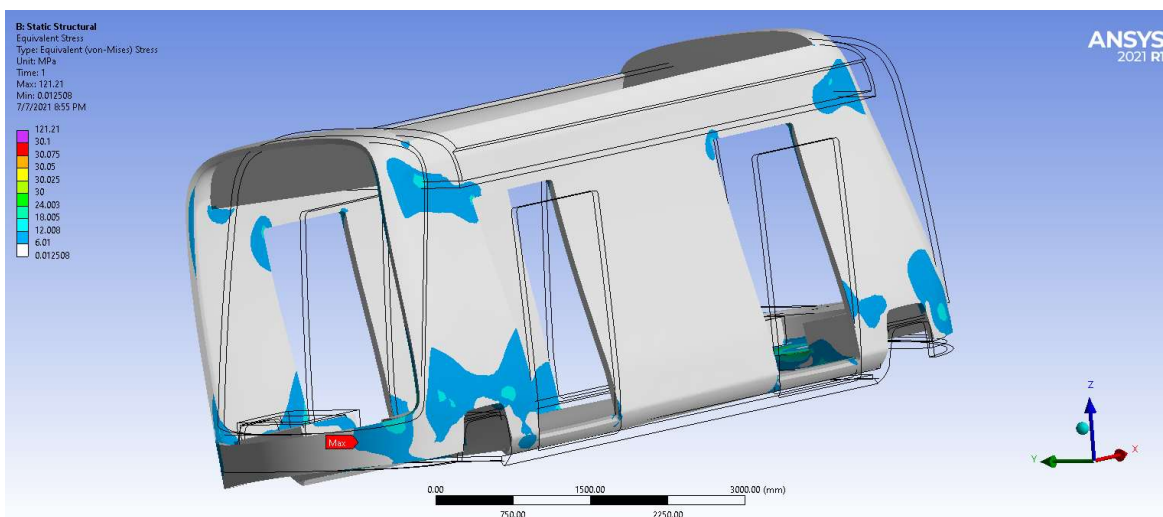
Tabulka 7. Statické zatížení

Klimatizace	1226 N	Baterie	2133 N
Pantograf	443 N	Cestující	$8 \text{ os}/\text{m}^2$
CPU jednotka	122 N	Nad podvozkem	1400 N
Podélná síla	400 kN	Boční vítr	12 312 N
Trakční měniče	596 N		

Tabulka 8. Dynamické zatížení

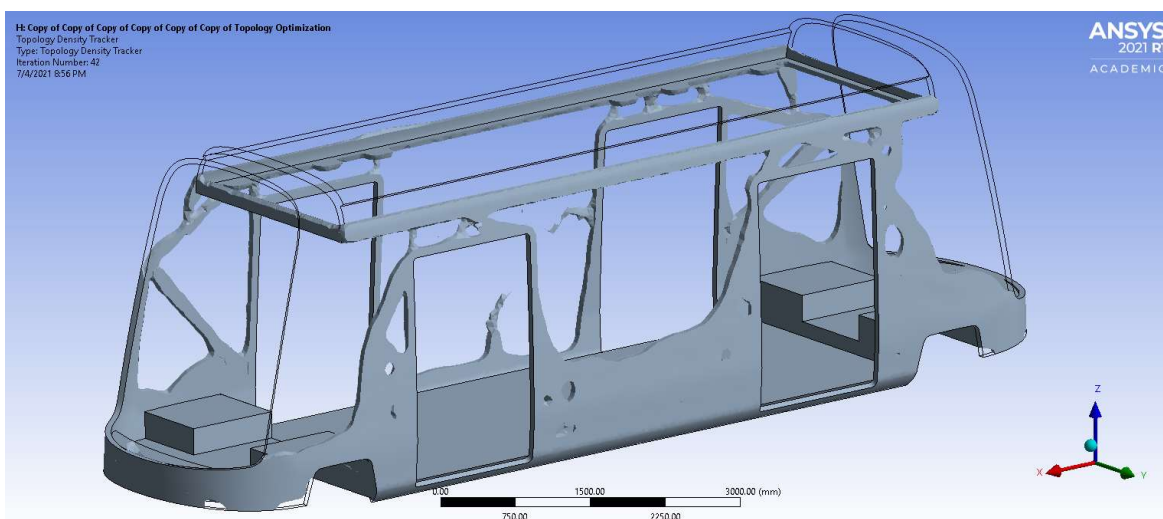
Směr X	$\pm 6 \text{ m}/\text{s}^2$
Směr Y	$\pm 2,2 \text{ m}/\text{s}^2$
Směr Z	$\pm 3,2 \text{ m}/\text{s}^2$

