

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh tří a pěti článkového nízkopodlažního tramvajového vozidla ve více variantách.

Autor: **Bc. Marek Havlín**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Petr HELLER, CSc.**

Akademický rok 2014/2015



## Prohlášení o autorství

**Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.**

**Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.**

V Plzni dne: .....

.....  
**podpis autora**

**ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE**

<b>AUTOR</b>	<b>Havlín</b>	<b>Marek</b>	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	23-35-8 „Dopravní a manipulační technika“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Heller,CSc.	<b>Jméno</b> Petr	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh tří a pěti článkového nízkopodlažního tramvajového vozidla ve více variantách.		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>		<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	55	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	8
---------------	--	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Diplomová práce obsahuje návrh a pevnostní analýzu hrubé stavby skříně tramvajového pětičlánkového vozidla pro trať s relativně velkými poloměry oblouků a malými sklony stoupání a klesání.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	tramvajová vozidla, hrubá stavba skříně, články, rozbor možností, pevnostní analýza, CAD, CAE, počítačová simulace

**SUMMARY OF DIPLOMA SHEET**

<b>AUTHOR</b>	<b>Havlín</b>	<b>Marek</b>	
<b>FIELD OF STUDY</b>	23-35-8 "Transport vehicle and handling machinery"		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Heller,CSc.	<b>Name</b> Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of three and five-unit low-floor tram vehicle in more versions.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

**NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)**

<b>TOTALLY</b>		<b>TEXT PART</b>	55	<b>GRAPHICAL PART</b>	8
----------------	--	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	This thesis dissert on design and strenght analysis of structural construction of five-unit tram vehicle designe to track that includes relatively high radius of rail archs and low slope deviation.
<b>KEY WORDS</b>	tram vehicles, structural tram units design, analysis of options, strenght analysis, CAD, CAE, computer simulation

## Obsah

I. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
1 Úvod.....	9
2 Rozbor možností řešení vozidla, vytvoření variant.....	10
2.1 Nízká podlaha .....	10
2.2 Tramvajová vozidla kloubová .....	11
2.2.1 Tramvajová vozidla kloubová, vysokopodlažní, s podvozkem Jakobs .....	11
2.2.2 Tramvajová vozidla kloubová, s kloubem mimo podvozek .....	12
2.2.3 Tramvajová vozidla kloubová, vysokopodlažní, se dvěma klouby.....	12
2.3 Tramvajová vozidla článková, nízkopodlažní, se zvýšenou kapacitou .....	13
2.4 Koncepce vybraných článkových tří a pětičlánkových nízkopodlažních tramvajových vozidel a jejich vlastnosti .....	13
2.4.1 Tříčlánková čtyřnápravová tramvaj .....	14
2.4.2 Tříčlánková šesti nápravová tramvaj se dvěma delšími krajními články.....	15
2.4.3 Tříčlánková tramvaj se čtyřmi otočnými podvozky.....	17
2.4.4 Pětičlánková tramvaj se třemi neotočnými podvozky (70% a 100% nízké podlahy).....	18
2.4.5 Pětičlánková tramvaj se čtyřmi podvozky.....	20
2.4.6 Tříčlánková tramvaj se dvěma krajními články na otočných podvozcích .....	22
2.4.7 Tříčlánková tramvaj se třemi neotočnými podvozky pod každým článkem.....	23
2.4.8 Tříčlánková tramvaj se dvěma otočnými podvozky pod čelem a dvěma otočnými podvozky pod kloubovým spojením článků .....	24
3 Rozhodnutí o zvolené variantě .....	26
3.1 Metoda výběru varianty .....	26
3.2 Určení varianty .....	26
4 Návrh hrubé stavby skříně.....	29
4.1 Střední článek .....	29
4.1.1 Podlaha středního článku .....	30
4.1.2 Bočnice středního článku .....	31
4.1.3 Čelnice středního článku .....	31
4.1.4 Střecha středního článku .....	32
4.2 Zavěšený článek .....	33
4.2.1 Podlaha zavěšeného článku .....	34

Katedra konstruování strojů

Marek Havlín

4.2.2	Bočnice zavěšeného článku.....	35
4.2.3	Čelnice zavěšeného článku.....	36
4.2.4	Střecha zavěšeného článku.....	39
5	Pevnostní výpočet .....	41
5.1	Počáteční podmínky výpočtu.....	41
5.2	Příprava modelu.....	42
5.3	Výsledky analýzy pomocí MKP - deformace.....	45
5.4	Výsledky analýzy pomocí MKP- napětí.....	48
5.5	Návrhy úprav na základě výsledků.....	50
5.6	Přepočítaný model se zahrnutými úpravami .....	52
6	Závěr.....	55
II. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		56
III. SEZNAM PŘÍLOH.....		57

## II. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$F_y$	[N]	.....	svislé statické zatížení skříně vozidla
$F_x$	[N]	.....	podélné statické zatížení skříně vozidla
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	.....	gravitační zrychlení
$m_1$	[kg]	.....	hmotnost skříně vozidla v pohotovostním stavu
$m_2$	[kg]	.....	maximální hmotnost nákladu



## 1 Úvod

Tato práce se zabývá vytvořením konceptu tramvajového vozidla pro zadané počáteční podmínky a následným návrhem konstrukce tramvajové skříně včetně pevnostní analýzy její vybrané části. Pro tyto účely budou nejdříve zhodnoceny již používané varianty, které se důkladněji popíší. Poté se vhodnou metodou vybere jedna varianta, která se důkladněji rozpracuje. Dále se vytvoří částečný nebo úplný počítačový model kostry hrubé skříně této koncepce nebo její části a provede se pevnostní výpočet pomocí MKP metody. Nakonec se vytvoří výrobní výkresy vybraných částí a zhodnotí se vypočtené hodnoty.

## 2 Rozbor možností řešení vozidla, vytvoření variant

Tramvajová vozidla mají významnou úlohu v dopravní obslužnosti u měst s počtem obyvatelů nad 100 000. Za této situace by, při absenci tohoto způsobu dopravy, byla silniční doprava nerealizovatelná a neprůchodná, zatímco kolejová doprava umožňuje relativně hladký a plynulý provoz. Pětičlanková tramvaj totiž dokáže přepravit zhruba stejný počet cestujících jako 150 osobních automobilů. Zejména u kolejových vozidel pohybujících se pod povrchem, tedy v tunelech metra, kde provoz probíhá nezávisle na povrchovém dění. Navíc na rozdíl od automobilové dopravy méně znečišťuje ovzduší a zabírá méně prostoru. [3]

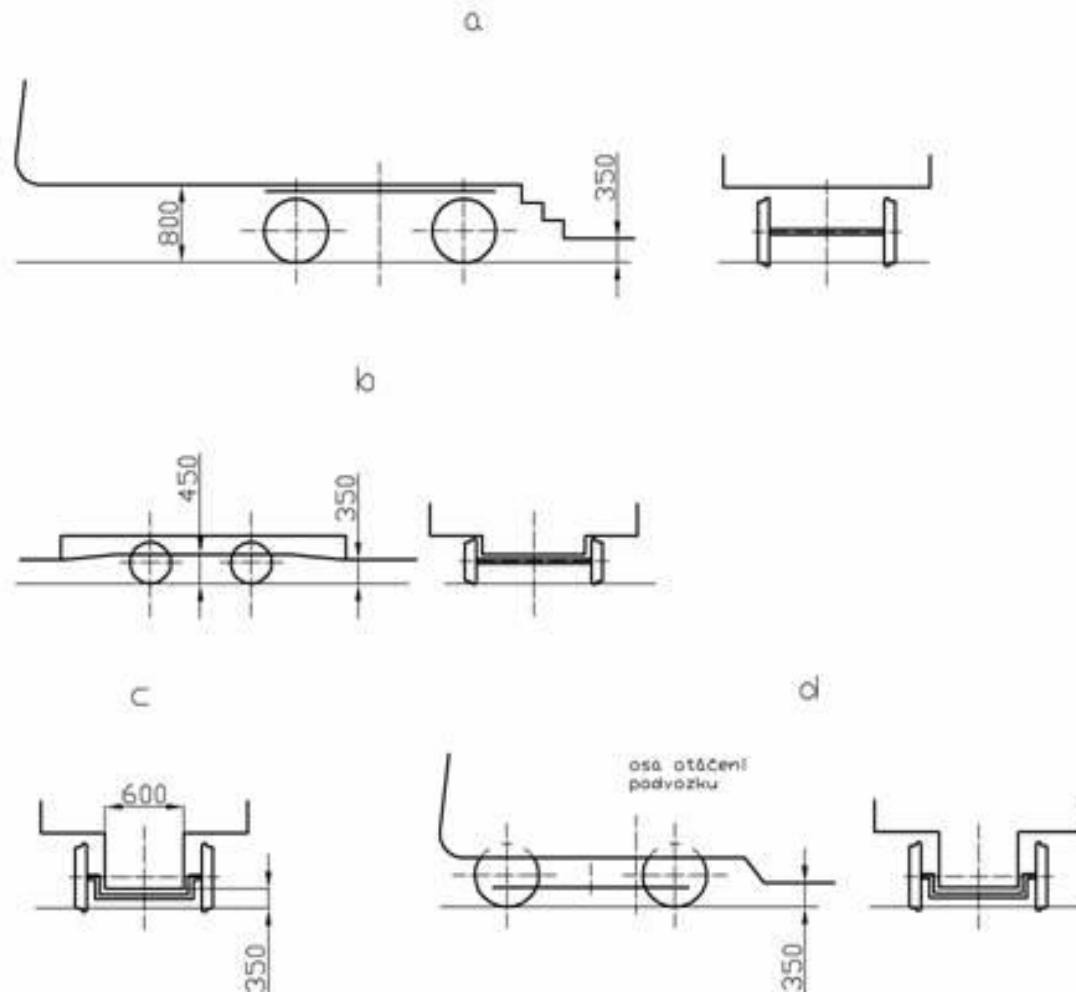
Následující kapitoly se zabývají možnostmi některých vybraných konceptů jak z hlediska vlastní konstrukce tak z hlediska dalších vlastností. [3]

### 2.1 Nízká podlaha

Procento nízké podlahy hraje u vozidel městské hromadné dopravy jednu z klíčových rolí. Usnadňuje výstup a nástup cestujících a s instalovanou výsuvnou plošinou umožňuje cestování i pro kočárky nebo pro osoby na invalidním vozíku. Obvyklá výška nízké podlahy, u nízkopodlažní tramvaje nad temenem kolejnice je 350 mm, přičemž výška nástupní hrany může být i nižší. Nástupní ostrůvky obvykle mají výšku 180 až 200 mm. To znamená, že i při opotřebovaných kolech je nástupní hrana nepatrně výše než hrana ostrůvku. [3]

Na druhé straně je nízká podlaha problém pro umístění a konstrukci podvozku. Především u oblastí trakčních podvozků je nízká podlaha překážkou, což je nutno nějakým způsobem vyřešit. Jako například takto: [3]

- a) Jedním ze způsobů je takzvané částečné nízkopodlažní vozidlo, kdy podvozek obvyklé koncepce je umístěn v prostoru pod vysokou podlahou. Z nízké podlahy potom vedou obvykle 2 až 3 schody. [3]
- b) Další možností je použití dvojkolí s menším průměrem kol. Tímto způsobem lze snížit úroveň vysoké podlahy na přibližně 450 mm. Mezi nízkou a vysokou podlahou je vytvořená šikmá rampa nebo schod. [3]
- c) Dále je možno použít speciální konstrukce trakčního podvozku s nápravnicemi, na kterých jsou volně otočná kola. Podvozek je většinou neotočný, kola obvyklého průměru jsou schovaná do prostoru pod sedadlo. Průchozí ulička by měla být co nejširší, alespoň 600 mm. [3]
- d) V neposlední řadě lze použít otočného podvozku s nápravnicemi, vysutého pod kabinu řidiče. [3]



Obr. 1 Obrázky některých řešení propojení nízké podlahy s podvozkem. [3]

## 2.2 Tramvajová vozidla kloubová

Požadavky na zvýšenou přepravní kapacitu se dají realizovat různými způsoby. Od spřáhnutí dvou vozidel, přípojným vozidlem, po kloubové nebo článkové vozidlo. Je však nutno mít na paměti, že tramvajové vozidlo musí často projíždět malými oblouky, které omezují délku článku a komplikují konstrukci vozidla. Spřahováním vozidel se sice zvýší přepravní kapacita, ale kabiny pro řízení tramvaje ve vozech bez řidičů zabírají zbytečně mnoho místa pro cestující. Jedním z možných řešení je kloubové vozidlo. [3]

### 2.2.1 Tramvajová vozidla kloubová, vysokopodlažní, s podvozkem Jakobs

Jedním z možných řešení kloubového vozidla je tramvaj K2. Zjednodušeně lze říci, že přední část tramvaje T3 s odstraněným zadním čelem a zadní část bez kabiny jsou spojeny kloubem, umístěným nad středním podvozkem. [3]



Obr. 2 Obrázek tramvaje typu T3. []

### 2.2.2 Tramvajová vozidla kloubová, s kloubem mimo podvozek

Další možností pro tramvajové kloubové vozidlo je umístění kloubu mimo podvozek. Tento koncept má jeden kloub a jeden stupeň volnosti (otáčení kolem svislé osy). Vozidlo má dva články s dvěma neotočnými podvozky, jeden pod každým článkem. Původním představitelem této koncepce je tzv. brémská tramvaj. [3]

### 2.2.3 Tramvajová vozidla kloubová, vysokopodlažní, se dvěma klouby

Při použití tohoto řešení se oproti předchozímu způsobu v kapitole 2.2.2 zvýší přepravní kapacita. Avšak výška podlahy se pohybuje okolo 900 mm nad temenem kolejnice, což má za následek pomalejší výměny cestujících, horší výstup a nástup invalidů a cestujících s kočárky. Příkladem takového vozidla je obousměrná tramvaj typu KT8D5 s kabinou řidiče na obou koncích. To je výhodné v případech, kdy se vozidlo nemůže otočit na konečné trati. Nevýhodou této tramvaje je zabor podlahy v nástupním prostoru pro schody a také kabina řidiče zabírající prostor pro cestující, pokud není využívána vratnost vozidla. [3]



Obr. 3Obrázek tramvaje typu KT8D5. [5]

### 2.3 Tramvajová vozidla článková, nízkopodlažní, se zvýšenou kapacitou

Na počátku 90. let se začal prosazovat nový trend ve stavbě tramvajových vozidel, který znamenal přelom v jejich koncepci. I když do té doby používané čtyřnápravové vozy s vysokou podlahou nebo kloubová vozidla měly sice dostatečnou přepravní kapacitu, přestávaly stačit zvýšeným požadavkům na rychlou výměnu cestujících, nástup osob se sníženou pohyblivostí a na invalidním vozíku nebo osob s kočárky. K těmto požadavkům se začaly přidávat další jako například vyšší zrychlení, atraktivní design, příjemný a přátelský interiér, větrání, vytápění nebo klimatizace, nízká hlučnost, vnitřní i vnější informační systém, odolnost proti vandalizmu, nízké výrobní náklady, nízké náklady na provoz a údržbu, použití nejmodernějších technologií pohonu (asynchronní nebo synchronní motory napájené z měničů), diagnostika a mnoho dalších. Z tohoto výčtu plynou požadavky na konstrukci vozidel, které budou v dalším textu podrobněji rozebrány. [3]

Tramvajová vozidla musí v každém případě splňovat nutné předpisy a normy. Pro tuzemská vozidla platí norma *ČSN 281300 Tramvajová vozidla - technické požadavky a zkoušky*. Pro stanovení vybočení od něhož se odvíjí příčné rozměry vozidla platí norma *ČSN 280337 Obrysy pro tramvajová vozidla*. Požadavky na tramvajová vozidla v SRN stanovuje norma BOStrab., pro jiné země platí místní normy. Zde je výčet některých požadavků a jejich řešení:

- *Požadavek na snadnou a rychlou výměnu cestujících* lze dosáhnout nízkopodlažním vozidlem s různým procentním podílem nízké podlahy.
- *Požadavek na zvýšení kapacity* lze splnit spojováním jednotlivých vozů do soupravy nebo článkovým (kloubovým) vozidlem. Při použití článků je pevně daná přepravní kapacita. Spojování jednotlivých vozů umožňuje násobně zvýšit kapacitu nebo ji během nízké přepravní poptávky snížit.
- *Požadavek na atraktivní design* lze splnit modulovou stavbou. Tento požadavek je různý pro každého provozovatele.
- *Požadavek na vyšší zrychlení* lze splnit vyšším výkonem trakčních motorů a počtem trakčních dvojkolí. [3]

A další požadavky. Stěžejním problémem u článkových vozidel je vyřešení přechodu mezi články, zejména pokud je v té oblasti umístěn i podvozek. Právě tyto zmíněné požadavky výrazně ovlivňují koncepcí tramvajových vozidel současnosti. [3]

### 2.4 Koncepce vybraných článkových tří a pětičlánkových nízkopodlažních tramvajových vozidel a jejich vlastnosti

V průběhu asi dvacetiletého vývoje nízkopodlažních vozidel byla výrobcí vytvořena řada koncepcí. V následující kapitole budou zmíněny některé z nich. [3]

K tomu, aby článkové vozidlo mohlo správně plnit svoji funkci, je zapotřebí mnohé požadavky, z nichž jedním z nejdůležitějších je průjezd vozidla horizontálními (směrovými) a vertikálními (konvexními a konkávními) oblouky. V každé z dále uvedených koncepcí hraje klíčovou roli podvozek, ať už je trakční nebo běžný. Zásadní význam má jeho stupeň volnosti pod skříní v horizontálním směru. Z tohoto hlediska se rozeznává podvozek:

- *otočný*, který je pod skříní. Co se směrových oblouků týče, je zcela volně otočný.
- *neotočný*, který je svázán se skříní tak, že se může vychylovat pouze o  $1^\circ$  až  $2^\circ$ . To je z toho důvodu, aby při nájezdu do oblouku řídicí síla na nabíhajícím dvojkolí narůstala pozvolna a aby na přímém úseku tratě nekopíroval podvozek její nerovnosti. Při průjezdu obloukem se podvozek natáčí současně se skříní. [3]

Dalším důležitým prvkem každé koncepce je vazba mezi jednotlivými články. Ta je klíčová jednak z hlediska průjezdu směrovými a výškovými oblouky, jednak z důvodu bezpečnosti proti vykolejení. Liší se u jednotlivých koncepcí. Mezi dalšími významnými parametry jsou adhezní hmotnost, počet trakčních motorů, jejich výkon a celkový výkon tramvajového vozidla a v neposlední řadě i údaj o jedno nebo o obousměrnosti vozidla, který ovlivňuje počet dveří i přepravní kapacitu. [3]

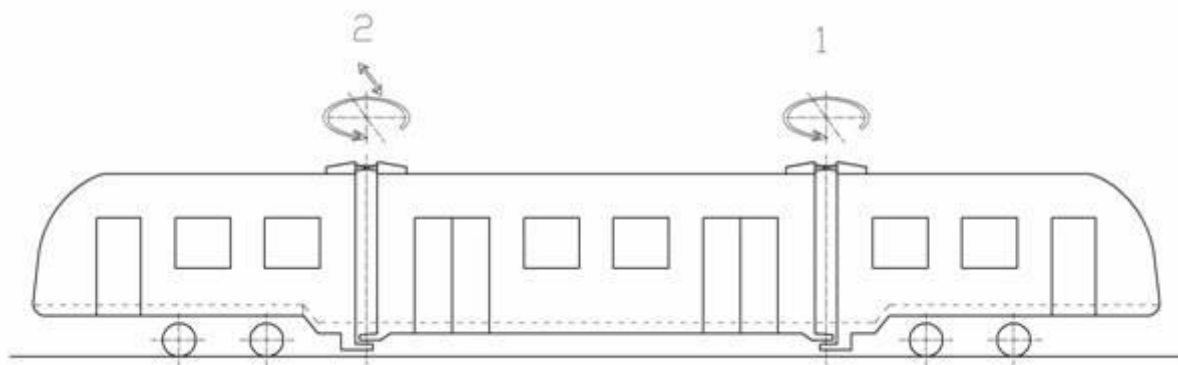
#### 2.4.1 Tříčlánková čtyřnápravová tramvaj

Technicky i výrobně se jedná o jednodušší řešení vozidla s jistou částí vysoké podlahy. Tato koncepce má obvykle neotočné podvozky s koly o průměru zhruba 610 až 700 mm, což přináší nutnost použití vysoké podlahy v oblasti podvozků a tím pádem i zavedení přechodu s nízkou podlahou, obvykle pomocí dvou schodů. Ovšem při použití vhodné konstrukce podvozku lze získat 100% nízkopodlažní tramvaj (např. tramvaj Citadis), ale přináší to s sebou další problémy v oblasti podvozku. Jako další nevýhodu tohoto konceptu lze uvést také zvýšené opotřebení kol a kolejnic při průjezdu obloukem, protože je nutno natáčet celou hmotnost článku kolem svislé osy podvozku. Také maximální rychlost bez zvláštních opatření je omezena na hodnotu kolem 70 km/h. [3]

Tato koncepce má 2 klouby. Jeden z nich umožňuje pouze směrové otáčení kolem svislé osy, druhý jak směrové otáčení kolem osy, tak i kývání. Příkladem takového vozidla je v Česku známá Astra event. Anitra, ve světě to je tramvaj Citadis. [3]



Obr. 4 Obrázek tramvaje typu Anitra. [6]