Obrázek 83 znázorňuje doformovaný stav. Hned na první pohled je zřejmá přítomnost příčného zatížení skříňe vozidla. Tento zátěžový stav se již nedá řešit pomocí symetrie a je zapotřebí řešit celý model v celku, což přináší opět jisté komplikace s velikostí elementů. V důsledku omezení hardwarem se minimální velikost elementu musela zvětšit na 30 mm. V místech předpokládaného nárůstu napětí, tedy rohy v přechodu podlahy do vyšší části, je síť lokálně zjemněna na minimální velikost elementu 5 mm. Celkový počet elementů činí 561 904. Maximální napětí v přechodu úrovně podlahy je 121 MPa.



Obrázek 83. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí SATram_V2 stav 2

Optimalizovaná struktura na Obrázek 84 se již liší od předchozích struktur. Jelikož u metody LEVEL SET nelze nastavit výrobní omezení požadující symetrii podle podélné osy má zde model každou bočnici jinou, z hlediska působení zatížení. Opět je aplikován cíl na maximalizování tuhosti skříně SATram. Jako omezení je uplatněno zachování hmotnosti mezi 50 a 55% původní hmotnosti. Nutno podotknout, že bylo spočítáno více optimalizací s různými omezeními a pro toto omezení konvergoval výpočet nejlépe a dostal se na hodnotu 54,86% původní hmotnosti.

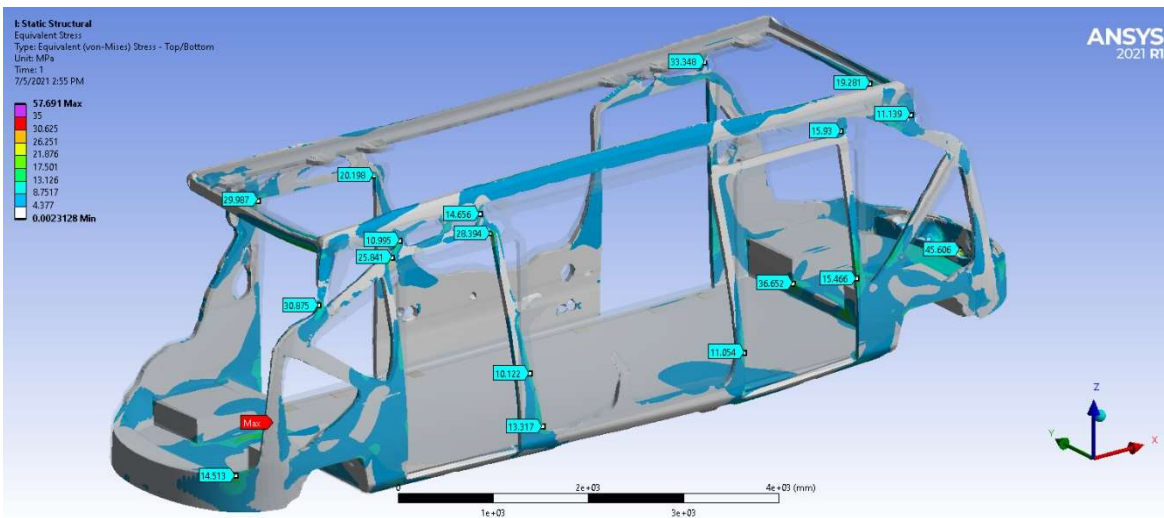


Obrázek 84. Optimalizovaná struktura SATram_V2 stav 2

Na znovu spočítaném optimalizovaném modelu zobrazeném na Obrázek 85 lze pozorovat již poměrně velké procento využitého materiálu z hlediska napětí. Na jednotlivých částech modelu, jsou zobrazeny konkrétní hodnoty napětí. Pomocí těchto hodnot napětí lze vyhodnotit která z bočnic modelu vyhovuje více a tu použít. Nicméně po této optimalizaci

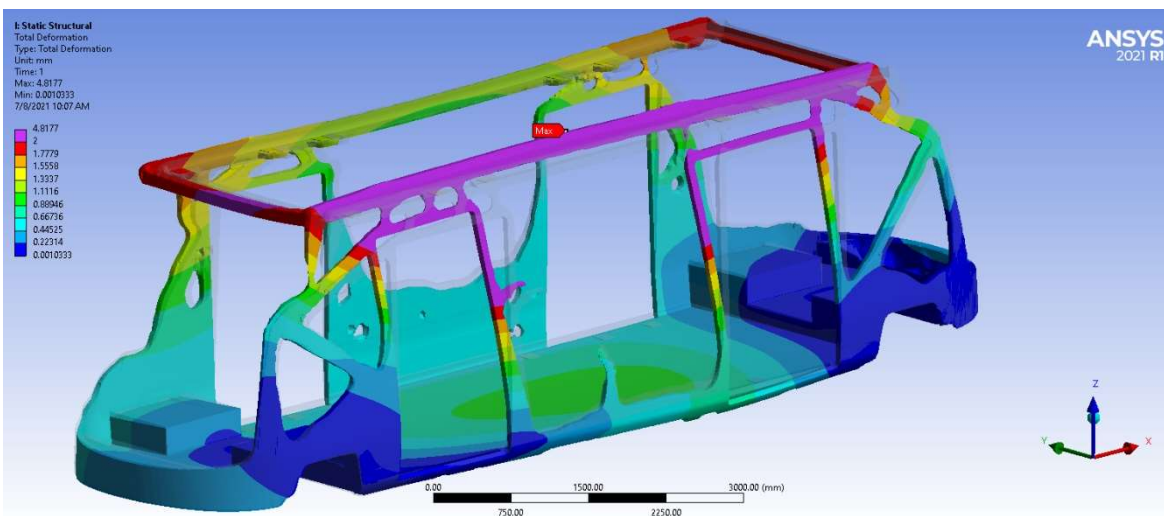


je stále velký prostor k odlehčení celé hrubé stavby. Za povšimnutí také stojí velký otvor ve středu modelu i při působení příčných sil.



Obrázek 85. Validace optimalizované struktury, SATram_V2 stav 2, napětí

Pro úplnost je na následujícím Obrázek 86 zobrazena deformace optimalizované struktury. Deformace dosahují v maximální míře 4,81 mm v oblasti vaznice. Jedná se o poměrně vysokou hodnotu, která by způsobovala komplikace. Nabízené řešení je přidání příčnicku do oblasti středu střechy a tím snížit deformaci.



Obrázek 86. Validace optimalizované struktury, SATram_V2 stav 2, deformace

S použitím vyloučených oblastí optimalizace je zajištěna spojitost modelu a vliv větších elementů zde nepřináší zásadní komplikace.

Další předpokládané kroky optimalizace budou podrobně probrány v následující kapitole.

Součástí přílohy je animace průběhu napětí na DVD – SATram_V2_stav_2



10 Metodika pro optimalizaci topologie

Ze získaných zkušeností s používaným softwarem ANSYS 2021 R1 a zkušeností z optimalizací předešlých modelů, vyplívá následné doporučení, jak posupovat při optimalizaci takto složitých struktur.