Obr. 5 Schéma tříčlánkové čtyřnápravové tramvaje s jedním zavěšeným článkem a dvěma krajními články s podvozky. Tento koncept má 2 klouby. Jedem umožňuje pouze otáčení kolem vlastní osy, druhý otáčení a podélné kývání. [3]

Hlavní parametry vozidla	Anitra	Citadis
Uspořádání pohonu	$B_o' + B_o'$	$B_o' + B_o'$
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Délka přes spřáhlo	21 150 mm	22 987 mm
Šířka skříně	2460 mm	2650 mm
Podíl nízké podlahy	72%	100%
Počet sedadel	39	40
Maximální počet cestujících (8 os./m <sup>2</sup> )	207	145 (4 os./m <sup>2</sup> )
Hmotnost prázdného vozidla	25 t	-
Výkon trakčních motorů	4x85 kW	4x105 kW
Maximální rychlost	70 km/h	70 km/h

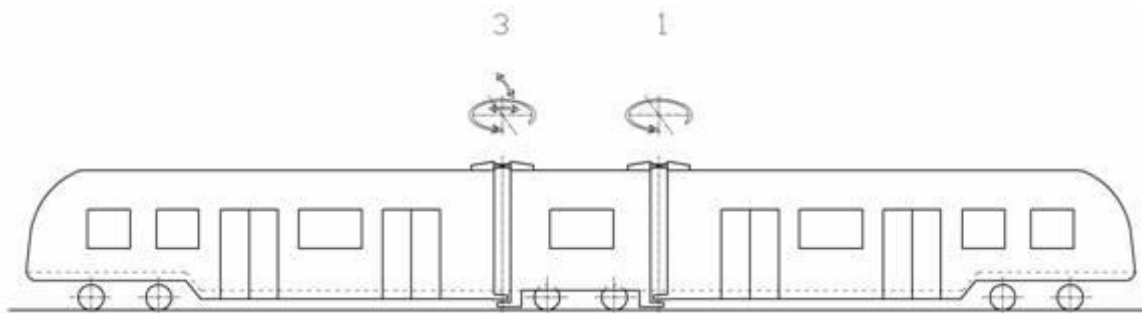
Tabulka 1 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

#### 2.4.2 Tříčlánková šesti nápravová tramvaj se dvěma delšími krajními články

Tento koncept má pod oběma krajními články otočné podvozky. Konce těchto krajních článků jsou kloubově zavěšeny na středním článku. Pod středním článkem je umístěn neotočný podvozek. Tato koncepce používá jeden z kloubů pro otáčení kolem svislé osy, druhý umožňuje jak otáčení kolem svislé osy tak výkyvy v příčném a podélném směru. Otočné podvozky jsou vhodné z hlediska průjezdu obloukem, neboť podvozek se natáčí kolem své osy, kdežto skříň kolem kloubu. Také maximální rychlost může být o něco vyšší. Příkladem takové koncepce je tramvaj s typovým označením FLEXITY Swift od firmy BOMBARDIER. [3]



Obr. 6 Obrázek tramvaje typu Flexity Swift. [3]



Obr. 7 Schéma tříčlánkové šesti nápravové tramvaje se dvěma delšími krajními články se dvěma klouby. Jeden umožňuje pouze otáčení kolem vlastní osy, druhý otáčení a kývání v podélném a příčném směru. [3]

Hlavní parametry vozidla	Flexity Shift Köln	Flexity Classic Krakow
Uspořádání pohonu	$B_o' + 2 + B_o'$	$B_o' + 2 + B_o'$
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Délka přes spřáhlo	29 500 mm	26 000 mm
Šířka skříně	2650 mm	2400 mm
Podíl nízké podlahy	72%	65%
Počet sedadel	70	76
Maximální počet cestujících (4 os./m <sup>2</sup> )	186	176
Hmotnost prázdného vozidla	35,5 t	31,6 t
Výkon trakčních motorů	4x120 kW	4x105 kW
Maximální rychlost	80 km/h	70 km/h

Tabulka 2 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]



### 2.4.3 Tříčlávková tramvaj se čtyřmi otočnými podvozky

U tohoto řešení jsou dva podvozky pod středním článkem a dva pod krajními články, všechny podvozky jsou otočné. Tato tramvaj je vybavena dvěma klouby. Oba umožňují otáčení kolem své osy, příčné kývání a zároveň umožňují směrové výkyvy. Příkladem tohoto typu je tříčlávková osminápravová obousměrná tramvaj Flexity Classic (Dortmund) od firmy BOMBARDIER nebo tříčlávková tramvaj LeoLiner. Tyto tramvaje mají při podobných parametrech jako předchozího typu v kapitole 2.4.2 zhruba o 2,5 t vyšší hmotnost, neboť mají o jeden podvozek více. [3]



Obr. 8 Obrázek tramvaje typu Flexity Classic. [7]



Obr. 9 Schéma tříčlávkové tramvaje se čtyřmi otočnými podvozky a dvěma klouby umožňující otáčení kolem vlastní osy a podélné i příčné kývání. [3]

Hlavní parametry LeoLiner	Vamos
Uspořádání pohonu	$B_0' + 2'2' + B_0'$
Rozchod	1435 mm
Délka přes spráhlo	33 000 mm
Šířka skříně	2300 mm
Podíl nízké podlahy	75%
Počet sedadel	63
Maximální počet cestujících (4 os./m <sup>2</sup> )	178
Hmotnost prázdného vozidla	41 t
Výkon trakčních motorů	4x105 kW

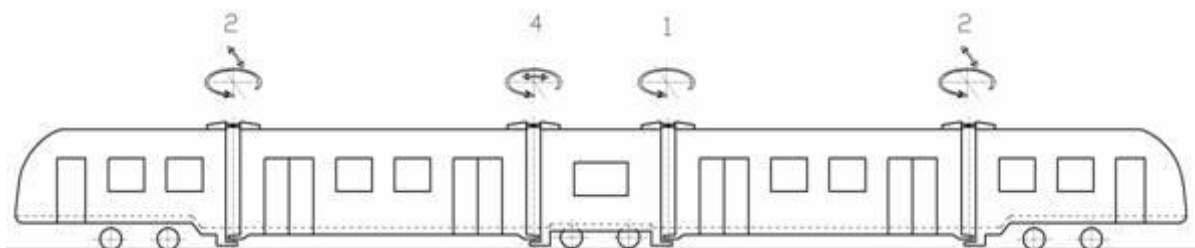
Tabulka 3 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

#### 2.4.4 Pětičlanková tramvaj se třemi neotočnými podvozky (70% a 100% nízké podlahy)

Tento typ tramvaje má neotočné podvozky pod krajními články a pod středním článkem. Jedná se o upravenou verzi konceptu z kapitoly 2.4.1. Je velmi rozšířená díky své relativní jednoduchosti. Má podobné vlastnosti jako tříčlanková a to zvýšené opotřebení kol a kolejnic při průjezdu obloukem, méně klidný chod při vyšších rychlostech atd. Krajní články mají zvýšenou podlahu nad podvozky, střední krátký článek má buď jeden schod nebo šikmou rampu. Pro dosažení bezpečného průjezdu horizontálními a vertikálními oblouky jsou klouby umístěné za krajními články otočné kolem svislé osy a příčně výkyvné. Klouby u středního článku jsou různé. Jeden z nich umožňuje pouze otáčení kolem svislé osy, druhý jak otáčení, tak podélné kývání. Příkladem takového konceptu jsou tramvaje 14T a 16T od firmy ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [3]



Obr. 10 Obrázek tramvaje typu 14T. [8]



Obr. 11 Schéma pětičlánkové tramvaje se třemi neotočnými podvozky a čtyřmi klouby. Dva klouby umožňují otáčení kolem vlastní osy a příčné kývání, jeden umožňuje pouze otáčení kolem vlastní osy a jeden otáčení kolem vlastní osy a podélné kývání. [3]

Hlavní parametry vozidla	14T	16T
Uspořádání pohonu	$B_o' + B_o' + B_o'$	$B_o' + 2' + B_o'$
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Délka přes spřáhlo	30 250 mm	30 250 mm
Šířka skříně	2460 mm	2460 mm
Podíl nízké podlahy	50%	65%
Počet sedadel	69	69
Maximální počet cestujících (8 os./m <sup>2</sup> )	280	243 (6,66 os./m <sup>2</sup> )
Hmotnost prázdného vozidla	-	37,36 t
Výkon trakčních motorů	4x90 kW	4x95 kW
Maximální rychlost	70 km/h	70 km/h

Tabulka 4 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

Pokud se použijí neotočné podvozky upravené pro nízkou podlahu lze dosáhnout vozidla stejné koncepce jako v předchozím případě včetně vazeb mezi články, avšak se 100% nízkou podlahou. Příkladem takové tramvaje je tramvaj Citadis (Lyon) obousměrná od firmy ALSTOM se čtyřmi trakčními motory nebo tramvaj Cityrunner jednosměrná od firmy BOMBARDIER s osmi trakčními motory. [3]



Obr. 12 Obrázek tramvaje typu Citadis (Lyon). [9]

Hlavní parametry vozidla	Citadis 302 Lyon	Cityrunner Graz
Uspořádání pohonu	$B_o' + 2' + B_o'$	$B_o' + 2' + B_o'$
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Délka přes spřáhlo	32 420 mm	27 000 mm
Šířka skříně	2400 mm	2200 mm
Podíl nízké podlahy	100%	100%
Počet sedadel	56	53
Maximální počet cestujících (4 os./m <sup>2</sup> )	201	150
Hmotnost prázdného vozidla	-	32,5 t
Výkon trakčních motorů	4x120 kW	8x45 kW
Maximální rychlost	70 km/h	70 km/h

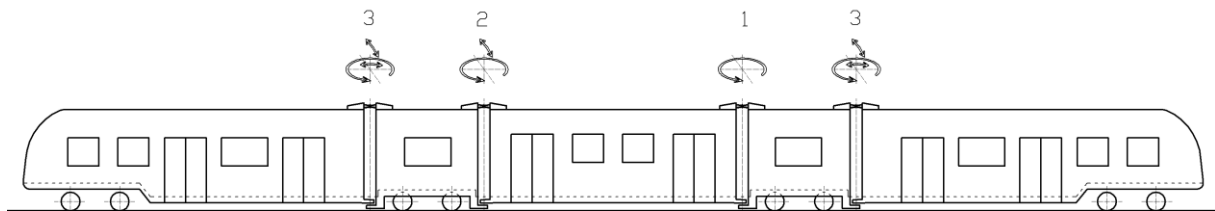
Tabulka 5 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

#### 2.4.5 Pětičláková tramvaj se čtyřmi podvozky

Tato koncepce má pod krajními články otočné podvozky a neotočné podvozky má pod krátkými články umístěnými mezi středním a krajními články. Značnou výhodou je lepší průjezd obloukem než u předchozích typů tramvají. Nevýhodou je větší počet podvozků a tím i vyšší hmotnost. Část podlahy nad otočnými podvozky je zvýšená, ale nástupní hrana je vždy nízkopodlažní. Kloubová vazba mezi krajními a krátkými články je otočná kolem svislé osy a podélně i příčně výkyvná. Vazba mezi středním zavěšeným článkem a krátkými články je na jedné straně pouze otočná na druhé straně otočná i příčně výkyvná. Příkladem takové tramvaje je osminápravová obousměrná tramvaj Citadis Dublin od firmy ALSTOM. [3]



Obr. 13 Obrázek tramvaje typu Citadis Dublin. [10]



Obr. 14 Schéma pětičlánkové tramvaje se čtyřmi podvozky a čtyřmi klouby. Dva klouby umožňují otáčení kolem vlastní osy a podélné i příčné kývání, jeden umožňuje pouze otáčení kolem vlastní osy a jeden otáčení kolem vlastní osy a příčné kývání. [3]

Hlavní parametry vozidla	Citadis Dublin
Uspořádání pohonu	$B_o' + 2' + B_o' + B_o'$
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	40 800 mm
Šířka skříně	2400 mm
Podíl nízké podlahy	80%
Počet sedadel	80
Maximální počet cestujících (5 os./m <sup>2</sup> )	310
Hmotnost prázdného vozidla	-
Výkon trakčních motorů	4x140 kW + 2x120 kW
Maximální rychlost	70 km/h

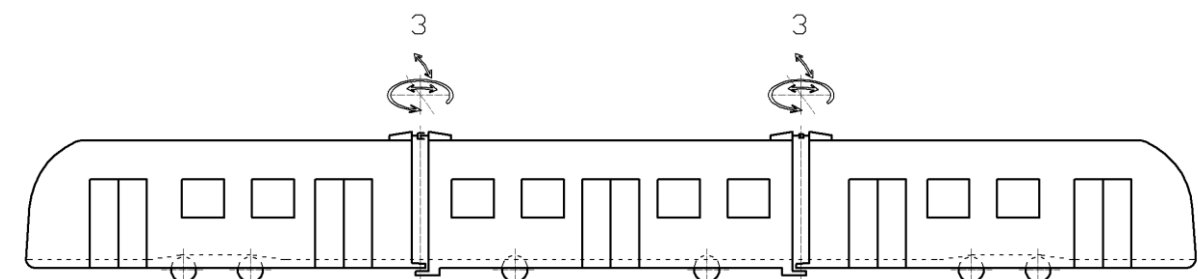
Tabulka 6 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

### 2.4.6 Tříčlánková tramvaj se dvěma krajními články na otočných podvozcích

Tento koncept má pod krajními články otočné podvozky a pod středním článkem má umístěné dva jednonápravové podvozky nebo standardní dvojkolí. Má dvě stejné kloubové vazby umožňující otáčení kolem svislé osy, příčné a podélné kývání. Příkladem tohoto typu je vůz městské dráhy ve Vídni linie U6 s výškou podlahy 450 mm od firmy BOMBARDIER. [3]



Obr. 15 Obrázek vozidla městské dráhy ve Vídni linie U6. [11]



Obr. 16 Schéma tříčlánkové tramvaje se dvěma krajními články na otočných podvozcích a dvěma klouby umožňující otáčení kolem vlastní osy a podélné i příčné kývání. [3]

Hlavní parametry vozidla	City - Tram U6
Uspořádání pohonu	$B_0' + 1'1' + B_0'$
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	26 800 mm
Šířka skříně	2650 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	58
Maximální počet cestujících (4 os./m <sup>2</sup> )	194
Hmotnost prázdného vozidla	34,7 t
Výkon trakčních motorů	4x100 kW
Maximální rychlost	80 km/h

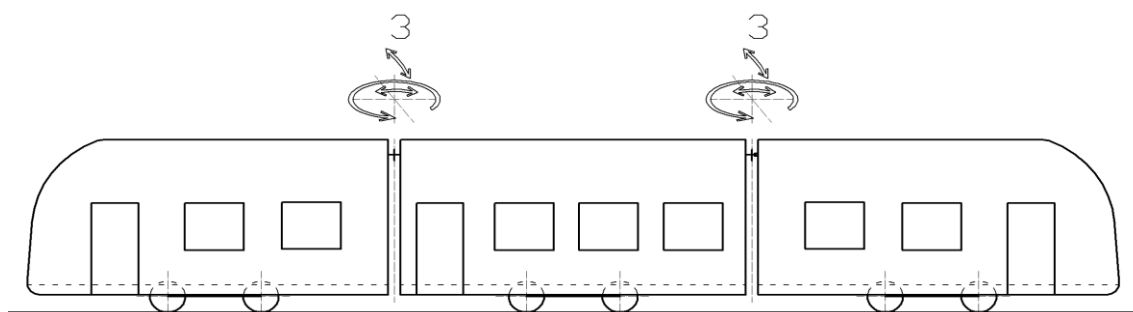
Tabulka 7 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

### 2.4.7 Tříčlánková tramvaj se třemi neotočnými podvozky pod každým článkem

Tento koncept je také známý jako takzvaná brémská tramvaj. Tramvajové vozidlo tohoto typu má neotočné podvozky pod každým článkem. V každém podvozku je jedna náprava trakční a druhou tvoří volná kola. Tato tramvaj má dvě stejné kloubové vazby umožňující otáčení kolem svislé osy a příčné i podélné kývání. Jak již bylo zmíněno představitelem je tříčlánková tramvaj „Brémská“ od firmy BOMBARDIER. [3]



Obr. 17 Obrázek Brémské tramvaje. [12]



Obr. 18 Schéma tříčlánkové tramvaje se třemi neotočnými podvozky pod každým článkem a dvěma klouby umožňující otáčení kolem vlastní osy a podélné i příčné kývání. [3]

Hlavní parametry vozidla	Tramvaj Brémská
Uspořádání pohonu	$(1A_o)' + (1A_o)' + (1A_o)'$
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	26 500 mm
Šířka skříně	2300 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	67
Maximální počet cestujících (4 os./m <sup>2</sup> )	170
Hmotnost prázdného vozidla	26,8 t
Výkon trakčních motorů	3x94 kW
Maximální rychlost	70 km/h

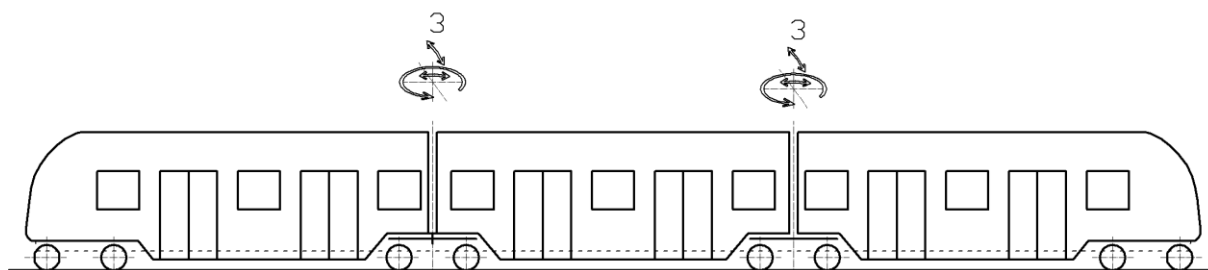
Tabulka 8 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

#### 2.4.8 Tříčlávková tramvaj se dvěma otočnými podvozky pod čelem a dvěma otočnými podvozky pod kloubovým spojením článků

Jak vyplývá z názvu, tato koncepce využívá čtyř otočných podvozků, z nichž dva jsou umístěny pod kloubovým spojením článků, takzvané Jacobs podvozky, a dva podvozky jsou pod krajními články co nejbližže předního a zadního čela. Krajní podvozky mají navíc ještě posunutou osu otáčení mimo střed podvozku, takže zadní dvojkolí při průjezdu obloukem omezuje prostor nízké podlahy minimálně. Vazba mezi jednotlivými články v horní části není, vše se odehrává pouze ve spojení článku s podvozkem. Otočný bod každého článku je v ose dvojkolí vnitřního podvozku. Příkladem takového konceptu je tříčlávková kloubová tramvaj ŠKODA 15T For City. [3]



Obr. 19 Obrázek tramvaje typu 15T For City. [13]



Obr. 20 Schéma tříčlávkové tramvaje se dvěma otočnými podvozky pod čelem a dvěma otočnými podvozky pod kloubovým spojením článků se dvěma klouby umožňující otáčení kolem vlastní osy a podélné i příčné kývání. [3]



Katedra konstruování strojů

Marek Havlín

Hlavní parametry vozidla	15T For City
Uspořádání pohonu	$B_o', B_o', B_o', B_o'$
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	31 400 mm
Šířka skříně	2460 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	61
Maximální počet cestujících (8 os./m <sup>2</sup> )	300
Hmotnost prázdného vozidla	-
Výkon trakčních motorů	720 kW
Maximální rychlost	60 km/h

Tabulka 9 Tabulka některých parametrů pro vybraná vozidla. [3]

### 3 Rozhodnutí o zvolené variantě

V následující kapitole se pomocí zvolené metody určí varianta, která bude dále zpracována. Počet možných variant je pochopitelně mnohem rozsáhlejší, než je zde uvedeno, ale v rámci této práce se to omezí pouze na vybrané koncepty uvedené v kapitole 2.

#### 3.1 Metoda výběru varianty

Výběr výsledné varianty se určí pomocí známkovací metody. Nejprve se určí několik kritérií, podle kterých se budou jednotlivé možnosti posuzovat. Každému kritériu se přidá relativní váha důležitosti, která udává jak je daná oblast důležitá oproti ostatním. Čím vyšší je tato hodnota, tím důležitější kritérium to je. Poté se jednotlivým variantám pro každé kritérium přiřadí hodnota důležitosti, opět čím vyšší tím lepší. Následně se vynásobí relativní váha s hodnotou kritéria u všech variant. U každé varianty se poté všechny tyto násobky sečtou a výsledný součet se podělí maximální možnou hodnotou (ideálním stavem). Tyto hodnoty se porovnají a největší z nich se vybere k dalšímu zpracování.

Výhodou této metody je její relativní jednoduchost. Na druhou stranu má i jisté nevýhody, z nichž největší z nich je subjektivní určování hodnot. To znamená, že každý může mít jiný názor o tom, jak jsou jednotlivé metody důležité. Pokud tedy provede toto vyhodnocení někdo jiný, můžou se konečné výsledky lišit. Avšak v rámci této práce je to dostačující.

#### 3.2 Určení varianty

Nejprve se kvůli zpřehlednění celého výpočtu zavedou místo celých názvů jednotlivých konceptů pouze jednoduchá označení uvedená v tabulce 10.