- 1) V první řadě je nutné si uvědomit jakou součást chceme optimalizovat a podle toho zvolit vhodný software. Pro optimalizaci jednodušší součástí by stačilo například Creo 6.0. V případě složitějších struktur, například jako je koncept SATram je třeba zvolit sofistikovanější software. Pro tento účel se velice vhodně osvědčil ANSYS. Je zapotřebí také zhodnotit dostupné hardwarové prostředky pro výpočet. Jako jsou velikosti paměti RAM a dostupnost volného místa na disku, také záleží na grafické kartě.
- 2) Následně je nutné si zvolit zátěžový stav, nebo stavy na které se bude produkt optimalizovat. V případě jasného namáhání stačí provést optimalizaci na nejhorší možný stav. V případě, kdy je produkt zatěžován různými variantami zatížení je zapotřebí vytipovat nejhorší možné scénáře a pro ty provést optimalizace.
- 3) Dalším krokem je zvolení metody, jak v první řadě model počítat. Z hlediska velikosti modelu SATram je vhodné v prvním kole optimalizace využít shellových prvků, pokud je toto zjednodušení možné (*dostupné pro metodu Density Based*). Tato možnost velice snižuje počet elementů při síťování a snižuje výpočetní čas. Je vhodné zde nastavit nízký úběr materiálu, kde metoda odebere pouze ten nejméně využitý. Pro další použití se tím sníží objem pro optimalizaci a tím i počet elementů a požadované nároky na hardware.
- 4) Následně je nutná úprava vstupního objemu pro optimalizaci podle výsledku předešlého kroku. Ideální je používat co nejjednodušší geometrická tělesa jako definování objemu optimalizace. Využívání jednodušších geometrických těles napomáhá k vytvoření stejnorodé sítě a následně k lepšímu výsledku optimalizace.
- 5) Dalším krokem je příprava solidového modelu pro optimalizaci. Tato optimalizace naznačí hlavní toky napětí produktem a tím optimální topologii.
 - a. Důležitou součástí přípravy je nastavení konečnoprvkové sítě, tento krok má značný dopad na výslednou strukturu a je třeba mu věnovat zvýšenou pozornost. Je nutné dbát na dostatečný počet elementů po tloušťce stěny a také na dostatečně malé elementy při spojování méně významných zatížení. Při použití velkých elementů parametr hustoty elementu klesá což má za následek odstranění elementu a tím způsobení nespojitost modelu.



- b. Dalším důležitým bodem je nastavení samotné metody optimalizace topologie, jejích cílů a omezení. V tomto případě na základě zkušeností doporučuji vyzkoušet širší škálu omezení a zjistit pro která omezení výpočet konverguje a je řešitelný. Většina výpočtů byla provedena pomocí metody LEVEL SET a ne pro všechny kombinace omezení konvergovala.
- 6) V tomto kroku je zapotřebí provést srovnání optimalizovaných struktur z jednotlivých zatížení. Vytvořením průniku jednotlivých výsledků pak vzniká konečné vodítko pro využití materiálu. Výsledný průnik je nutné ověřit všemi použitými zátěžovými stavy, zda vyhovuje. V případě kladného výsledku ověření dostáváme strukturu, která stále nedosahuje nižší hmotnosti oproti stávajícím řešením. Je tedy za potřebí pokračovat v optimalizaci.
 - 7) V tomto kroku se na základě výsledné struktury vytvoří souřadnicový model s polohami styčnicků. Jednotlivé styčnický se propojí beamovými elementy. Tím vznikne konstrukce z jednotlivých profilů jako se používá na současných vozidlech. Je zapotřebí věnovat velkou pozornost umístování styčnicků, aby došlo k rozložení případných koncentrací napětí do více bodů.
 - 8) Následně se provede parametrická optimalizace. Zde musíme opět uvažovat všechny vytipované zátěžné stavy. Jako optimalizovaný parametr lze použít průřez beamového prvku.
 - 9) Průnikem výsledků všech zátěžových stavů vznikne návrh hrubé stavby skříně vozidla. Tento výsledek je opět třeba ověřit pro všechny definované zátěžné stavy. Pokud ověření splní všechna očekávání, měli bychom dostat hrubou stavbu s optimálním rozložením topologie.
 - 10) Tímto postupem se dostaneme k optimalizované hrubé stavbě skříně vozidla.

Postupy v bodech 6 až 10 nejsou zpracovány v této práci a jedná se o možný způsob pokračování a dosažení optimální topologie hrubé stavby skříně vozidla.



11 Závěr

V této práci je zpracována obecná problematika optimalizace topologie, v teoretické rovině na základě nejjednodušších příkladů a metod optimalizace a následně v praktické za pomoci využití několika softwarů. Pro výběr použitých software byla zpracována rozsáhlá rešerše, která zmapovala dostupná prostředí pro praktické využití optimalizace topologie. Díky možnosti využití studentských licencí lze získat přístup k některým plným verzím softwaru, které umožňují optimalizace topologie až v té nejvyšší verzi licence. Pro aplikování zkušební model optimalizace byly na základě rešerše vybrány čtyři software, Autodesk Inventor 2019, ANSYS 2021 R1, Creo 6.0 a Solid Works 2019. V těchto softwarech bylo zapotřebí se seznámit s uživatelským rozhraním, ovládáním a naučit se využívat nástroje pro optimalizace topologie. Následně tyto nabyté zkušenosti byly využity a aplikovány na zkušební model konzoly. S přihlédnutím na uživatelské prostředí, možnosti nastavení optimalizace a dostupnosti licence byl vybrán pro další optimalizace software ANSYS 2021 R1. V tomto software bylo zapotřebí v rozsáhlé míře si osvojit používání nástroje pro optimalizace topologie a úspěšně je aplikovat na modely skříně SATram.

Při řešení modelů SATram o rozměrech jednotek metrů se objevily komplikace s množstvím elementů, respektive dostatkem paměti RAM a bylo za potřebí řešit snížení počtu elementů za pomoci jejich zvětšení, anebo využitím symetrie. V práci jsou ověřeny tyto postupy z hlediska vlivu na optimalizaci topologie.

Hlavním přínosem této práce je nahlédnutí do rozsáhlého světa optimalizací, seznámení se a výběr vhodného softwaru pro jejich aplikaci. Dále získání velkého množství zkušeností s používaným softwarem ANSYS 2021 R1, jak pro optimalizace topologie, tak pro pevnostní výpočty. Vzhledem k časové náročnosti učení se se softwaru a řešení řady počátečních komplikací s optimalizacemi se nepodařilo dokončit optimalizaci hrubé stavby skříně vozidla SATram do vyrobitelné podoby. Nicméně v souvislosti s řešením zadání DP byla získána řada zkušeností s optimalizacemi a navržena metodika pro využití topologické optimalizace v návrhu hrubé stavby skříně lehkého tramvajového vozu s inovativní konstrukcí. V práci jsou popsány a zobrazeny optimalizované struktury SATram pro dva zátěžové stavy, pro kompletní návrh je zapotřebí uvažovat všechny zátěžové stavy dané příslušnými normami. Zde bylo vycházeno ze zadání pro pevnostní výpočet hrubé stavby tramvaje 39T ze Škody Transportation

Pro optimalizace topologie je nezbytné využívat hardware s odpovídajícím výkonem. Veškeré optimalizace byly prováděny na školním počítači o základních parametrech: velikost paměti RAM 32 GB, Grafické kartě NVIDIA Quadro P2000 a procesorem Intel® Core™ i5-8600. Z hlediska tohoto hardware, byly optimalizace topologie omezeny na cca 1 300 000 elementů sítě, poté docházelo k vyčerpání paměti RAM. Pro dílčí



optimalizace topologie, které sloužili k seznámení a ověřování funkcionalit softwaru je tato konfigurace dostačující, nicméně pro optimalizaci struktur o rozměrech několika metrů by bylo vhodnější využití výpočetních serverů s větší kapacitou.

Z hlediska velkého objemu dat nejsou archivy projektů optimalizací součástí přílohy.