Označení variant	Název variant
Varianta A	Tříčlanková čtyřnápravová tramvaj
Varianta B	Tříčlanková šesti nápravová tramvaj se dvěma delšími krajními články
Varianta C	Tříčlanková tramvaj se čtyřmi otočnými podvozky
Varianta D	Pětičlanková tramvaj se třemi neotočnými podvozky (70% a 100% nízké podlahy)
Varianta E	Pětičlanková tramvaj se čtyřmi podvozky
Varianta F	Tříčlanková tramvaj se dvěma krajními články na otočných podvozcích
Varianta G	Tříčlanková tramvaj se třemi neotočnými podvozky pod každým článkem
Varianta H	Tříčlanková tramvaj se dvěma otočnými podvozky pod čelem a dvěma otočnými podvozky pod kloubovým spojením článků

**Tabulka 10** Tabulka jednotlivých variant a jejich označení.

Poté se provede samotná metoda, která je rozpracovaná v následujících tabulkách 11 a 12.

Katedra konstruování strojů

Marek Havlín

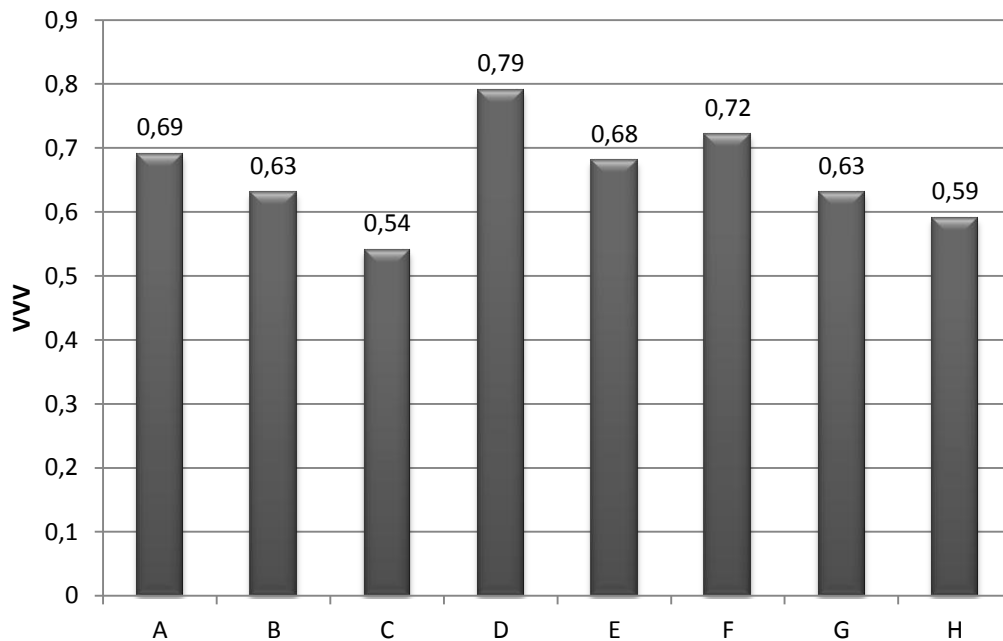
Kritérium	Váha varianty	Varianta									
		A		B		C		D		Ideál	
		HK	CH	HK	CH	HK	CH	HK	CH	HK	CH
Náročnost konstrukce	2	4	8	3	6	2	4	3	6	5	10
Vyrobitelnost	3	4	12	3	9	3	9	3	9	5	15
Počet cestujících	2	3	6	3	6	3	6	4	8	5	10
Výška podlahy	2	3	6	3	6	3	6	5	10	5	10
Procento nízké podlahy	2	3	6	3	6	3	6	5	10	5	10
Maximální počet cestujících	2	2	4	4	8	3	6	4	8	5	10
Rozměrová velikost	2	4	8	4	8	4	8	4	8	5	10
Hmotnost vozidla	3	4	12	2	6	2	6	3	9	5	15
Zrychlení vozidla	1	4	4	3	3	2	2	3	3	5	5
Komfort	2	3	6	3	6	3	6	3	6	5	10
Celková cena	3	3	9	3	9	3	9	4	12	5	15
Počet podvozků	2	5	10	3	6	1	2	5	10	5	10
Vhodnost použití na zadané trati	3	3	9	4	12	3	9	5	15	5	15
		$\Sigma=$	100	$\Sigma=$	91	$\Sigma=$	79	$\Sigma=$	114	$\Sigma=$	145
		VVV	0,69	VVV	0,63	VVV	0,54	VVV	0,79	VVV	1

Tabulka 11 Tabulka s variantami A, B, C a D s kritérii a váhou pro jednotlivé varianty.

Kritérium	Váha varianty	Varianta									
		E		F		G		H		Ideál	
		HK	CH	HK	CH	HK	CH	HK	CH	HK	CH
Náročnost konstrukce	2	3	6	3	6	4	8	3	6	5	10
Vyrobitelnost	3	3	9	4	12	3	9	1	3	5	15
Počet cestujících	2	4	8	3	6	3	6	3	6	5	10
Výška podlahy	2	4	8	5	10	5	10	3	6	5	10
Procento nízké podlahy	2	4	8	5	10	5	10	3	6	5	10
Maximální počet cestujících	2	5	10	3	6	2	4	4	8	5	10
Rozměrová velikost	2	4	8	3	6	2	4	3	6	5	10
Hmotnost vozidla	3	3	9	4	12	4	12	4	12	5	15
Zrychlení vozidla	1	2	2	4	4	4	4	4	4	5	5
Komfort	2	3	6	3	6	3	6	3	6	5	10
Celková cena	3	2	6	4	12	4	12	3	9	5	15
Počet podvozků	2	3	6	3	6	2	4	2	4	5	10
Vhodnost použití na zadané trati	3	4	12	3	9	1	3	3	9	5	15
		$\Sigma=$	98	$\Sigma=$	105	$\Sigma=$	92	$\Sigma=$	85	$\Sigma=$	145
		VVV	0,68	VVV	0,72	VVV	0,63	VVV	0,59	VVV	1

HK	Hodnota kritéria
CH	Celková hodnota
VVV	Výsledná váha varianty

Tabulka 12 Tabulka s variantami E, F, G a H s kritérii a váhou pro jednotlivé varianty a s legendou.



**Graf 1** Znáornění výsledků analýzy pomocí grafu.

Z výsledků je patrné, že jako nejvýhodnější varianta vyšla pětičlávková tramvaj se třemi neotočnými podvozky (v tomto případě označená pod písmenem D).

Tento koncept tedy bude dále vyhotoven. Konkrétně bude navrhována jeho hrubá stavba (resp. kostra skříně). Jako další upřesňující parametry konceptu důležité pro jeho návrh jsou:

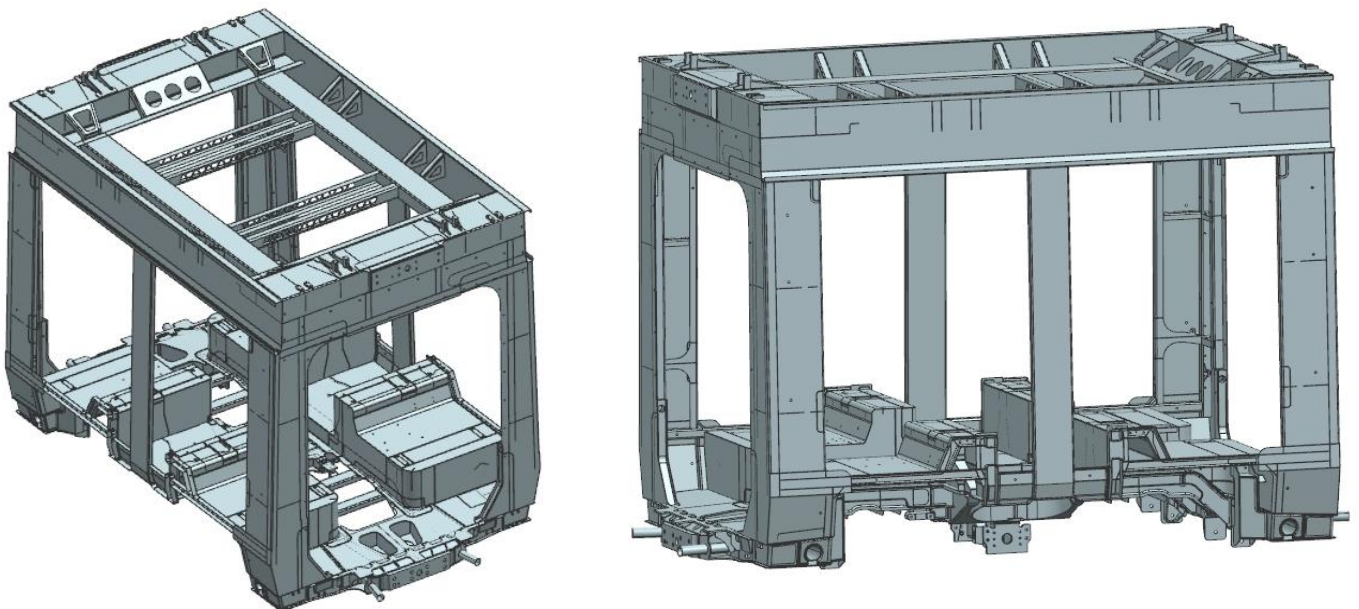
- Tramvaj bude jednosměrná (kabina strojvedoucího bude pouze na jednom konci)
- Výstup a nástup cestujících bude probíhat pouze na jedné straně tramvaje (dveře se budou nacházet pouze na jedné straně)
- Tramvaj bude mít 3 podvozky a všechny jsou neotočné
- Tramvaj bude mít 2 dlouhé zavěšené články a 3 krátké články s podvozkem
- Musí být provedeny úpravy ke snížení hmotnosti
- Tramvaj musí splňovat obrysově požadavky
- a další

## 4 Návrh hrubé stavby skříně

V této kapitole bude předložen vlastní konstrukční návrh kostry hrubé skříně vítězné varianty (viz kapitola 3). Jedná se tedy konkrétně o konstrukční návrh vybraných článků tramvaje, tedy středního a obou zavěšených článků, které bude dále důkladněji popsány. Oba krajní články nebyly vzhledem k náročnosti úlohy a relativně krátkému časovému úseku na její zhotovení vypracovány. Konkrétně se jedná o článek s kabinou řidiče a zadní článek s prostorem pro cestující. U vypracovaných článků se v obou případech jedná o diferenciální ocelové skříně.

### 4.1 Střední článek

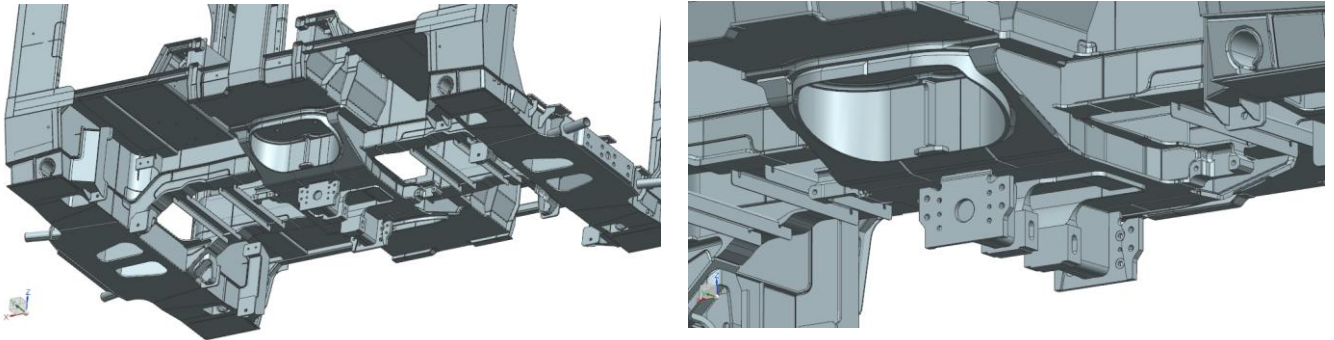
Tento článek se nachází uprostřed tramvaje mezi oběma zavěšenými články. Umožňuje jejich zavěšení a vazby mezi těmito články musí zajistit možnost otáčení kolem svislé osy a naklápění v příčném směru. Článek obsahuje 1 neotočný podvozek a má pro to uzpůsobenou podlahu. Dále má uprostřed uličku o šířce 606 mm (viz obrázek 24). Základními rozměry jsou výška článku nad temenem kolejnice 290 mm, maximální šířka 2460 mm, délka přes spodní spojovací desky je 3266 mm. Rozměry článku splňují podmínku článku obrysu pro vozidlo a jeho hmotnost je 1430 kg. Jako materiál byla pro celý článek zvolena ocel ČSN 17 348. V následujících kapitolách budou podrobněji popsány základní části článku. Avšak tento článek nebude podroben dalším analýzám a zůstane pouze ve stádiu návrhu (nebude dále upravován).



Obr. 21 Celkové pohledy na střední článek.

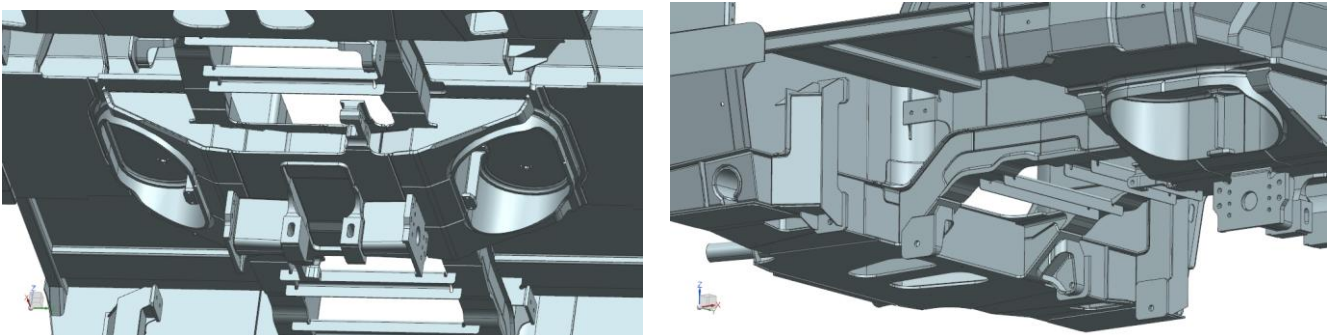
#### 4.1.1 Podlaha středního článku

Podlaha tohoto článku je relativně tvarově složitá, jelikož musí umožňovat uchycení a přenášení sil od neotočného podvozku, plochy pro sedadla a mnoho dalšího. Při tom zároveň nese celou tíhu článku nad sebou. Navíc se k těmto zatížením přidává tíha od zavěšených článků. Celkový pohled na podlahu zespoda je na obrázku 22.



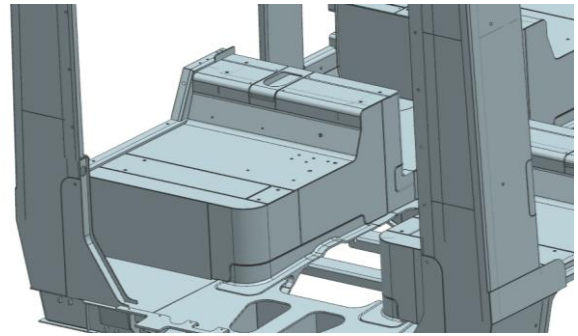
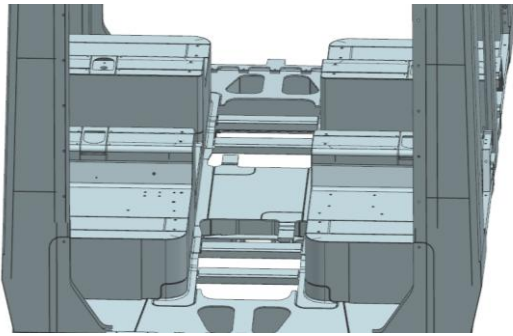
Obr. 22 Pohledy na podlahu středního článku. Na levém obrázku je celkový a na pravém detailnější zobrazení střední části podlahy.

Na obrázku 23 lze pozorovat celkový koncept podlahy včetně desky vypružení, konzoly tlumiče, desky dosedací, výztuhy, stojiny a další.



Obr. 23 Další detailní pohledy na části podlahy středního článku, která obsahuje neotočný podvozek.

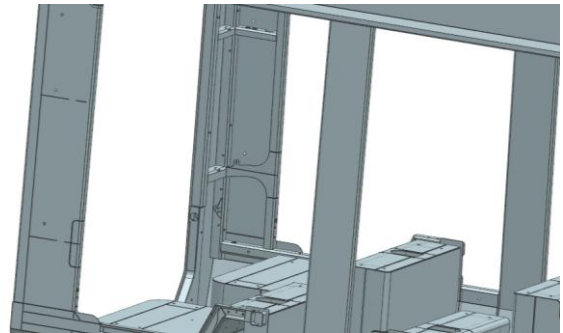
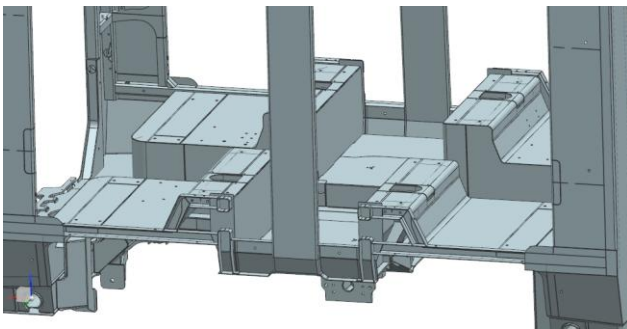
Na obrázku 24 je znázorněné řešení uličky a tvarovaných ploch po stranách. Tyto plochy jsou takto tvarované, protože se pod tímto článkem nachází podvozek. Konkrétně je pod těmito plochami prostor pro kola podvozku. Zároveň slouží pro umístění a upevnění sedadel. Šířka uličky je 606 mm.



Obr. 24 Pohledy na podlahu středního článku ze shora.

#### 4.1.2 Bočnice středního článku

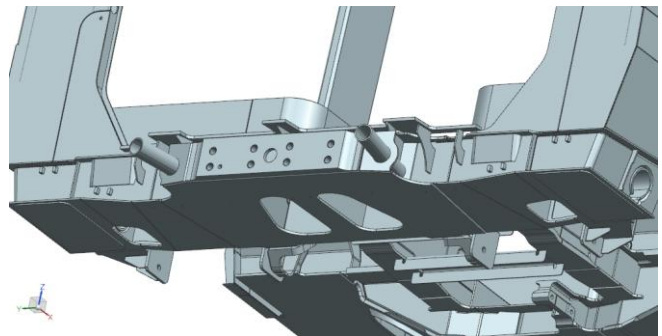
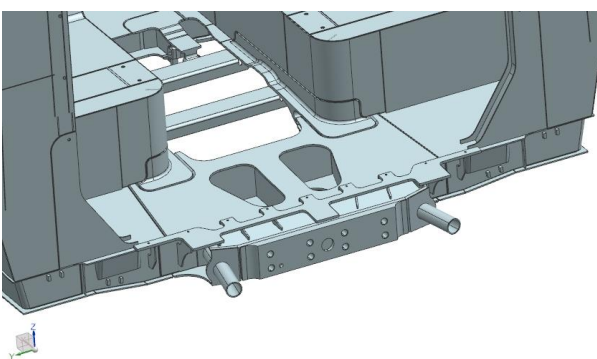
Bočnice tohoto článku se skládá ze dvou uzavřených obdélníkových O profilů umístěných uprostřed viz obrázek 25. Podlahu a střechu na krajích přidrží čelnice.



Obr. 25 Pohledy na provedení bočnic u středního článku.

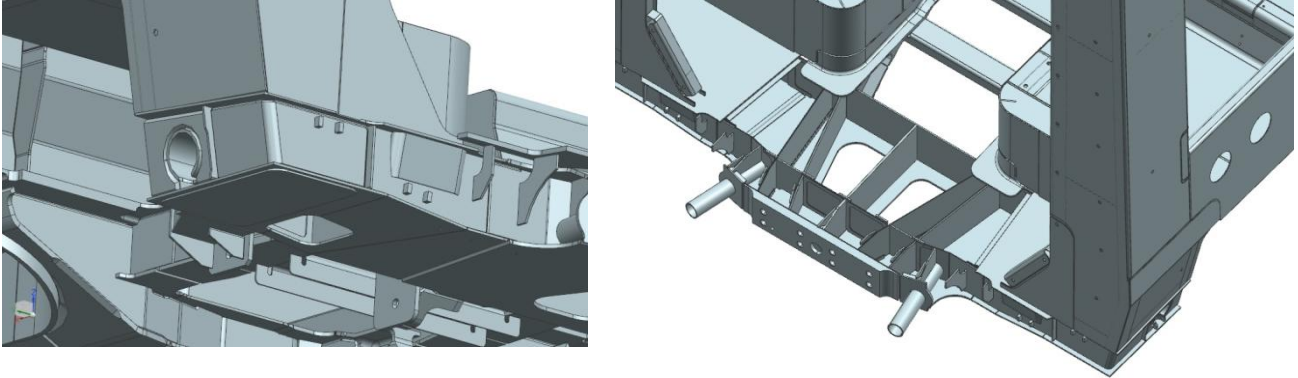
#### 4.1.3 Čelnice středního článku

Konstrukční řešení čelnice středního článku je znázorněno na obrázku 26. Spodní část čelnice se skládá ze středové části a dvou krajních. Tyto díly se dále skládají z horních a dolních pásnic, postranních pásnic, spojovací desky a pásnic umístěných uvnitř (viz obrázek 26). Na vrchní a spodní pásnici u středního dílu se nacházejí otvory pro snadnější manipulaci při výrobě, odlehčení atd.



Obr. 26 Pohledy na spodní část čelnice. Vlevo je pohled z vrchu a vpravo zespona.

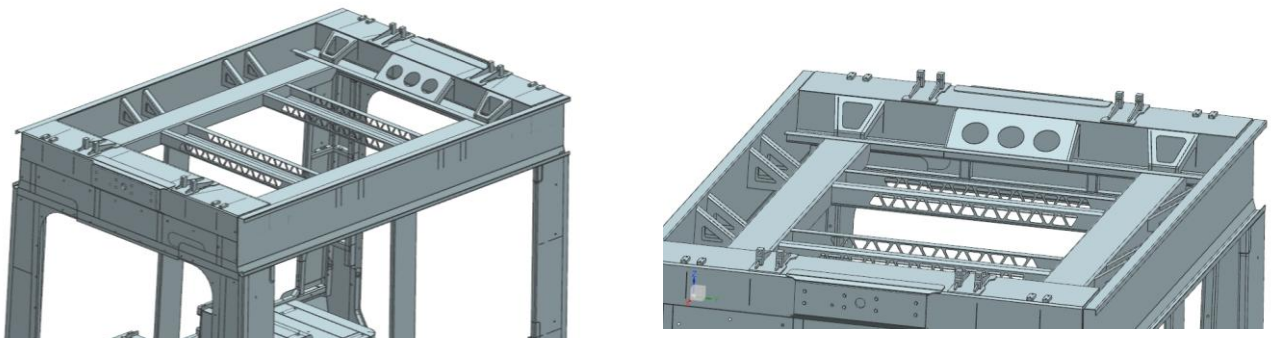
Na krajních dílech se z boku vyskytují otvory pro manipulaci s celým článkem (viz obrázek 27). Zároveň jsou k těmto dílům přivařeny sloupky. Při pohledu dovnitř středního čelníku je vidět rozmístění stojin přenášejících zatížení od spojovací desky, svarových podložek, žebér a navařovacích lišt.



Obr. 27 Další pohledy na spodní část čelnice středního článku. Vlevo je pohled z boku na krajní čelník a vpravo na vnitřek středního čelníku z vrchu.

#### 4.1.4 Střecha středního článku

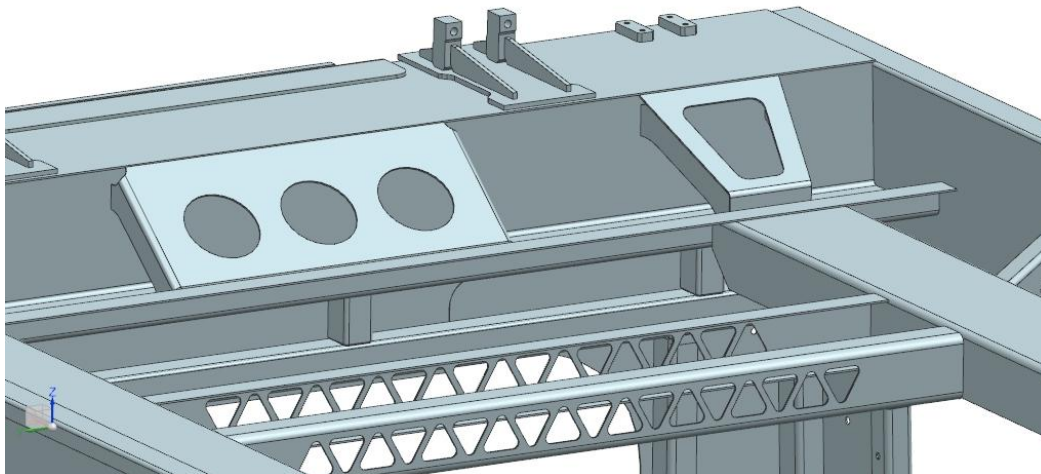
Střecha středního článku je tvořena dvěma páteřními podélnými nosníky s tvarem profilu U, sadou příčníků s profilem tvaru U a dvěma bočními kryty střechy po stranách s tvarem profilu C (viz obrázek 28).



Obr. 28 Pohledy na střechu středního článku.



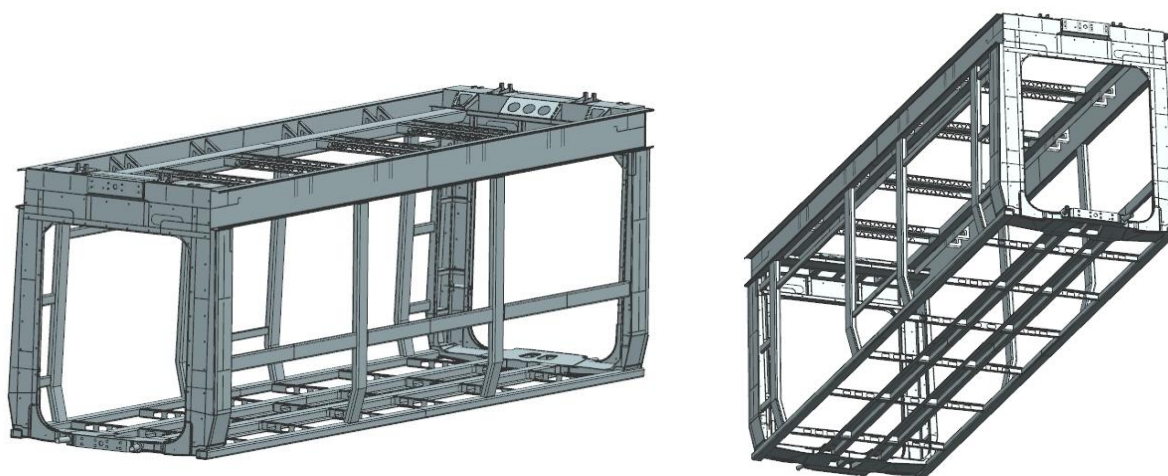
Na obrázku 29 lze vidět provedení držáku horních tlumičů umístěných na horní části čelnice, napojení horních páteřových nosníků na horní profil a výztuhy tohoto profilu.



Obr. 29 Detailnější pohled na spojení střechy s horní částí čelnice u středního článku.

## 4.2 Zavěšený článek

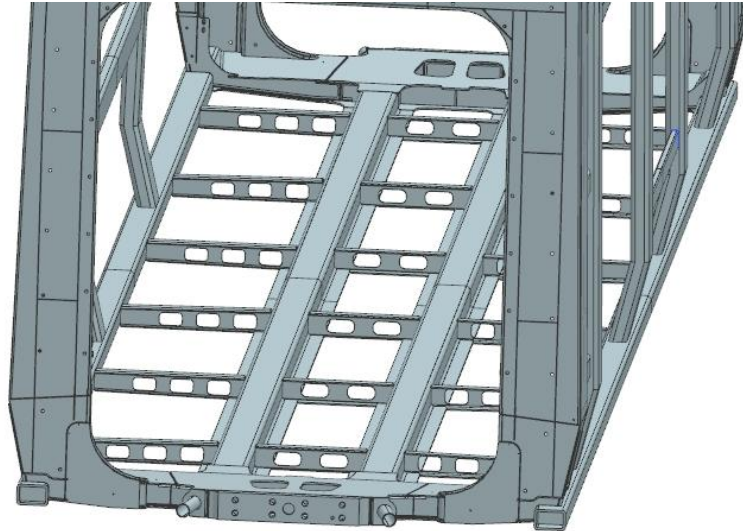
Zavěšený článek vybraného konceptu tramvaje se nachází mezi středním a krajními články. Jak název napovídá je na těchto člancích zavěšený. To znamená, že neobsahuje žádné podvozky. Celková délka zavěšeného článku přes spodní spojovací desky je 9057 mm, maximální šířka je 2460 mm, výška (vzdálenost podlahy od střechy) je 2640 mm a vzdálenost podlahy od temene kolejnice je 290 mm. Článek má dvoje dveře, obě umístěné na jedné straně a jeho celková hmotnost je 2752 kg. Jako materiál byla pro celý článek zvolena ocel ČSN 17 348. Tento článek lze vidět na obrázku 30.



Obr. 30 Celkové pohledy na zavěšený článek.

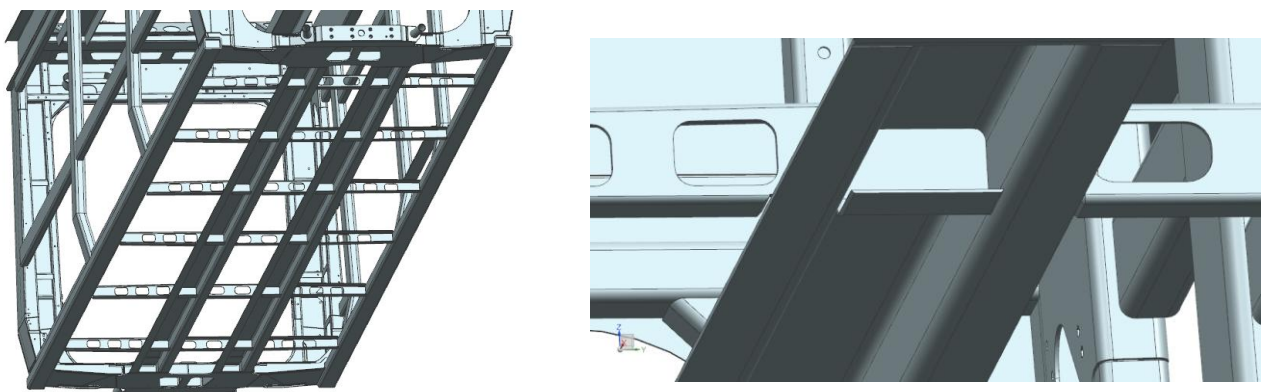
#### 4.2.1 Podlaha zavěšeného článku

Podlaha tohoto článku je tvořena dvěma podélnými nosníky tvaru omega uprostřed, dvěma uzavřenými podélnými nosníky po stranách. Mezi těmito podélníky jsou vloženy příčné s odlehčovacími otvory viz obrázek 31. Největší podíl přenášené podélné síly mají zmíněné omega nosníky, ta je v nich přenášena z jednoho čelníku na druhý.



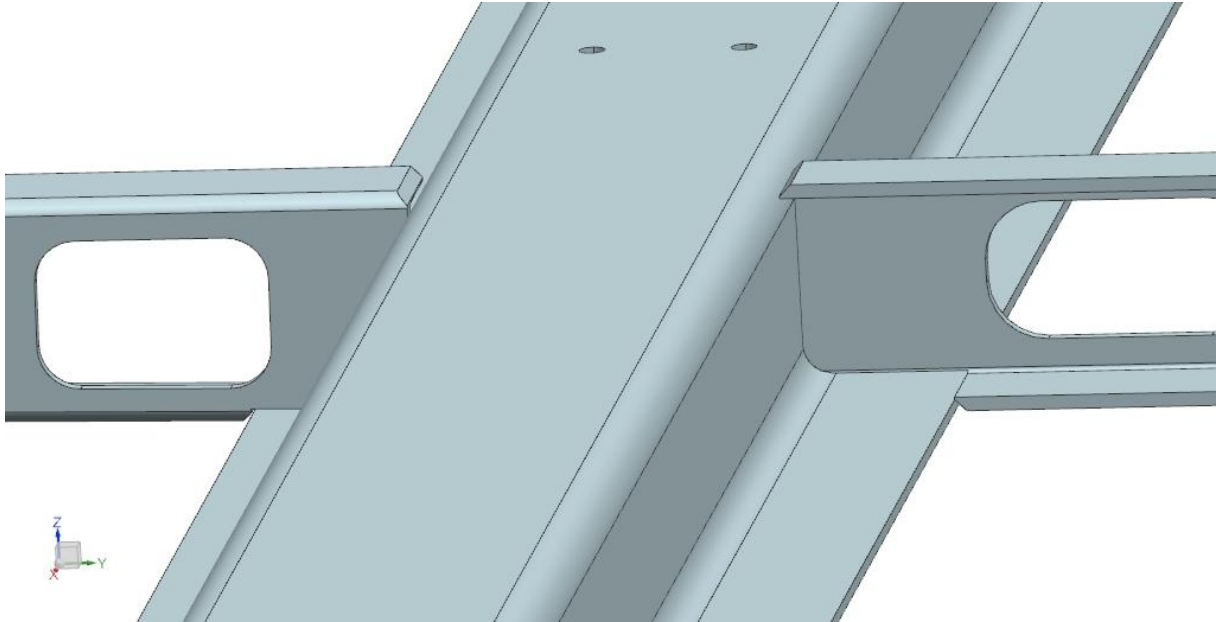
Obr. 31 Celkový pohled na podlahu zavěšeného článku z vrchu.

K vyztužení omega nosníků bylo použito 12 plechů tvaru L (6 na každý podélník). Jejich umístění a vložení do nosníků je vidět na obrázku 32. Jednotlivé příčné se od sebe liší v závislosti na tom, kde se nacházejí. Je zde 6 kratších mezi nosníky tvaru omega a 12 mezi postraními a omega nosníky celkem.



Obr. 32 Nalevo je celkový pohled na podlahu zavěšeného článku, napravo je detailnější pohled na vyztužení podélných nosníků.

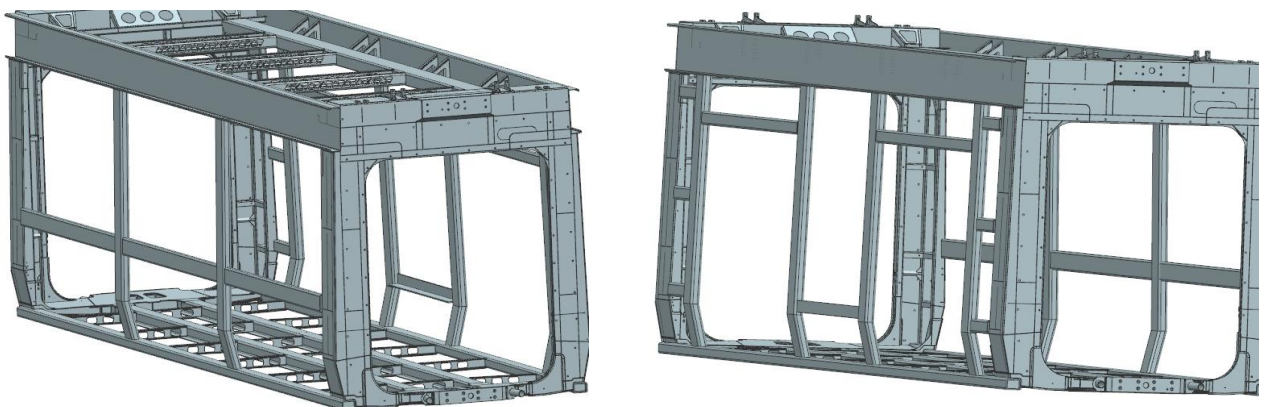
Na obrázku 33 je vidět konstrukční řešení příčníků, které jsou k podélníkům přivařeny. Potřebné hrany jsou sražené pro svařování a spodní strany příčníků jsou zkráceny, aby díly zapadaly do sebe.



Obr. 33 Detailnější pohled na spojení podélných nosníků s příčnými při pohledu ze shora.

#### 4.2.2 Bočnice zavěšeného článku

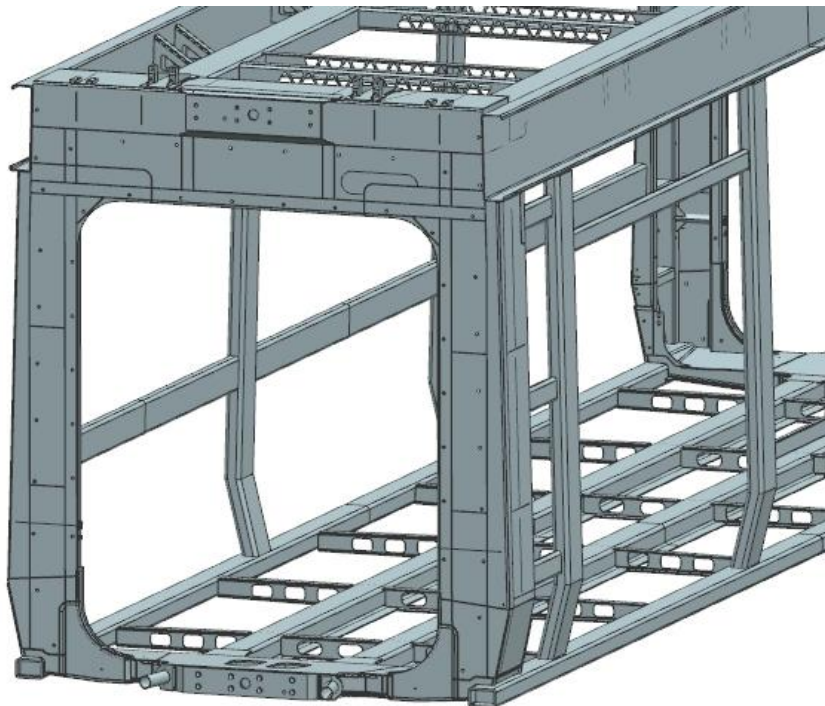
Bočnice zavěšených článků jsou tvořeny pomocí uzavřených O profilů, jak je znázorněno na obrázku 34. Tyto profily jsou k sobě navzájem přivařeny a zároveň jsou napojeny na ostatní části článku. Vzhledem k tomu, že výsledná tramvaj má dveře umístěné pouze na jedné straně, jsou obě bočnice různé. Zatímco na jedné straně jsou nosníky poskládané tak, aby zde byl prostor pro dvoje dveře, na druhé straně tomu tak není.



Obr. 34 Celkové pohledy na obě bočnice zavěšeného článku.

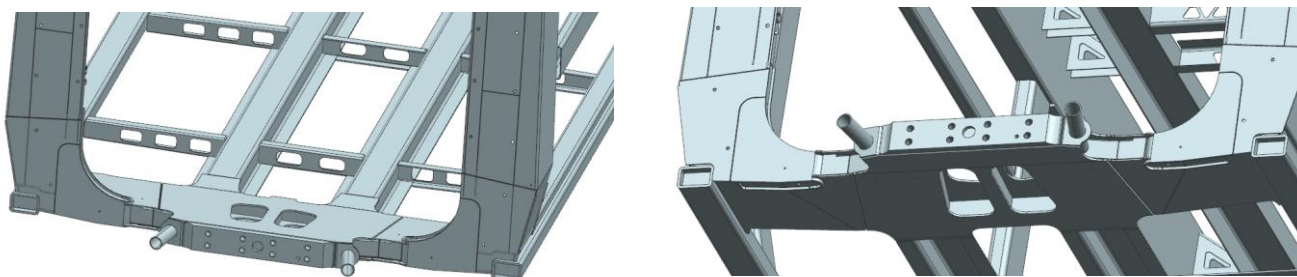
### 4.2.3 Čelnice zavěšeného článku

Čelnice zavěšeného článku je podobné konstrukce jako středního. Je tvořena spodními částmi, dvěma sloupky a horní částí. Tato sestava přenáší zatížení od středního a krajního článku na bočnice, podlahu a střechu. Navíc musí její příčný průřez splňovat podmínku obrysu pro vozidlo, to znamená, že jsou dané maximální šířky pro různé výšky v příčném průřezu. Z toho také vychází tvar čelnice znázorněný na obrázku 35.



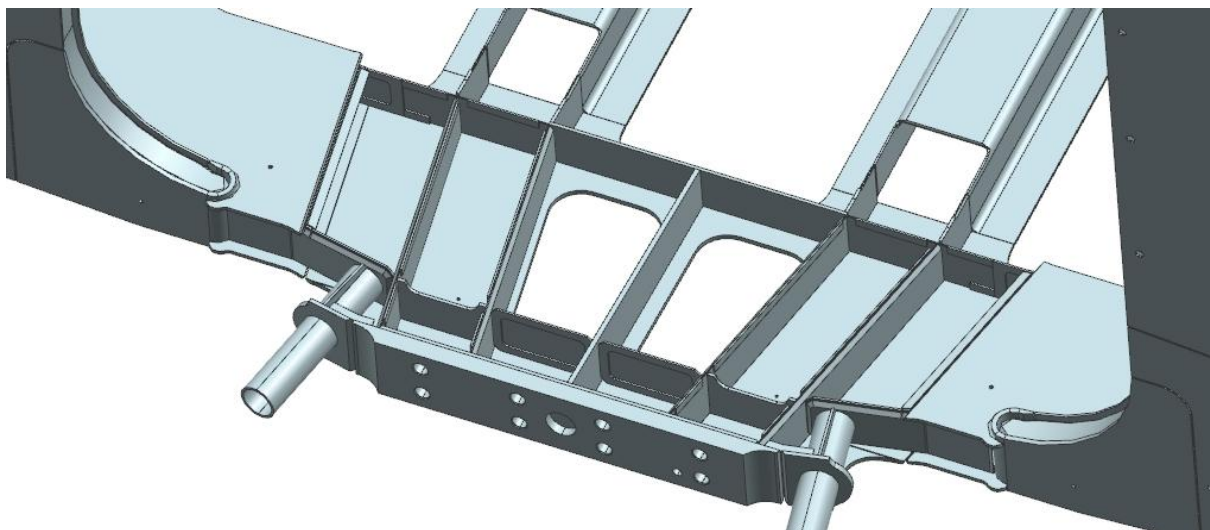
Obr. 35 Celkový pohled na čelnici zavěšeného článku zepředu.