12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Sagrada Família Barcelona (1882 začátek stavby).....	1
Obrázek 2. Topologicky ekvivalentní tělesa [2]	2
Obrázek 3. Příklad tří strukturálních optimalizací konstrukčního návrhu. (a) Optimalizace dimenze prutové struktury, (b) Optimalizace tvaru, (c) Optimalizace topologie. Na levé polovině jsou naznačeny výchozí konstrukce a na pravé jsou naznačeny optimalizované konstrukce. [4]	3
Obrázek 4. (a) diagram pro výpočet úlohy, (b) optimální řešení úlohy, (c) optimalizovaná konfigurace vytvořená řetěžením základního modulu, (d) Forth Birdge, postavený v letech 1883-1890 jako příklad optimalizované topologie [5].....	4
Obrázek 5. Příklad představující 1ISE-topologii: (a) návrhová oblast pokrytá MKP sítí, (b) nepřipustné řešení, (c) optimální řešení, (d–f) přípustná řešení, nikoli optimální [6]	6
Obrázek 6 příklad ASE-topologie [6]	7
Obrázek 7. Příklad ISEP-topologie [6]	8
Obrázek 8. Tuhost (s) parametr hustoty (ρ) pro různé mikrostruktury [7]	10
Obrázek 9. Optimalizační prostor	12
Obrázek 10. Zkušební konzola	15
Obrázek 11. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Ansys Mechanical	17
Obrázek 12. Základní informace o výsledku optimalizace topologie	17
Obrázek 13. Schéma projektu v prostředí Ansys Workbench	18
Obrázek 14. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Autodesk Inventor.	19
Obrázek 15. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole v Creo 6.0.....	20
Obrázek 16. Zobrazení parametru hustoty elementů	21
Obrázek 17. Optimalizovaný tvar zkoušené konzole SolidWorks.....	22
Obrázek 18. Umístění elektrovýzbroje v konceptu SATram [12].....	26
Obrázek 19. Grafické zobrazení konceptu SATram [ŠT]	27
Obrázek 20. Zatížení modelu Plechovka_V1.4.....	28
Obrázek 21. Optimalizace modelu „Plechovka_V1.4“ Metoda LEVEL SET	29
Obrázek 22. Optimalizace modelu „Plechovka_V1.3“ metoda Density Based.....	29
Obrázek 23. Zátěžový stav 1	30
Obrázek 24. Zobrazení zatížení v ANSYSU Plechovka_V2.....	31
Obrázek 25. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V2.....	31
Obrázek 26. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET Plechovka_V2_2_A.....	32
Obrázek 27. Optimalizovaný tvar pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET – rozpad Plechovka_V2_2_B33	
Obrázek 28. Působení sil na pokusný kvádr	33
Obrázek 29. Optimalizovaný kvádr, síť 5 mm LEVEL SET	34
Obrázek 30. Optimalizovaný kvádr, síť 1mm LEVEL SET	35
Obrázek 31. Zobrazení zatížení v ANSYSU Plechovka_V3.....	36
Obrázek 32. Detail síťování.....	36
Obrázek 33. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V3.....	37
Obrázek 34. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda LEVEL SET Plechovka_V3.....	38
Obrázek 35. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V4.....	38
Obrázek 36. Optimalizovaný model pro zátěžový stav 1, metoda Density Based Plechovka_V4	39
Obrázek 37. Validace optimalizovaného modelu Plechovky_V4.....	39
Obrázek 38. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí Plechovka_V5.....	40
Obrázek 39. Čtvrtinový optimalizovaný model pro zátěžový stav 1 Density Based Plechovka_V5.....	41
Obrázek 40. Detail optimalizovaného modelu Plechovka_V5.....	41
Obrázek 41. Úloha zatíženého nosníku	42
Obrázek 42. Umístění centrálního osového kříže.....	43
Obrázek 43. Nosník fixní vazby, napětí.....	44
Obrázek 44. Nosník fixní vazby, deformace.....	44
Obrázek 45. Optimalizovaný tvar celého nosníku, fix, DB	45
Obrázek 46. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, fix, DB.....	45