Do spodní části čelnice zavěšeného článku můžeme zařadit střední čelník a 2 krajní čelníky. Střední čelník se skládá z vrchní a spodní pásnice, soustavy pásnic uvnitř čelníku, trubkami narážek, svarových podložek a čelní desky, která přenáší zatěžovací síly od ostatních článků. Veškeré hrany určené pro svařování jsou sraženy, vrchní a spodní pásnice mají dva velké otvory z výrobních důvodů. Tento střední díl je svařen s krajními čelníky a dvěma podélnými nosníky tvaru omega. Detailnější pohled je na obrázku 36.



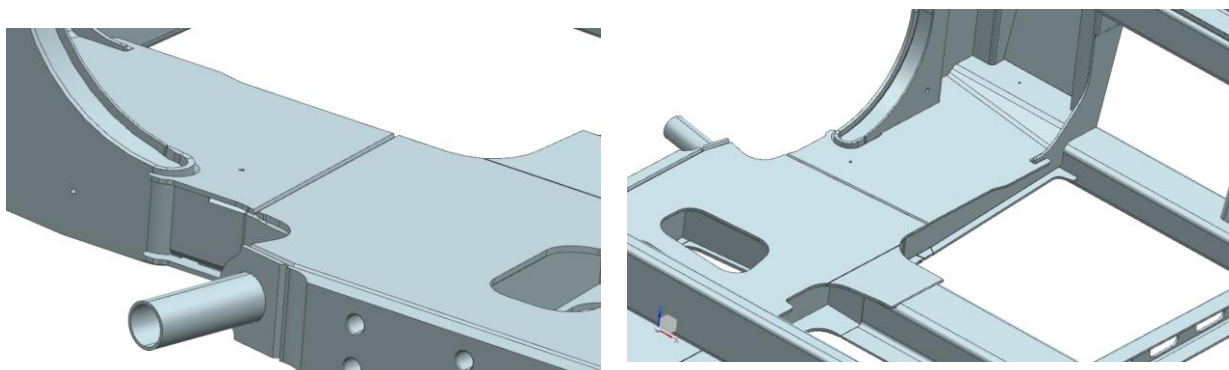
Obr. 36 Pohledy na vršek (vlevo) a spodek (vpravo) spodní části čelníku zavěšeného článku.

Na obrázku 37 je pohled do vnitřku středního čelníku.



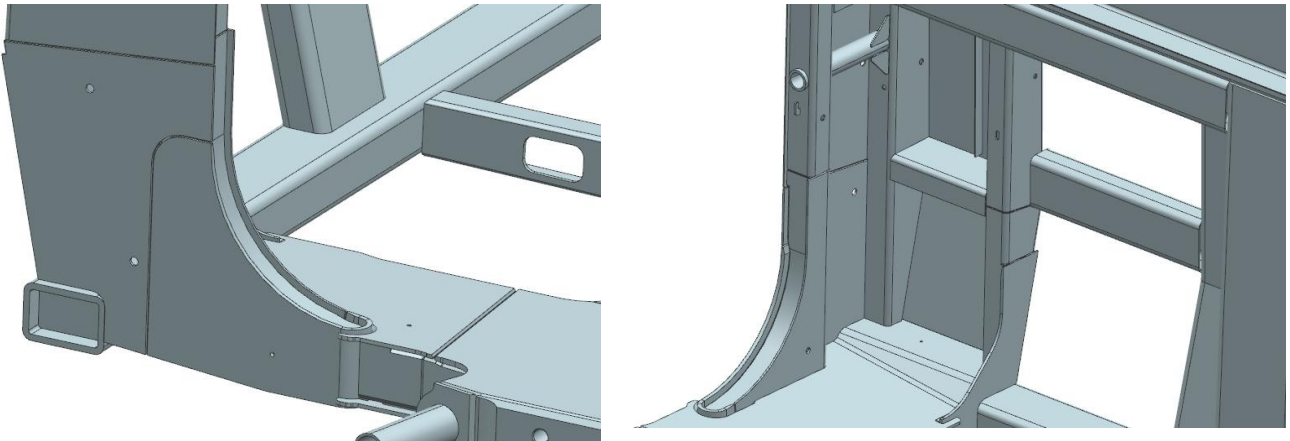
**Obr. 37** Pohled na vnitřek středního čelníku spodní části zavěšeného článku.

Dalšími součástmi spodku čelnice jsou 2 krajní čelníky. Stejně jako střední čelník, i tyto díly jsou tvořeny vrchní a spodní pásovinou a soustavou bočních stojin. Všechny části jsou k sobě přivařeny, svarové hrany jsou sražené. Tyto součásti spojují střední čelník, sloupky čelnice a postraní podélné nosníky podlahy. Veškerá spojení s těmito částmi jsou znázorněna na obrázku 38.

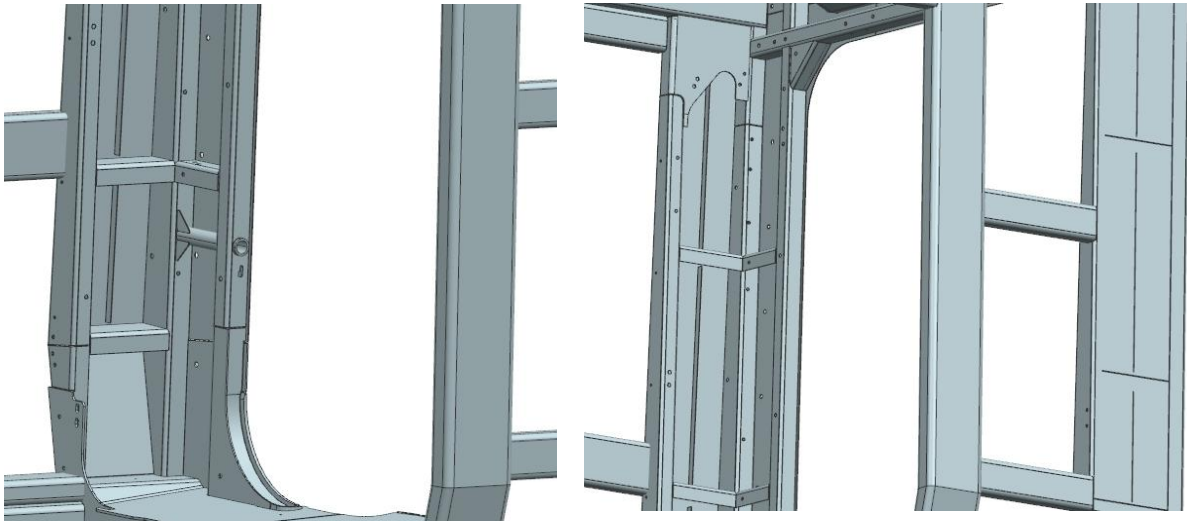


**Obr. 38** Detailnější pohledy na spojení středního a krajního čelníku spodní části čelnice zavěšeného článku.

Sloupky čelnice jednak spojují spodní čelnici s horní a jednak přenášejí zatížení mezi nimi, potažmo mezi střešou a podlahou. Navíc je žádoucí, aby vzdálenosti mezi nimi byly dostatečně velké k zajištění snadného průchodu cestujících, ale zároveň nesmí překročit povolené limity. Z těchto důvodů jsou sloupky relativně tvarově složité. Celkový tvar je vidět na obrázku 39 a 40. Veškeré výztuhy znázorněné na vnitřní straně sloupku slouží k zvýšení jeho tuhosti.

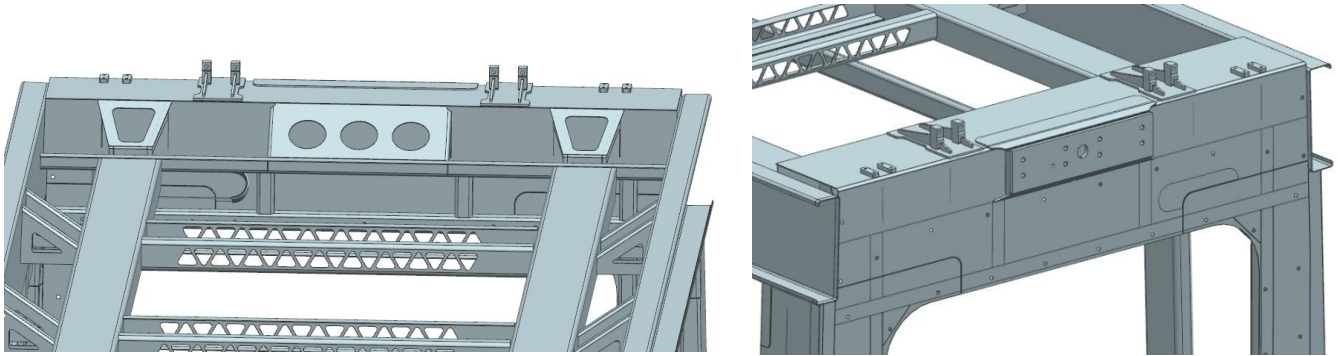


Obr. 39 Detailnější pohledy spojení sloupku čelnice s krajním čelníkem spodní části čelníku zavěšeného článku. Nalevo je vidět pohled z vnější strany článku, napravo z vnitřní.

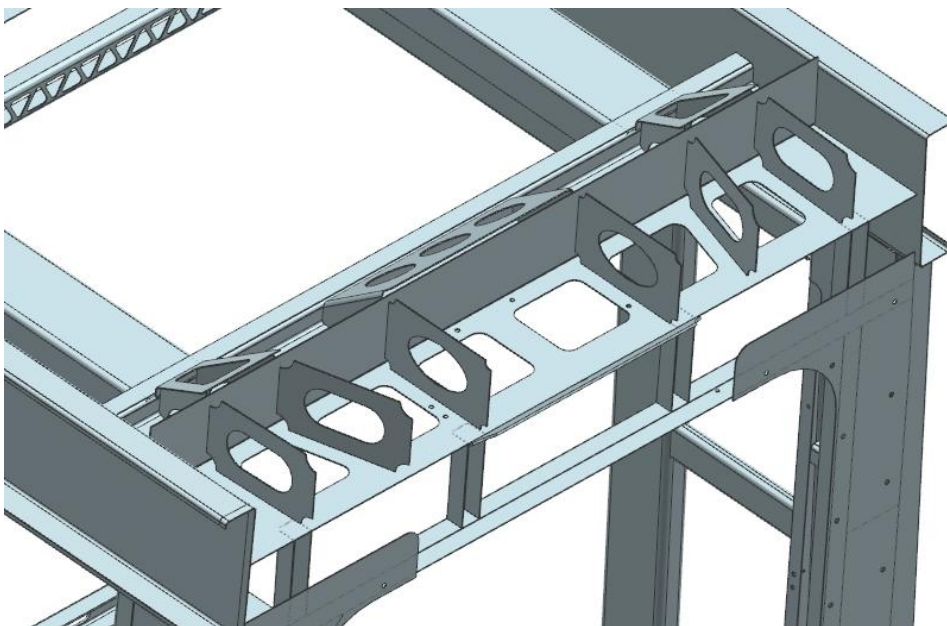


Obr. 40 Detailnější pohledy na vnitřní stranu sloupku, konkrétně na jeho výztuhy.

Horní část čelníku se skládá z profilů, které ji spojují s ostatními částmi, držáku tlumičů, deskami spojení přenášející zatížení od ostatních článků, žeber mezi deskou spojení, stojinami, soustavou vyztužujících U trubek a rohovníky. Zatížení je přenášeno z desky na stojiny, z nich na plech s žebry a z nich na podélné nosníky střechy. Horní část čelnice lze vidět na obrázcích 41 a 42.



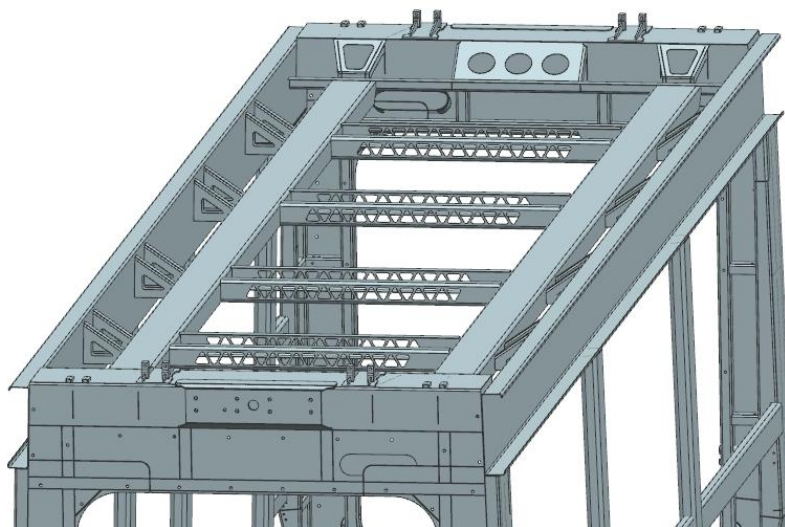
Obr. 41 Pohledy na horní část čelnice zavěšeného článku.



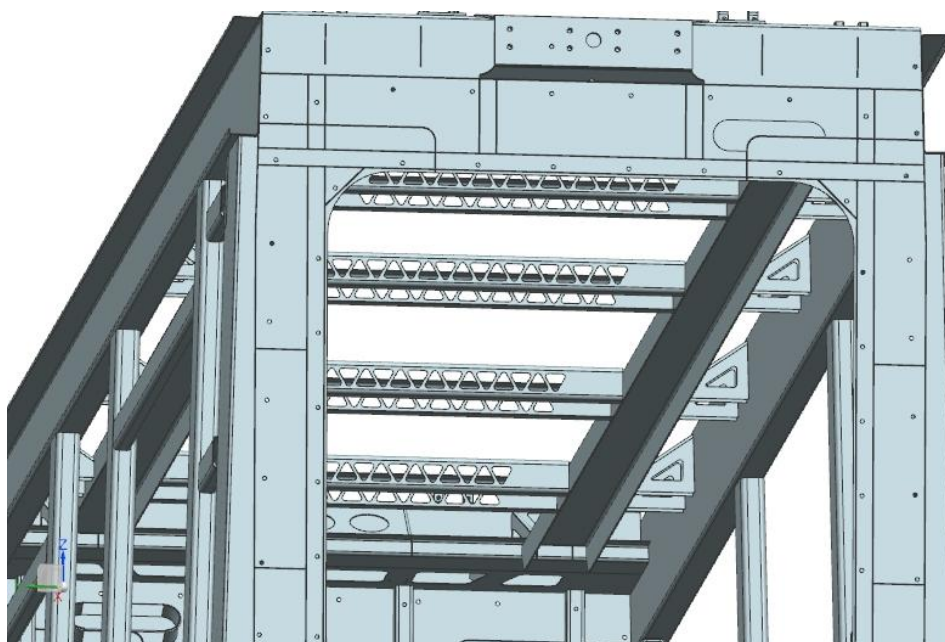
Obr. 42 Pohled na vnitřek horní části čelnice zavěšeného článku. Konkrétně na rozmístění vyztužujících žebor.

#### 4.2.4 Střecha zavěšeného článku

Střecha zavěšeného článku je tvořena dvěma podélnými nosníky s tvarem profilu U přenášející velkou část zatížení procházející střechou, dvěma bočními kryty střechy a soustavou příčníků a kružin. Příčnky jsou profily tvaru U a mají po své délce trojúhelníková vybrání k snížení hmotnosti. Kružiny spojují boční kryty střechy s podélnými nosníky a stejně jako příčnky také mají vybrání k snížení hmotnosti. Střecha je přivařena k čelnicím a uzavírá skříň článku. Navíc slouží i jako místo pro umístění různých agregátů. Celkový pohled na střechu je vidět na obrázcích 43 a 44.



**Obr. 43** Pohled na střechu zavěšeného článku ze shora.



**Obr. 44** Pohled na střechu zavěšeného článku zespoda.

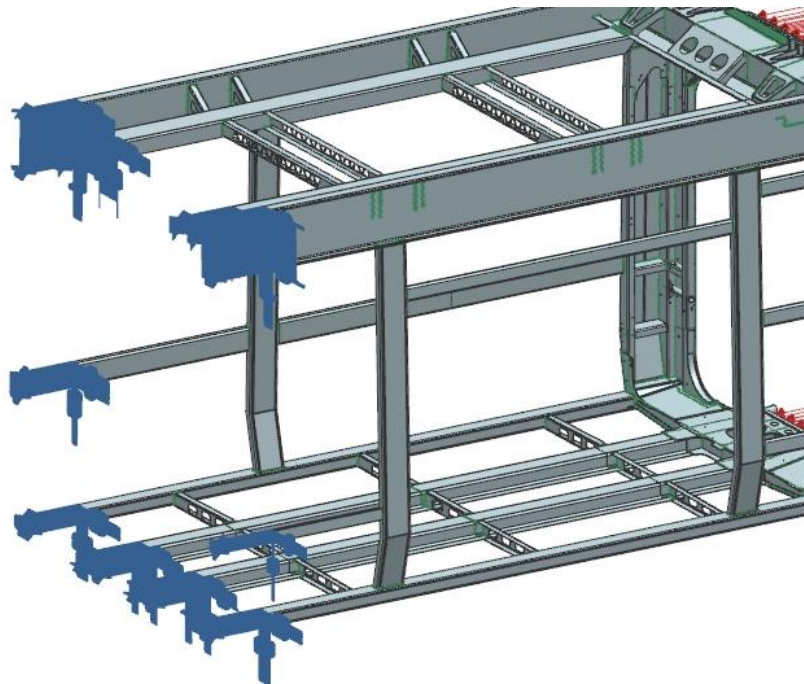


## 5 Pevnostní výpočet

Pevnostnímu výpočtu pro statické zatížení byl vystaven zavěšený článek. Vzhledem k velkému množství součástí, které tato sestava obsahuje, by byl ruční výpočet velmi nepraktický. Z tohoto důvodu byl proveden výpočet pomocí metody MKP v softwaru NX Unigraphics 8.5.

### 5.1 Počáteční podmínky výpočtu

Prvotní podmínkou pro výpočet je uchycení modelu. Vzhledem k tomu, že se jedná o zavěšený článek, bude se uchycení ve svislém směru (odebrání stupně volnosti) nacházet až v místě, kde by při spojené tramvaji byl střed podvozku středního článku. Tím se zvýší délka ramene a tím pádem i velikost ohybového momentu a výsledné ohybové napětí. Příčný posuv bude odebrán ve spojovacích deskách společně se všemi rotacemi. Posuv v podélném směru bude odebrán v plochách rovině symetrie, navíc zde k docílení toho, aby se tyto plochy pohybovaly v této rovině, budou odebrány rotace v příčném a svislém směru (viz obrázek 45).



Obr. 45 Pohled na odebrání stupňů volnosti v rovině symetrie.

Vzhledem k tomu, že tento výpočet simuluje statickou pevnostní zkoušku předepsanou normou, jsou působící síly jasně definované. A to jak jejich velikost tak i působiště. Působiště podélných sil bude v tomto případě působit kolmo na plochy spojovacích desek a celková velikost těchto sil pro tramvaj v podélném směru je  $F_x=200$  kN. Další složkou je velikost svislého zatížení  $F_y$ , která zde působí společně s gravitačním zatížením (viz níže). Bude se tedy jednat o kombinované zatížení. Zmíněné složky a způsoby počítání jsou uvedeny ve zdroji [2].

$$F_x = 200 \text{ kN}$$

$$F_y = g * (m_1 + m_2)$$

kde

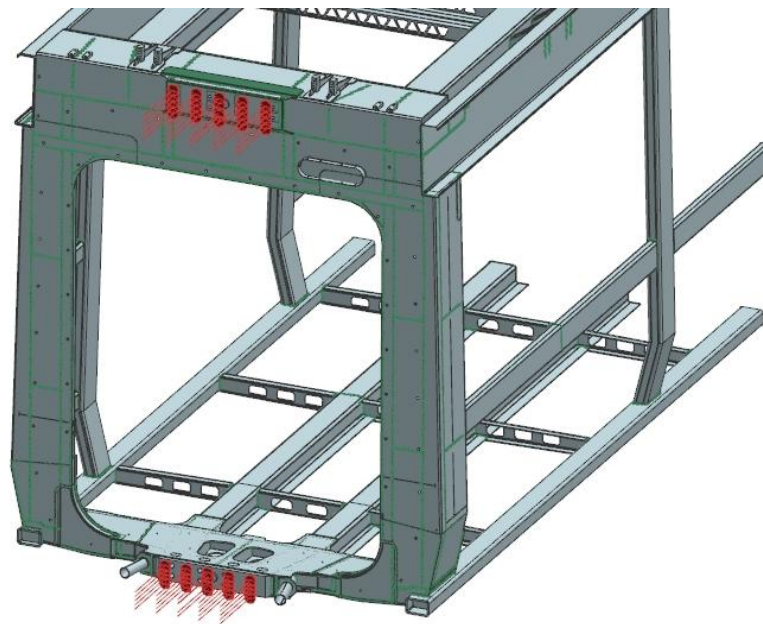
$F_x$  ... tlaková síla v úrovni nárazníků

$F_y$  ... svislé statické zatížení při současném použití podélného

$g$  ... gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$m_1$  ... hmotnost skříně v vozidla v pohotovostním stavu, v tomto případě 2792 kg

$m_2$  ... maximální hmotnost nákladu, v tomto případě 2100 kg [2]

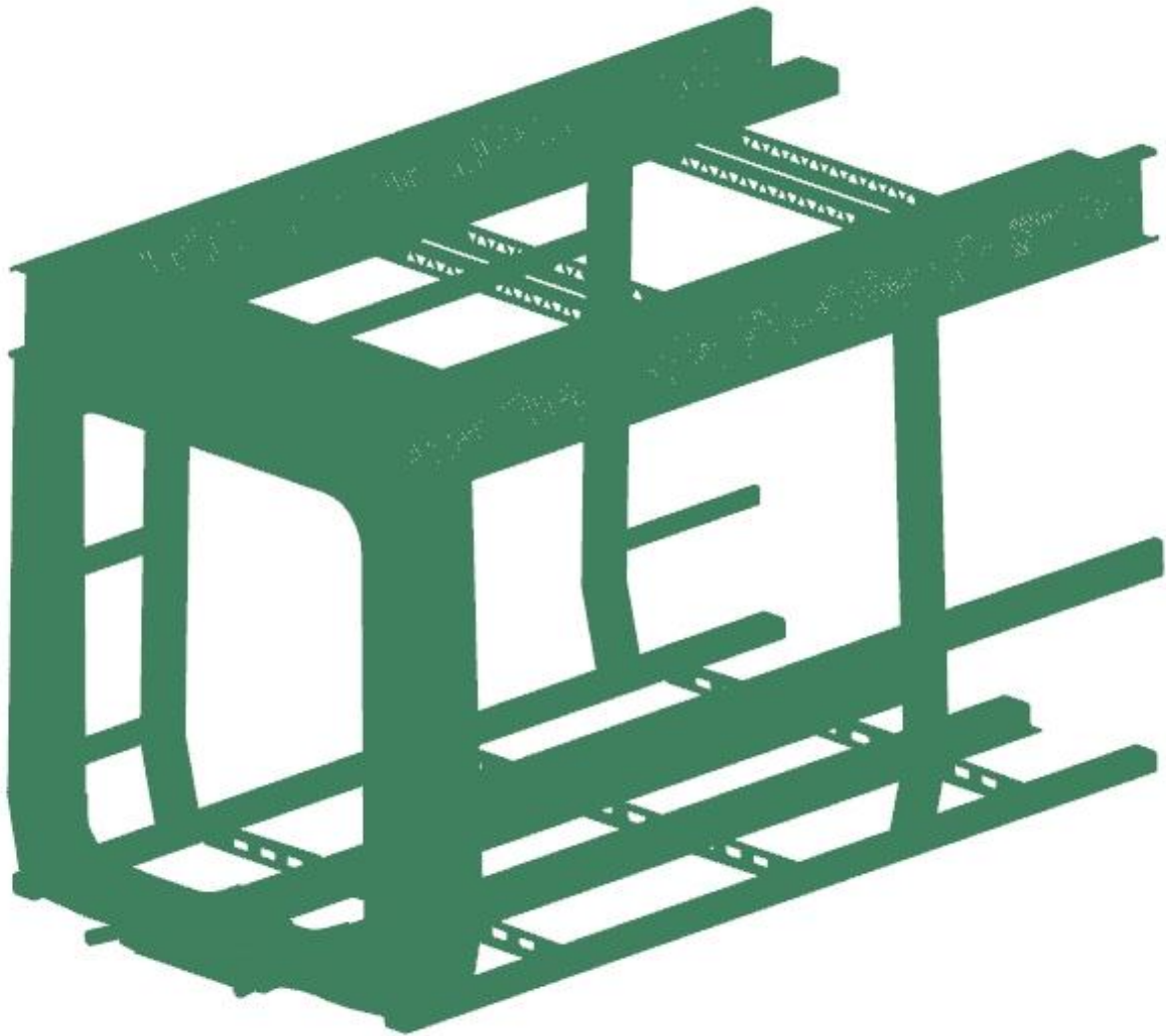


Obr. 46 Pohled na působiště podélných sil.

## 5.2 Příprava modelu

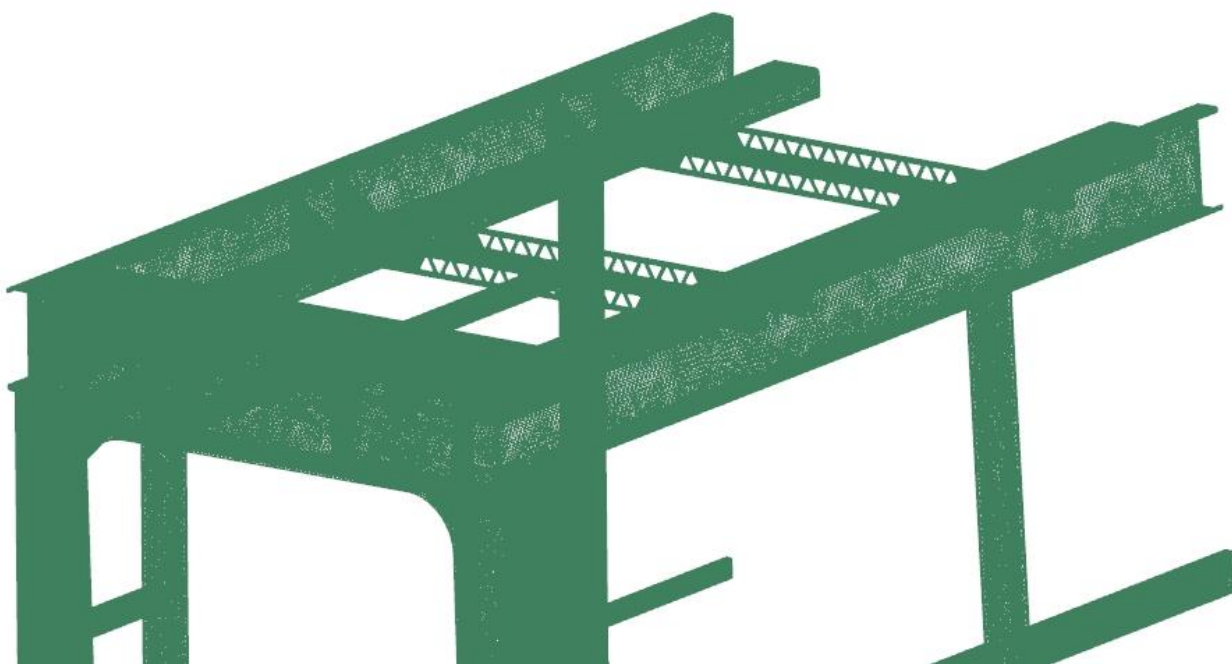
Aby bylo možné provést MKP analýzu pomocí CADu, je nutné na vytvořený model aplikovat vhodnou síť. Jednak se požaduje relativní jednoduchost pro rychlé výsledky a jednak určitá kvalita k získání co nejobjektivnějších výsledků. Tyto požadavky jsou protichůdné a nelze mít oba maximálně splněny najednou. Je žádoucí najít vhodnou kombinaci mezi nimi. Pro případ této analýzy byla zvolena varianta mít spíše kvalitnější síť i za cenu složitějších výpočtů. Materiálové parametry jako modul pružnosti, Poissonovo číslo a další byly vzaty z knihovny materiálů v CADu NX Unigraphics 8.5 Síť je zobrazena na obrázku 47.

Důležité je také zmínit, že sestava model se skládá z mnoha dílů, které jsou ve skutečnosti mezi sebou svařeny. Zahnutí takového množství svarů do výpočtů by bylo velmi náročné na přípravu modelu, výpočtové schopnosti počítače i na délku samotného výpočtu, který by se zásadně prodloužil. Z těchto důvodů byly veškeré svarové spoje nahrazeny jednoduchými spojeními kontaktních ploch, konkrétně propojením jednotlivých uzlových bodů mezi těmito plochami. Toto zjednodušení vnáší do výpočtu nepřesnosti, které je třeba brát na vědomí při vyhodnocování výsledků.



**Obr. 47** Pohled na síť celé sestavy počítaného modelu.

Na následujících obrázcích 48 a 49 jsou vidět pohledy na síť v horní a spodní části sestavy.



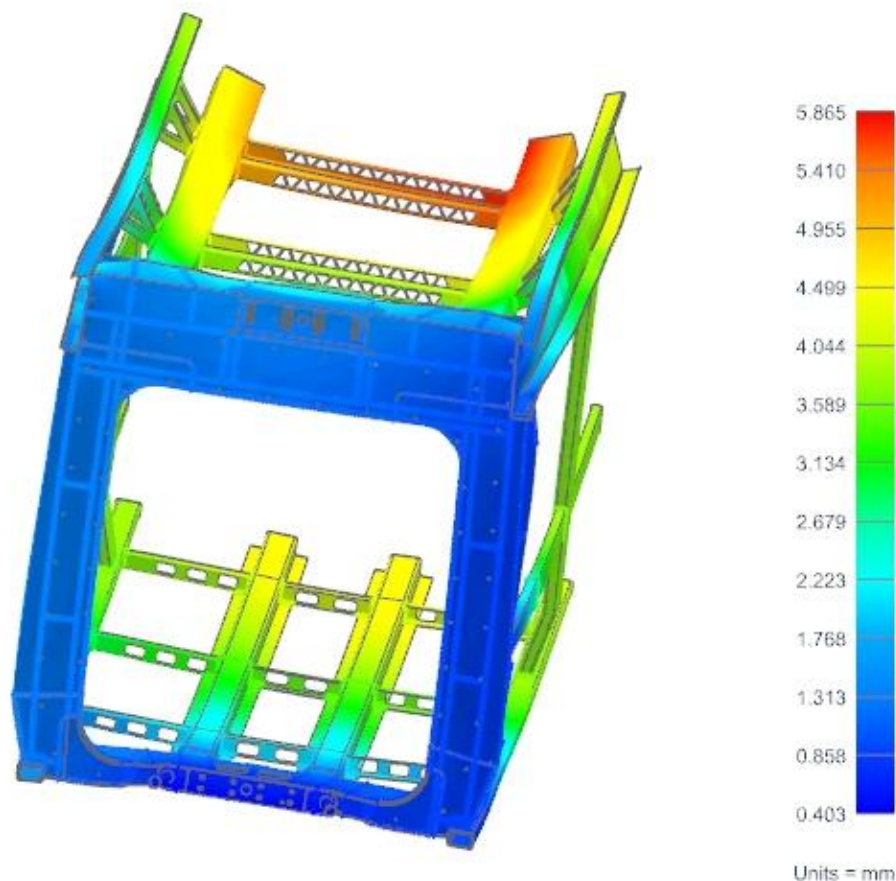
Obr. 48 Pohled na síť ve střeše a horních částech čelnice a bočnice.



Obr. 49 Pohled na síť v podlaze a spodní části čelnice.

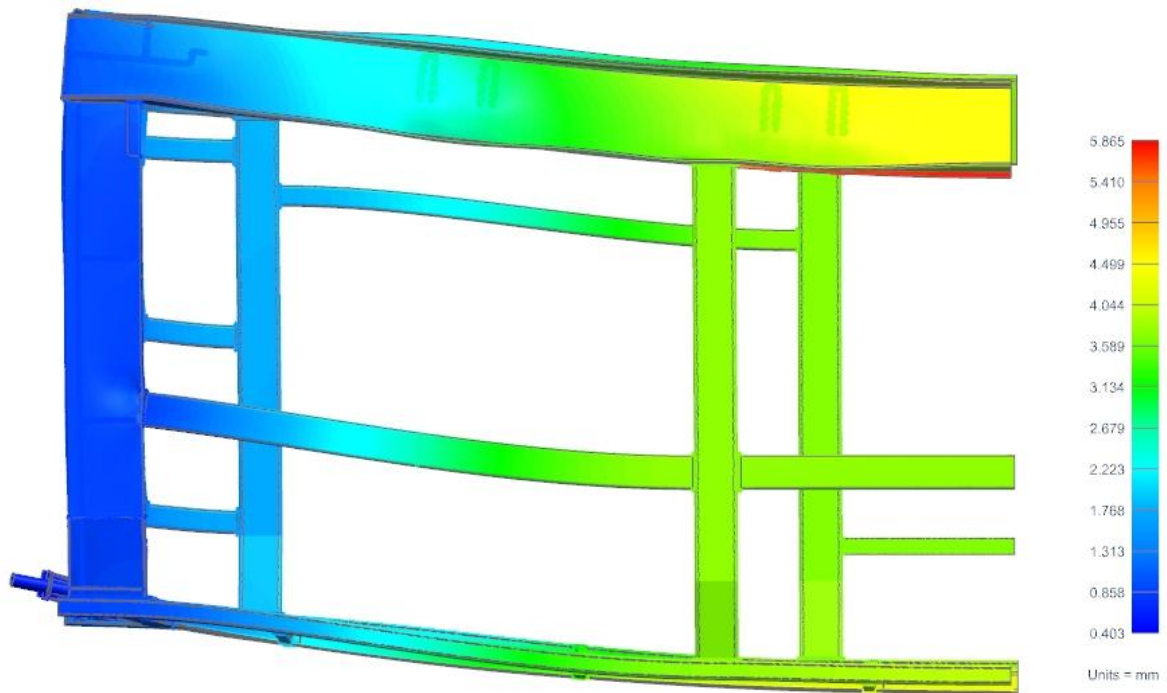
### 5.3 Výsledky analýzy pomocí MKP - deformace

Z výsledků deformační analýzy je patrné, že maximální hodnota deformace je zhruba 5,86 mm. A to konkrétně ve střeše v místě spojení střešního podélného nosníku s příčným (viz obrázek ). Průměrná hodnota deformace v rovině symetrie se pohybuje mezi 4 - 5 mm. To lze u této analýzy považovat za přijatelné. Nejmenších hodnot deformace se dosahuje čelníci. Je to logické, neboť tato podsestava má na rozdíl od ostatních nejkratší ramena působí sil.



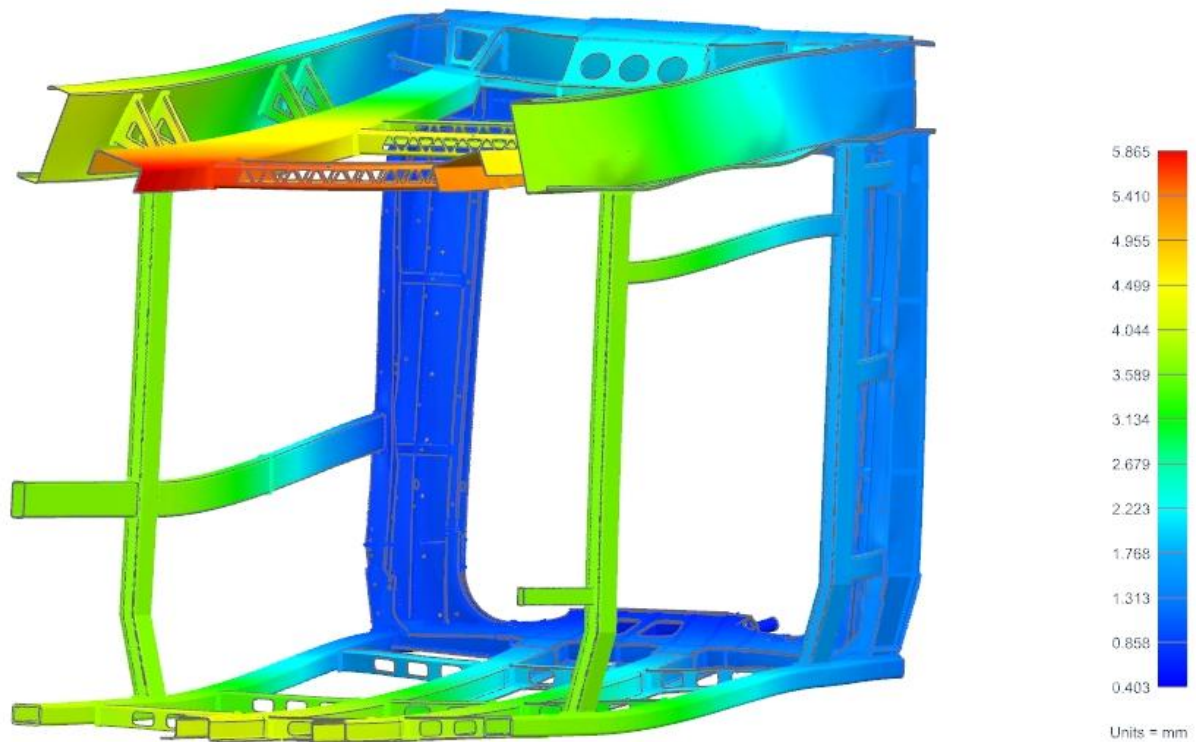
Obr. 50 Celkový pohled na výsledky deformační analýzy s barevnou a číselnou stupnicí.

Dalším důležitým faktorem je průhyb podlahy ve středu článku, neboť zde bude maximální. Ze simulace a obrázku lze vyčíst, že tato hodnota nepřekročí 4,5 mm. To je dostatečná hodnota. Zároveň si lze všimnout, že průhyb nosníků uprostřed článku se od těch krajních mírně liší a to zhruba 0,8 mm, což lze vzhledem velikostním rozměrům modelu brát jako zanedbatelnou hodnotu.



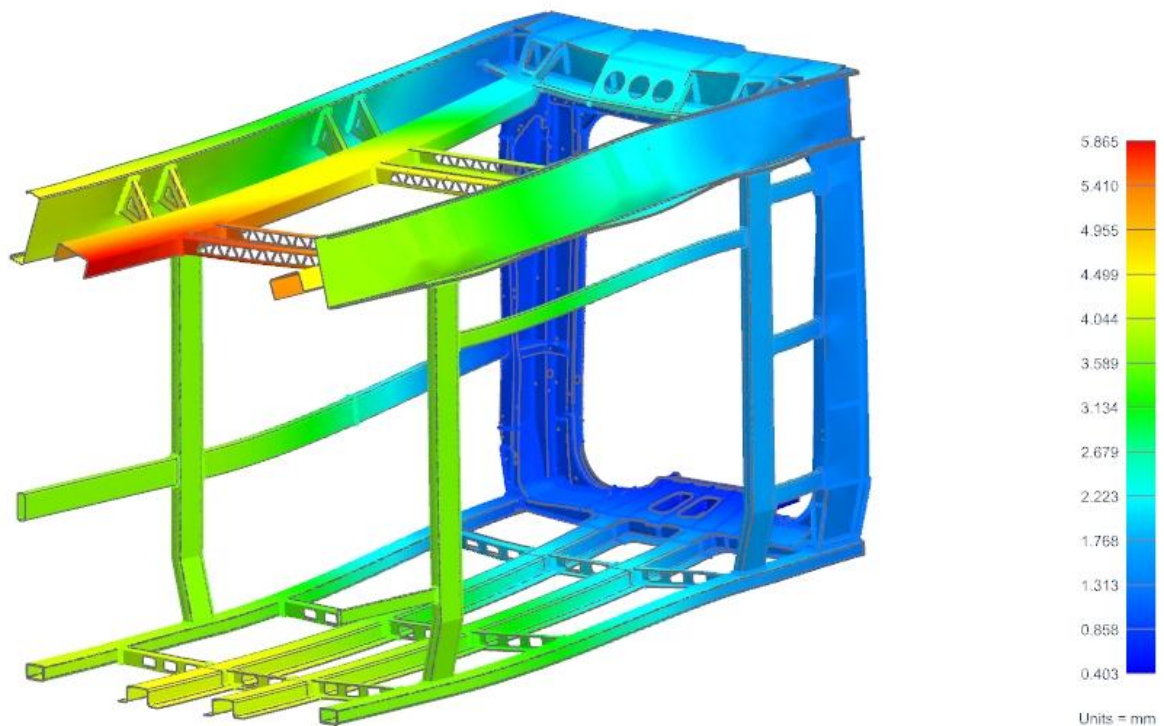
**Obr. 51** Bokorysný pohled na model s barevnou a číselnou stupnicí.

Velmi důležitou sledovanou oblastí této analýzy jsou deformace v dveřním prostoru. V těchto místech je zapotřebí, aby jednotlivé součásti měly neustále pokud možno minimální deformace a to i při plném zatížení. V opačném případě by byla ohrožena správná funkčnost dveří. Z výsledků vyplynulo, že maximální hodnota činí necelých 0,6 mm, což se dá považovat přijatelnou hodnotu. To lze pozorovat na obrázku 52, na kterém si také můžeme všimnout, jak se budou deformovat boční kryty střechy, ty ale v rámci statické pevnosti plní spíše podpůrnou roli a tudíž není třeba jejich průhyby a kroucení klást příliš velký důraz. Maximální hodnota jejich deformace je přibližně 3,1 mm.



Obr. 52 Pohled na výsledky deformační analýzy se zřetelem na oblast dveřního prostoru s barevnou a číselnou stupnicí.

Celkově se dá konstatovat, že výsledky deformační analýzy vyšly příznivě. Na obrázku 53 lze vidět další pohled na celou sestavu.



Obr. 53 Celkový pohled na sestavu modelu s výsledky deformační analýzy s barevnou a číselnou stupnicí.