Obrázek 47. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, DB.....	46
Obrázek 48. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosíku, fix, DB.....	46
Obrázek 49. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, DB.....	47
Obrázek 50. Deformace optimalizovaného nosíku, čtvrtina nosníku, fix, DB.....	47
Obrázek 51. Optimalizovaný tvar celého nosníku, fix, LS	48
Obrázek 52. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, fix, LS.....	48
Obrázek 53. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, LS.....	49
Obrázek 54. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, fix, LS.....	49
Obrázek 55. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, fix, LS.....	50
Obrázek 56 Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, fix, LS.....	50
Obrázek 57. Dutý nosník – napětí, fix.....	51
Obrázek 58 Dutý nosník – deformace, fix.....	51
Obrázek 59. Nosník rotační vazby, napětí	52
Obrázek 60. Nosník rotační vazby, deformace	52
Obrázek 61. Optimalizovaný tvar celého nosníku, rot, DB	53
Obrázek 62. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, rot, DB.....	53
Obrázek 63. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník DB	54
Obrázek 64. Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku DB	54
Obrázek 65. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, DB.....	55
Obrázek 66. Deformace optimalizovaného nosíku, čtvrtina nosníku, rot, DB.....	55
Obrázek 67. Optimalizovaný tvar celého nosníku, rot, LS	56
Obrázek 68. Optimalizovaný tvar čtvrtky nosníku, rot, LS.....	56
Obrázek 69. Napětí optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, LS.....	57
Obrázek 70. Napětí optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, rot, LS.....	57
Obrázek 71. Deformace optimalizovaného nosníku, celý nosník, rot, LS.....	58
Obrázek 72. Deformace optimalizovaného nosníku, čtvrtina nosníku, rot, LS.....	58
Obrázek 73. Dutý nosník – napětí, rot.....	59
Obrázek 74. Dutý nosník – deformace, rot.....	59
Obrázek 75. Zatížení článku tramvaje stav 1	61
Obrázek 76. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí SATram_V2 stav 1	62
Obrázek 77. Optimalizovaná struktura SATram_V2 stav 1.....	62
Obrázek 78. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1.....	63
Obrázek 79. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1 s příčnický.....	63
Obrázek 80. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1, deformace	64
Obrázek 81. Validace optimalizované struktury SATram_V2 stav 1 s příčnický, deformace	64
Obrázek 82. Zatížení článku tramvaje, zatěžovací stav 2.....	65
Obrázek 83. Deformovaný tvar modelu zobrazující napětí SATram_V2 stav 2	66
Obrázek 84. Optimalizovaná struktura SATram_V2 stav 2.....	66
Obrázek 85. Validace optimalizované struktury, SATram_V2 stav 2, napětí.....	67
Obrázek 86. Validace optimalizované struktury, SATram_V2 stav 2, deformace	67



13 Seznam tabulek

Tabulka 1. Přehled metod řešení zobecněné optimalizace tvaru (GSO) [7]	9
Tabulka 2. Softwary a moduly pro optimalizaci topologie	13
Tabulka 3. Srovnání optimalizované hmotnosti. Původní hmotnost 5,47 kg	22
Tabulka 4. Souhrn hmotností elektrické výzbroje	26
Tabulka 5. Shrnutí zatížení v zátěžovém stavu 1	30
Tabulka 6. Srovnání hodnot napětí a deformace	60
Tabulka 7. Statické zatížení.....	65
Tabulka 8. Dynamické zatížení.....	65



14 Citovaná literatura

- [1] [Online]. Available: <https://www.solidworks.cz/solidworks-3d-cad>. [Přístup získán 27 06 2021].
- [2] „Wikipedie,“ 16 10 2018. [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Topologie>. [Přístup získán 08 06 2021].
- [3] „Slovník cizých slov,“ [Online]. Available: <http://www.slovník-cizich-slov.net/topologie/>. [Přístup získán 11 07 2021].
- [4] O. S. Martin Philip Bendsoe, *Topology Optimization : Theory, Methods, and Applications*, Berlin: PTP-Berlin Protago-TeX-Production GmbH, 2003.
- [5] M. Lepš, „Single and Multi-Objective Optimization in Civil Engineering,“ Praha, 2004.
- [6] T. Mareš, *Základy konstrukční optimalizace*, Praha: Vlastním nákladem, 2006.
- [7] G. Rozvany, „Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. Structural and,“ č. 90-108, 2001.
- [8] M. X. Y. Z. L. G. Y. L. Xin Gui, „ATLANTIS PRESS,“ Springer Nature, [Online]. Available: <https://www.atlantispress.com/proceedings/iccia-17/25880301>. [Přístup získán 12 07 2021].
- [9] Ansys, [Online]. Available: [ansys.com](https://www.ansys.com). [Přístup získán 20 06 2021].
- [10] „PTC,“ [Online]. Available: www.ptc.com. [Přístup získán 27 6 2021].
- [11] „Ansys,“ ANSYS, [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/wb_msh/msh_book_wb.html. [Přístup získán 11 07 2021].
- [12] B. M. Dynybyl, *Studie proveditelnosti autonomního tramvajového vozidla s dvounápravovým pojezdem*, Praha: Fakulta Strojní ČVUT, 2020.