#### 5.4 Výsledky analýzy pomocí MKP- napětí

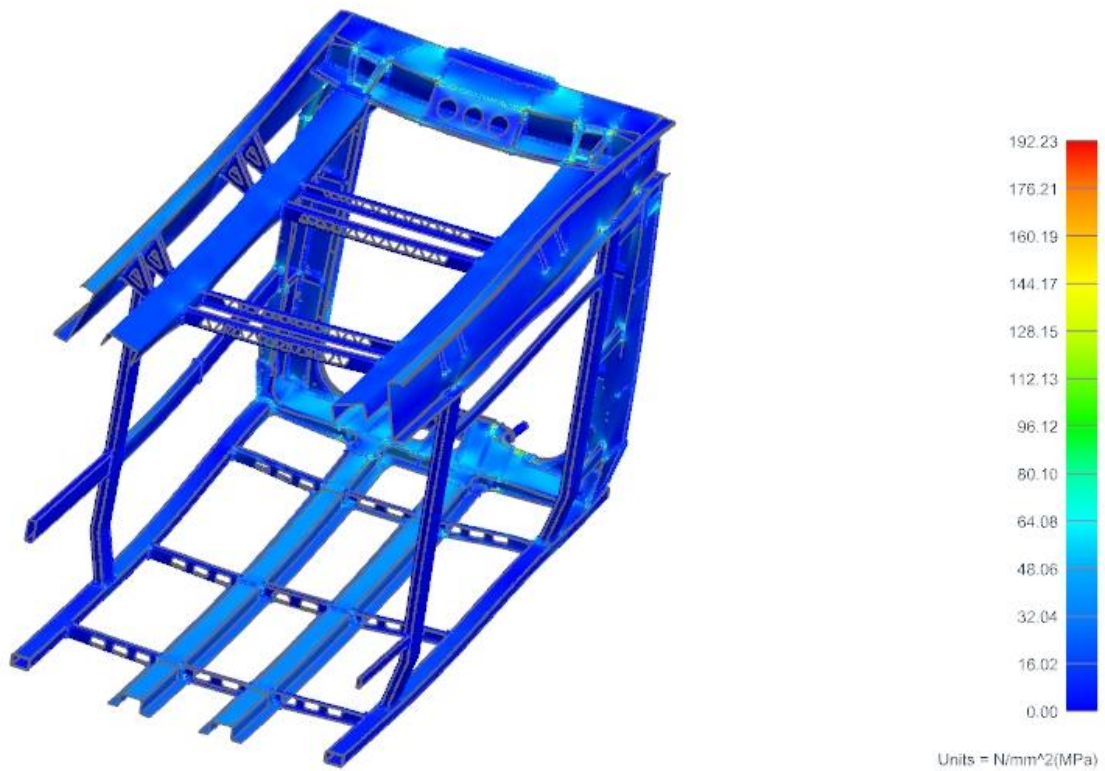
Na rozdíl od deformačních je třeba tyto výsledky brát se zřetelem na zjednodušení zmíněná v kapitole 5.2. To znamená, že v místech spojů mezi jednotlivými díly budou skokově zvýšená napětí, která ovšem nelze brát jako relevantní. Z tohoto důvodu je velmi obtížné určit maximální hodnotu a její výskyt. Při posuzování výsledků se proto budeme zaměřovat pouze na některé oblasti. Na obrázku 54 jsou vidět výsledky napěťové analýzy pro celou sestavu.



Obr. 54 Celkový pohled na výsledky napěťové analýzy pro celou sestavu s barevnou a číselnou stupnicí.

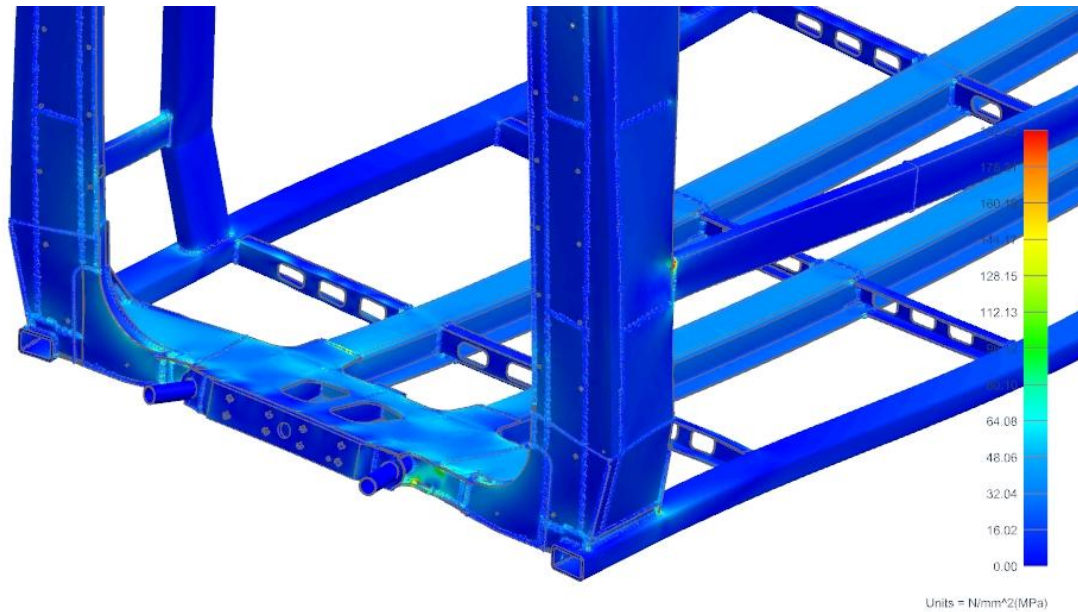
Pokud tedy opomineme zmíněná místa spojů, dá se konstatovat, že maximální napětí bude okolo 80 MPa a bude se nacházet v oblasti středního čelníku v spodní části čelnice. Dále lze vyvodit, že u součástí bočnice a krajních podélných nosníků podlahy nepřesáhne maximální napětí 25 MPa. Zato v čelnici se rozsah výsledných napětí pohybuje v relativně širokém rozmezí od 5 do zmíněných 80 MPa. Toto rozpětí se dá pozorovat i v horní části čelnice, jak lze vidět na obrázku 55.





Obr. 55 Horní pohled na sestavu výsledků napěťové analýzy s barevnou a číselnou stupnicí.

Na dalším obrázku 56 lze pozorovat, jak se napětí šíří od spojovací desky k podélným nosníkům a to konkrétně v horní pásnici středního čelníku. Ve spodní pásnici to probíhá podobně. V součástech vnitřku středního čelníku jsou výsledná napětí nižší oproti pásnicím.

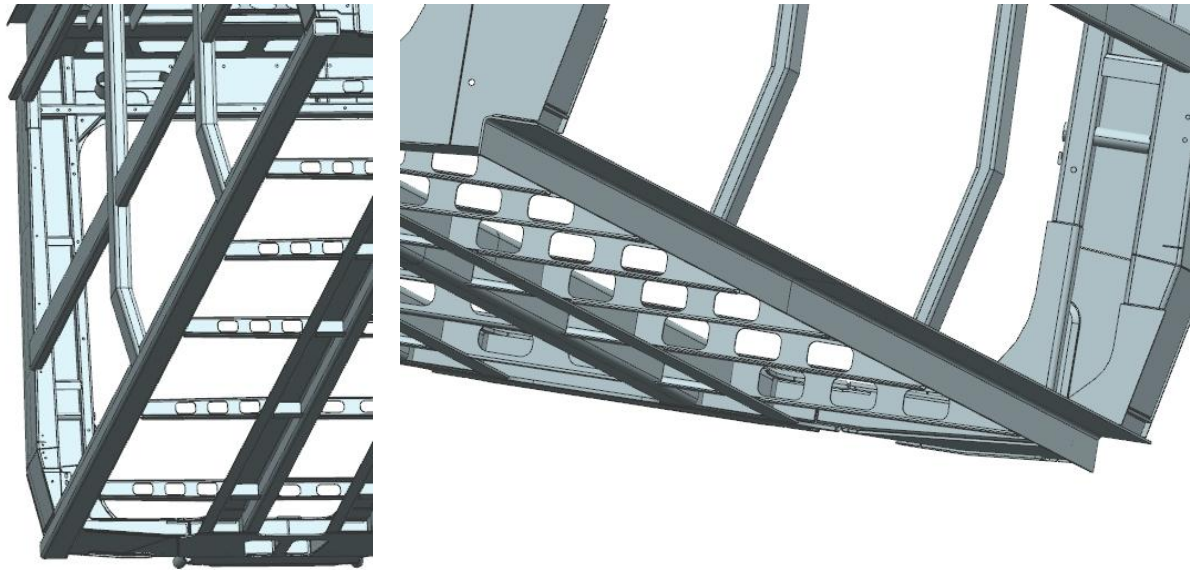


Obr. 56 Detailnější pohled na výsledky napěťové analýzy spodní části čelnice s barevnou a číselnou stupnicí.

## 5.5 Návrhy úprav na základě výsledků

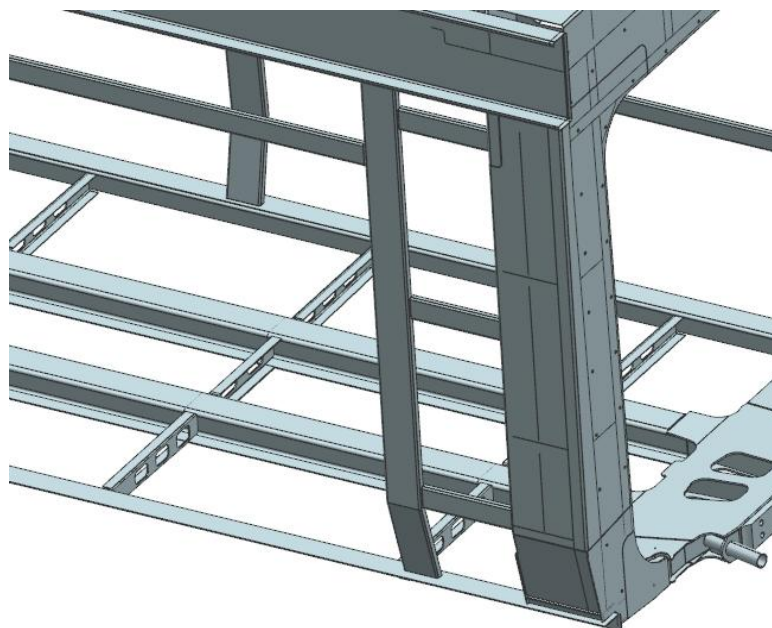
Na základě výsledků z kapitol 5.3 a 5.4 zde budou navrženy některé konstrukční změny vybraných součástí sestavy. Ty budou nadále podrobeny další simulaci a porovnány s prvotní analýzou. Hlavním bylo snížení hmotnosti. Po provedení jednotlivých je celková hmotnost 2362 kg.

Na obrázku 57 lze vidět krajní podélný nosník podlahy tak, jak je se nachází v současném model a jeho teoreticky modifikaci. Tato změna byla provedena za účelem snížení hmotnosti při zachování dostatečné tuhosti nosníku. Vzhledem k tomu, že z výsledků výpočtové analýzy pro tuto součást vyplývá relativně nízká hodnota maximálního napětí a deformace, dá se předpokládat, že to je přijatelný zásah do konstrukce.



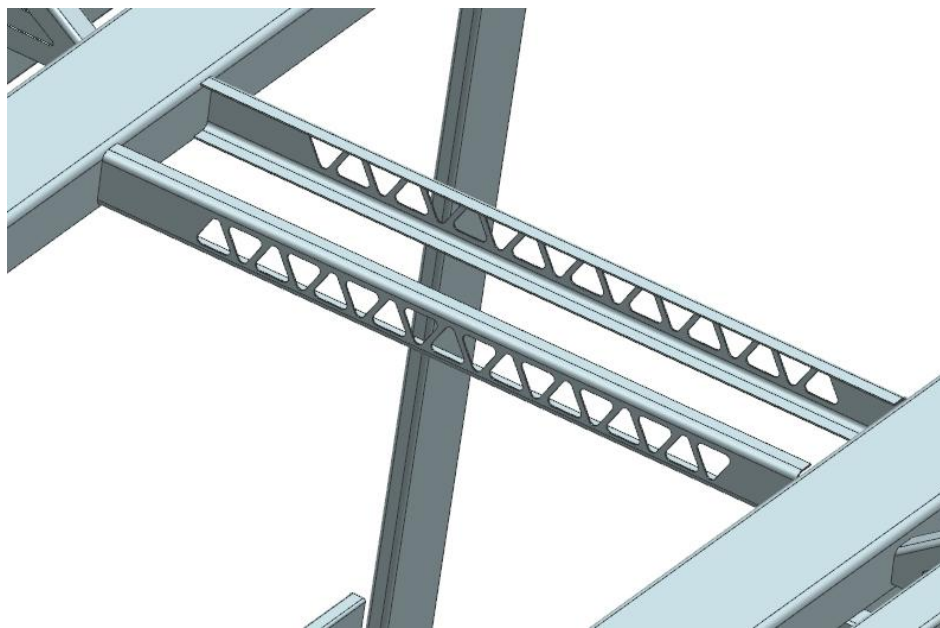
**Obr. 57** Obrázek na krajní podélný nosník podlahy zavěšeného článku před změnou (vlevo) a po změně (vpravo).

Dalšími součástmi, které má smysl upravit, jsou podélníky bočnice. Jedná se o uzavřené profily tvaru O. Z výsledků analýzy plyne, že napětí i deformace jsou zde velmi malá, proto je stojí zato nějakým způsobem upravit z důvodu snížení hmotnosti při zachování dostatečným pevnostních vlastností. V tomto případě se však nebude měnit tvar, ale příčně rozměry součásti. Původní vnější šířka a výška profilu jsou 100x40 mm a 160x60 mm (v bočnicích se nacházejí tyto rozměry podélníků). V novém provedení to činí 90x40 mm a 100x40 mm. Tloušťky se v některých případech změny, ale délky zůstanou zachovány. Upravené podélníky bočnice jsou znázorněny na obrázku 58.



**Obr. 58** Pohled na upravené podélníky bočnic zavěšeného článku.

V neposlední řadě se dá diskutovat i o změně středního příčnicku ve střeše. Pokud totiž vezmeme relativně velmi nízké deformace a napětí na samotném příčnicku, je namístě provést některé úpravy opět za účelem snížení hmotnosti. Měnit se ovšem budou pouze některé rozměry nikoliv tvar. Ten má tvar U a jeho původní příčné vnější rozměry jsou 60x105 mm. Avšak velikost výšky by bylo nepraktické měnit z důvodu již zahrnutých otvorů a návaznosti této součásti na podélné nosníky střechy, proto se změni pouze šířka. Nové rozměry tedy činí 40x105 mm. Tuto součást lze vidět na obrázku 59.

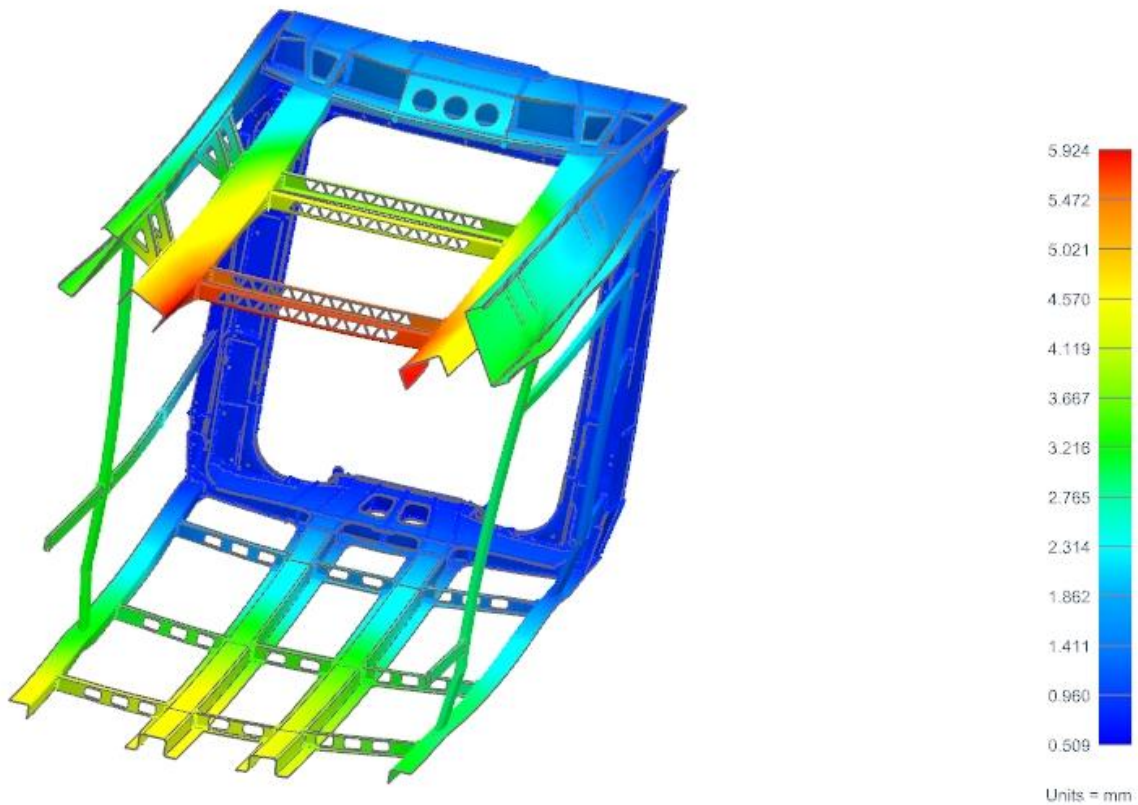


Obr. 59 Pohled na upravené příčnicku střechy zavěšeného článku.

## 5.6 Přepočítaný model se zahrnutými úpravami

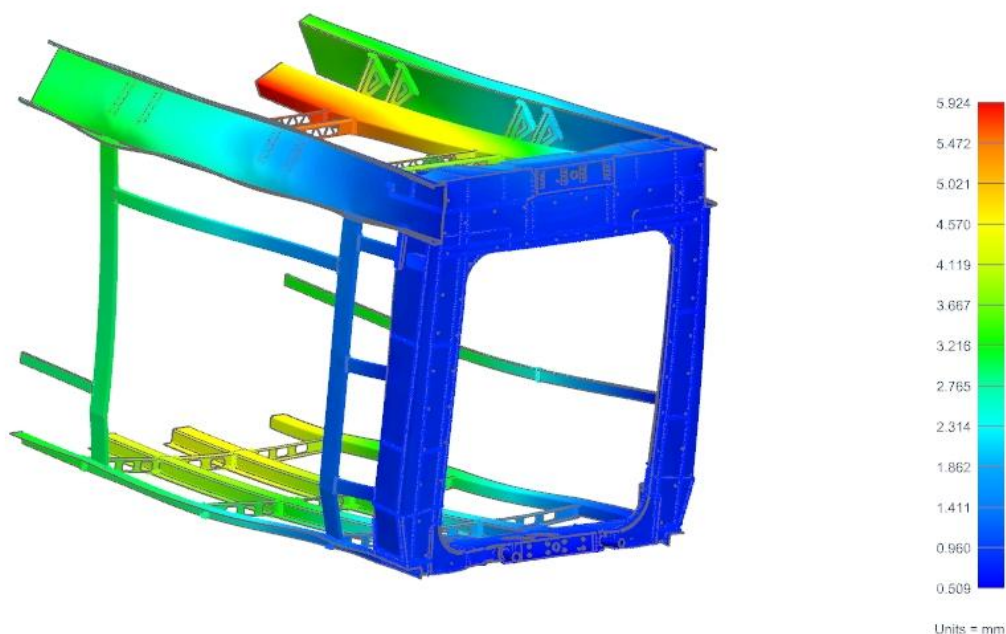
Na následujících výsledcích deformační a napěťové analýzy byly aplikovány změny uvedeny v kapitole 5.5 a několik dalších. Především v součástech bočnice a to zejména změnou tloušťky.

Z výsledků deformační analýzy pro upravený model vyplývá, že maximální deformace bude přibližně 5,9 mm, což je o 0,2 mm více než v prvotních výsledcích, a vyskytuje se v e stejné oblasti jako v původní analýze. Je to opět relativně velmi přijatelná hodnota. Celkově se dá konstatovat, že výsledky deformací vyšly i v této upravené verzi příznivě. A to platí i pro bočnice, kde bylo změn nejvíc. Deformace zde sice vyšly větší, ale pořád přijatelné. Hlavním požadavkem pro veškeré změny bylo snížení hmotnosti při zachování vyhovujících vlastností konstrukce a to se podařilo. Výsledky deformační analýzy jsou znázorněny na obrázku 60.



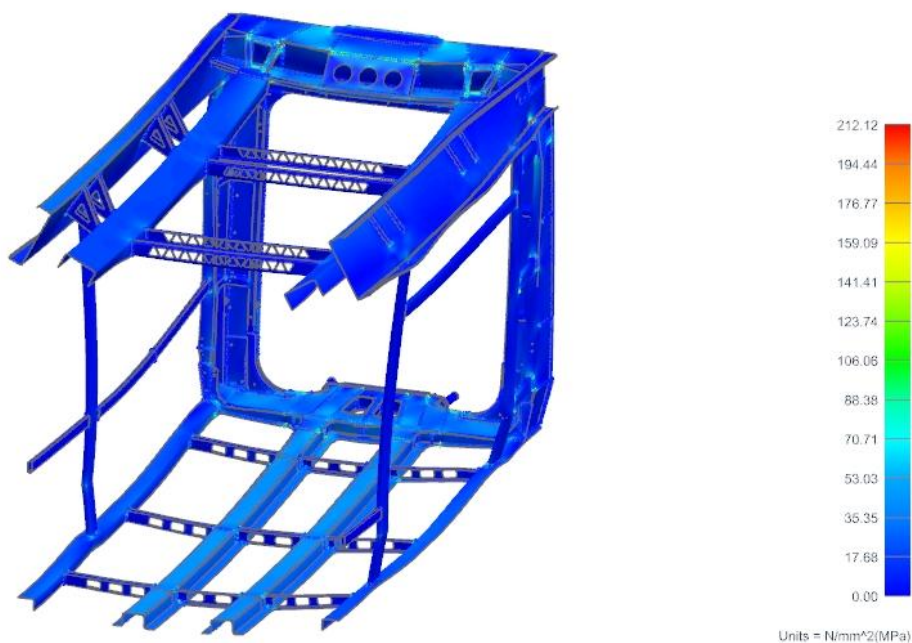
Obr. 60 Obrázek celkového pohledu na výsledky deformační pro upravenou sestavu s barevnou a číselnou stupnicí.

Za zmínku také stojí deformace upraveného krajního podélného nosníku podlahy a prostoru dveří. V nosníku budou sice přijatelné hodnoty deformací, ale bude v průběhu své délky více zkroucený. Naproti tomu dveřní prostor vyšel z hledisky stylu deformace podobně jako v původní verzi, ale maximální hodnoty jsou o více než 1 mm větší. V těchto místech to může způsobovat určité problémy, na druhou stranu to je pořád přijatelná hodnota. Pohled na výsledky deformační analýzy v dveřním prostoru jsou znázorněny na obrázku 61.



Obr. 61 Obrázek výsledků deformační analýzy ze strany dveřního prostoru s barevnou a číselnou stupnicí.

Z výsledků napěťové analýzy vyplývá, že k žádným velkým odchylkám oproti původním hodnotám nedochází. I zde jsou třeba zohlednit zjednodušující předpoklady uvedené v kapitole 5.2. Lze však konstatovat, že oproti původním výsledkům této analýzy jsou napětí vyšší v průměru o zhruba 10 MPa, v upravených součástech včetně krajních podélných nosníků podlahy až o 20 MPa, ale pořád se to pohybuje v relativně bezpečných mezích. Výsledky napěťové analýzy pro upravenou sestavu jsou vidět na obrázku 62.



Obr. 62 Obrázek napěťové analýzy pro model s upravenými součástmi s barevnou a číselnou stupnicí.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo stanovit základní kritéria hodnocení tramvajových vozidel, udělat rozbor existujících řešení, vybrat koncept nejlépe vyhovující pro zadané podmínky, vypracovat konstrukční návrh vybraného konceptu a provést jeho pevnostní výpočet. První část práce se nejprve zabývá parametry, na něž je v dalším úseku této části kladen velký důraz. V dalším úseku první části jsou analyzovány vybrané existující koncepty tramvajových vozidel. Poté je na tyto koncepty aplikována metoda pro vybrání nejvhodnější varianty pro zadané podmínky. Zvolenou variantou se nakonec stala 100% nízkopodlažní pětičláneková tramvaj se třemi neotočnými podvozky. V další části práce byl na základě informací ze zdrojů literatury a odborných rad od konzultanta a vedoucího této práce pro tuto tramvaj vytvořen konstrukční návrh a to pouze pro střední a zavěšený článek. Zbylé články nebyly vzhledem k relativně rozsáhlé úloze vytvořeny. U těchto článků byl učiněn podrobnější rozbor jejich jednotlivých částí. Poté byla na zavěšený článek k zjištění deformační a napěťové analýzy pro statickou pevnost aplikována metoda konečných prvků MKP. Pomocí této metody byly získány její výsledky a na jejich základě bylo rozhodnuto, že navržený článek s maximální deformací 5,86 mm, přibližným maximálním napětím okolo 80 MPa a hmotností 2752 kg vyhovuje. Ovšem bylo zjištěno, že některé součásti byly na základě výsledků předimenzované. Proto se provedla konstrukční úprava těchto součástí a celý výpočet byl proveden znovu. Nově zjištěné výsledky dle očekávání ukázaly, že se zvýšila velikost deformace a napětí v jednotlivých částech (u deformací od desetin až po celé milimetry, u napětí až po desítky MPa), ale celková hmotnost byla snížena na hodnotu 2362 kg tedy o zhruba 290 kg. A i přes tyto změny vypočtený model vyhovuje.

## II. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007
- [2] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla II*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009
- [3] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla III*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011
- [4] LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004
- [5] Dostupné na internetu < [http://msts.unas.cz/downloads.php?cat\\_id=2](http://msts.unas.cz/downloads.php?cat_id=2)>
- [6] Dostupné na internetu < [http://www.fotodoprava.com/brno\\_vl.htm](http://www.fotodoprava.com/brno_vl.htm)>
- [7] Dostupné na internetu <[http://en.wikipedia.org/wiki/Flexity\\_Classic](http://en.wikipedia.org/wiki/Flexity_Classic)>
- [8] Dostupné na internetu < <http://www.novinky.cz/ekonomika/137288-obrazem-historie-tramvaji-od-konskeho-pohonu-k-designu-porsche.html>>
- [9] Dostupné na internetu < <http://florent.brisou.pagesperso-orange.fr/Fiche%20Lyon.htm>>
- [10] Dostupné na internetu < <https://railforthevalley.wordpress.com/2009/12/11/trams-for-the-21st-century-alstom-citadis/>>
- [11] Dostupné na internetu < <http://www.halling.at/U-Bahn-Wien-T-Wagen-U6-grau>>
- [12] Dostupné na internetu < <http://www.k-report.net/discus/archiv2013/48/4424-archiv-4.html>>
- [13] Dostupné na internetu < [http://en.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda\\_15\\_T](http://en.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_15_T)>



Katedra konstruování strojů

Marek Havlín

### III. SEZNAM PŘÍLOH

#### **P I.-** příloha obsahuje

- výkres sestavy kostry skříně zavěšeného článku (list číslo 1)
- výkres sestavy kostry skříně zavěšeného článku (list číslo 2)

#### **P II.-** CD příloha obsahuje

- modely sestav středního a zavěšeného článku
- výkres sestavy kostry skříně zavěšeného článku (list číslo 1)
- výkres sestavy kostry skříně zavěšeného článku (list číslo 2)
- textovou část diplomové práce

**Opravy a doplnění údajů  
diplomové práce na základě  
pokynů komise státní  
závěrečné zkoušky**

### Oprava a doplnění kapitoly 3.

Jako varianta pětičlánkové nízkopodlažní tramvaje byla vybrána jednosměrná tramvaj se třemi neotočnými podvozky, dvěma zavěšenými články a po jednom středním, zadním a předním článkem. Tato tramvaj je 100% nízkopodlažní. V místech, kde se nacházejí podvozky, má podlaha na obou stranách výstupky zakrývající kola podvozku, na kterých jsou umístěny sedadla. Mezi těmito výstupky se nachází ulička. Vzhledem k tomu, že se jedná o jednosměrnou tramvaj, je kabina strojvedoucího pouze v předním článku a dveře se nacházejí jen na jedné straně. Sedadla jsou směřována podélně z důvodu zvýšení půdorysné plochy, kromě sedadel umístěných na zmíněných výstupcích. Důležité základní parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Parametry jednotlivých článků jsou další částí textu.

<b>Počet článků</b>	5	
<b>Rozchod</b>	1435	mm
<b>Napájecí soustava</b>	600 (750 )	V DC
<b>Maximální rychlost</b>	70	km/h
<b>Délka vozidla</b>	32410	mm
<b>Rozvor podvozku</b>	1880	mm
<b>Vzdálenost os podvozků</b>	11890	mm
<b>Počet podvozků</b>	3	
<b>Max. šířka vozu</b>	2400	mm
<b>Pracovní rozsah sběrače</b>	3600-6100	mm nad TK
<b>Výška podlahy</b>	380	mm nad TK
<b>Podíl nízkopodlažní části vozu</b>	100	%
<b>Průměr kol max./min.</b>	610/530	mm
<b>Pohotovostní hmotnost vozidla</b>	36000±3%	kg
<b>Maximální obsaditelnost při 8 os/ m<sup>2</sup></b>	355	osob

Vybraná tříčlánková nízkopodlažní tramvaj je obdobná verze jako zvolená pětičlánková akorát bez středního a jednoho zavěšeného článku. Tato varianta má také stejné řešení podlahy v místech nad podvozky a stejný způsob orientace sedadel. Základní parametry této tramvaje jsou uvedeny v následující tabulce.

<b>Počet článků</b>	3	
<b>Rozchod</b>	1435	mm
<b>Napájecí soustava</b>	600 (750 )	V DC
<b>Maximální rychlost</b>	70	km/h
<b>Délka vozidla</b>	20550	mm
<b>Rozvor podvozku</b>	1880	mm
<b>Vzdálenost os podvozků</b>	11890	mm
<b>Počet podvozků</b>	2	
<b>Max. šířka vozu</b>	2400	mm
<b>Pracovní rozsah sběrače</b>	3600-6100	mm nad TK
<b>Výška podlahy</b>	380	mm nad TK
<b>Podíl nízkopodlažní části vozu</b>	100	%
<b>Průměr kol max./min.</b>	610/530	mm
<b>Pohotovostní hmotnost vozidla</b>	22000±3%	kg
<b>Maximální obsaditelnost při 8 os/ m<sup>2</sup></b>	218	osob

Tramvaj respektive její jednotlivé články nesmí přesáhnout vtažnou linii obrysu. Pro tyto účely se použije výpočet zúžení předního článku vozidla při průjezdu obloukem. Ten se počítal podle normy ČSN 28 0337. Tato norma definuje

a) podmínku pro vzdálenost povrchu vozidla  $E_i$  měřenou od osy obrysu pro vozidlo v oblasti mezi vodíci dvojkoľími. Pro případ navrženého článku tramvaje a uvažovaným poloměrem 20 m má tato podmínka tvar:

$$E_i \leq k + \delta_i = 1,2 + 0,31 = 1,51 \text{ m}$$

kde ...  $E_i$  je vnitřní zúžení  
 ...  $k$  je poloviční šířka obrysu pro vozidlo v přímé koleji  
 ...  $\delta_i$  je rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidlo v oblouku koleje  
 (jedná se o tabulkovou hodnotu závislou na poloměru oblouku koleje viz ČSN 28 0318)

b) podmínku pro vzdálenost povrchu vozidla  $E_a$  měřenou od osy obrysu pro vozidlo vně vodících dvojkoľích. Pro případ navrženého článku tramvaje a uvažovaným poloměrem 20 m má tato podmínka tvar:

$$E_a \leq k + \delta_a = 1,2 + 0,65 = 1,85 \text{ m}$$

kde ...  $E_a$  je vnitřní zúžení  
 ...  $k$  je poloviční šířka obrysu pro vozidlo v přímé koleji  
 ...  $\delta_a$  je rozšíření vnější části obrysu pro vozidlo v oblouku koleje (jedná se o tabulkovou hodnotu závislou na poloměru oblouku koleje viz ČSN 28 0318)

Vnitřní vybočení a posuv bodů povrchu vozidla, které norma udává se vypočítá následovně:

$$E_i = \frac{2e * l_0 - l_0^2}{2r} + d + \frac{p^2}{8r} + b$$

kde ... e je poloviční vzdálenost rozvoru

... l<sub>0</sub> je vzdálenost vyšetřovaného příčného řezu od bližšího vodícího dvojkolí

... r je poloměr oblouku koleje

... d je maximální možné radiální posunutí otočného čepu ze střední polohy po vyčerpání všech vůlí při statické poloze (v tomto případě je to 0,049)

... p je rozvor podvozku

... b je vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od podélné osy vozidla

Výpočet E<sub>i</sub> pro l<sub>0</sub>= 0,94 m

$$E_i = \frac{2 * 0,94 - 0,94^2}{2 * 50} + 0,049 + \frac{1,88^2}{8 * 20} + 1,2$$

$$E_i = 1,293 \text{ m}$$

Tato hodnota je menší než 1,51 a tudíž splňuje podmínku .

Vnější vybočení a posuv bodů povrchu vozidla, které norma udává se vypočítá dle vzorce:

$$E_a = \sqrt{\frac{r^2 + b^2 + l_s^2 - q^2 - e^2 - e^2 * d_a^2 + 2l_s * d_a * \sqrt{r^2 - q^2} + 2b * \sqrt{r^2 - q^2 - e^2} * \sqrt{1 - d_a^2}}{r}}$$

Poměrná vůle

$$d_a = \frac{d}{e} = \frac{0,049}{0,94} = 0,052128$$

kde ... r je poloměr oblouku koleje

... b je vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od podélné osy vozidla

... l<sub>s</sub> je vzdálenost vyšetřovaného příčného řezu od středu vzdálenosti rozvoru

... q je poloviční rozvor podvozku

... e je poloviční vzdálenost rozvoru

maximální možné radiální posunutí otočného čepu ze střední polohy po vyčerpání všech

... d je vůlí při statické poloze

Výpočet E<sub>a</sub> pro l<sub>s1</sub>= 2,04 m

$$E_a = \sqrt{\frac{20^2 + 1,2^2 + 2,04^2 - 0,94^2 - 0,94^2 - 0,94^2 * 0,052128^2 + 2 * 2,04 * 0,052128 * \sqrt{20^2 - 0,94^2} + 2,4 * \sqrt{20^2 - 0,94^2 - 0,94^2} * \sqrt{1 - 0,052128^2}}{20}}$$

$$E_a = 1,352 \text{ m}$$

Katedra konstruování strojů

Marek Havlín

V místě příčného řezu vzdáleného 2,04 m od středu rozvoru podvozku vyšla hodnota  $E_a$  1,352 m. To je méně než limitní stanovená hodnota 1,85 m a tudíž je  $E_a$  zde vyhovující.

Výpočet  $E_a$  pro  $l_{s2} = 3,27$  m

$$E_a = \sqrt{\frac{20^2 + 1,2^2 + 3,27^2 - 0,94^2 - 0,94^2 - 0,94^2 * 0,052128^2 + 2 * 3,27 * 0,052128 * \sqrt{20^2 - 0,94^2} + 2,4 * \sqrt{20^2 - 0,94^2 - 0,94^2 * \sqrt{1 - 0,052128^2}}}{-20}}$$

$$E_a = 1,563 \text{ m}$$

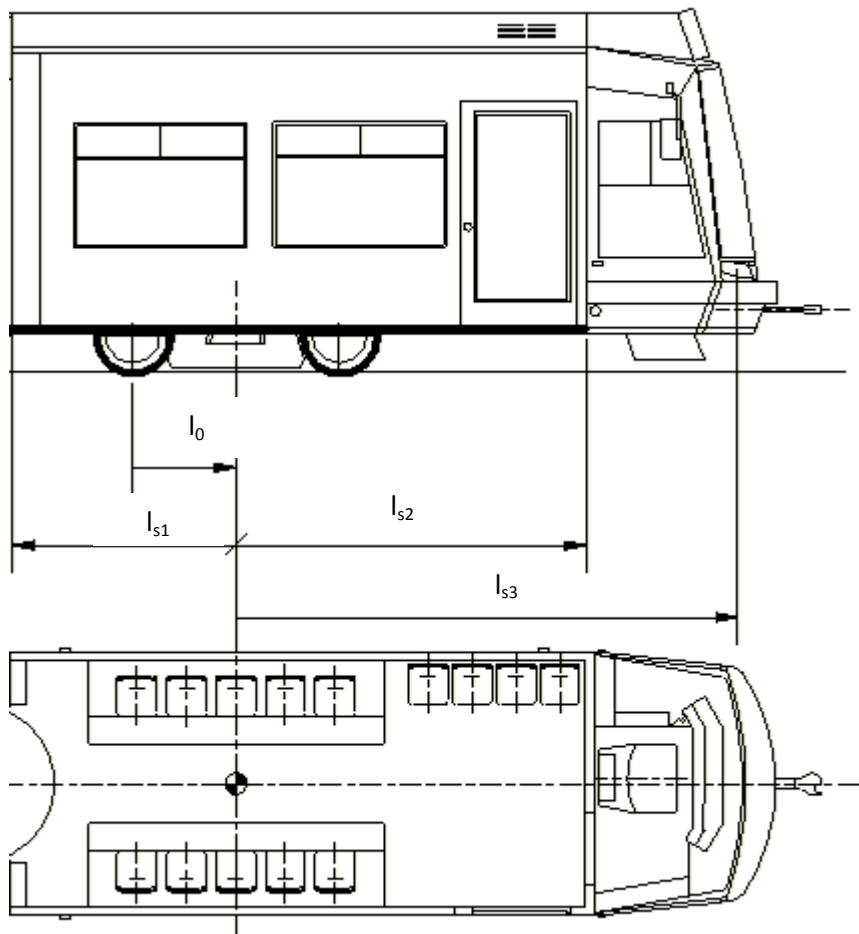
V místě příčného řezu vzdáleného 3,27 m od středu rozvoru podvozku vyšla hodnota  $E_a$  1,563 m. To je méně než limitní stanovená hodnota 1,85 m a tudíž je  $E_a$  zde vyhovující.

Výpočet  $E_a$  pro  $l_{s3} = 4,86$  m při  $b=1$  m (v tomto místě je šířka vozidla zúžena)

$$E_a = \sqrt{\frac{20^2 + 1^2 + 4,86^2 - 0,94^2 - 0,94^2 - 0,94^2 * 0,052128^2 + 2 * 4,86 * 0,052128 * \sqrt{20^2 - 0,94^2} + 2 * \sqrt{20^2 - 0,94^2 - 0,94^2 * \sqrt{1 - 0,052128^2}}}{-20}}$$

$$E_a = 1,757 \text{ m}$$

V místě příčného řezu vzdáleného 4,86 m od středu rozvoru podvozku vyšla hodnota  $E_a$  1,757 m. To je méně než limitní stanovená hodnota 1,85 m a tudíž je  $E_a$  zde vyhovující.



K zjištění užitečného zatížení pro jednotlivé články je třeba znát velikost plochy pro stojící cestující a počet sedadel, ty vyplývají z návrhu tramvaje. Samotná plocha pro stojící cestující se dle normy ČSN 28 1300 vypočítá takto:

$$S_{st} = S_u - (S_{sed} * n) - (S_{sedin} * n_{in})$$

- kde ...  $S_{st}$  je užitečná plocha pro stojící cestující  
 ...  $S_u$  je celková užitečná plocha  
 ...  $S_{sed}$  je užitečná plocha pro sedící cestující  
 ...  $S_{sedin}$  je užitečná plocha pro sedící cestující se sníženou schopností pohybu a orientace  
 ...  $n$  je počet sedadel pro sedící cestující  
 ...  $n_{in}$  je počet sedadel pro sedící cestující se sníženou schopností pohybu a orientace

Tyto plochy se vypočítají pro každý článek zvlášť. Poté se jednotlivým článkům určí jejich maximální obsaditelnost, která se dle normy ČSN 28 1300 určí následovně:

$$N_{max} = N_{sed} + 8 * S_{st}$$

- kde ...  $N_{max}$  je maximální obsaditelnost vozidla  
 ...  $N_{sed}$  je celkový počet míst k sezení  
 ...  $S_{st}$  je užitečná plocha pro stojící cestující

Výsledné maximální užitečné zatížení se poté na základě této normy určí tímto vztahem:

$$G_{max} = N_{max} * 0,7$$

- kde ...  $G_{max}$  je maximální užitečné zatížení  
 ...  $N_{max}$  je maximální obsaditelnost vozidla

Významné základní parametry a další hodnoty, které byly vypočteny podle předchozích rovnic, důležité pro konstrukci a výpočet hrubé stavby jednotlivých článků jsou pro každý článek zvlášť uvedeny v následujících tabulkách.

zavěšený článek		
délka	6560	mm
šířka	2300	mm
$S_u$	15088000	mm <sup>2</sup>
délka sedadla	500	mm
šířka sedadla	420	mm
počet sedel	16	
$S_{sed}$	5376000	mm <sup>2</sup>
$S_{st}$	9712000	mm <sup>2</sup>
	9,712	m <sup>2</sup>
$N_{max}$	93,696	
$G_{max}$	65,5872	kN
odhadovaná hmotnost	6500	kg

přední článek		
délka	5310	mm
šířka	2300	mm
$S_u$	12213000	mm <sup>2</sup>
délka sedadla	500	mm
šířka sedadla	420	mm
počet sedel	14	
$S_{sed}$	6428800	mm <sup>2</sup>
$S_{st}$	5784200	mm <sup>2</sup>
	5,7842	m <sup>2</sup>
$N_{max}$	60,2736	
$G_{max}$	42,19152	kN
odhadovaná hmotnost	9000	kg



<b>zadní článek</b>		
délka	5720	mm
šířka	2300	mm
$S_u$	13156000	mm <sup>2</sup>
délka sedadla	500	mm
šířka sedadla	420	mm
počet sedel	14	
$S_{sed}$	6888000	mm <sup>2</sup>
$S_{st}$	6268000	mm <sup>2</sup>
	6,268	m <sup>2</sup>
$N_{max}$	64,144	
$G_{max}$	44,9008	kN
odhadovaná hmotnost	8000	kg

<b>střední článek</b>		
délka	4020	mm
šířka	2300	mm
$S_u$	9246000	mm <sup>2</sup>
délka sedadla	500	mm
šířka sedadla	420	mm
počet sedel	10	
$S_{sed}$	5040000	mm <sup>2</sup>
$S_{st}$	4206000	mm <sup>2</sup>
	4,206	m <sup>2</sup>
$N_{max}$	43,648	
$G_{max}$	30,5536	kN
odhadovaná hmotnost	6000	kg

## Oprava a doplnění kapitoly 4.

Návrhy hrubých staveb tramvajových článků byly inspirovány konstrukcí hrubých staveb tramvají 29T a 28T od společnosti ŠKODA TRANSPORTATION a.s.

Jako materiál pro stavbu hrubé skříně byl zvolen S355J2H. Tento materiál splňuje základní kladené požadavky na hrubé stavby jako vysoká trvalá pevnost, zaručená svařitelnost, požadovaná vrubová houževnatost při nízké teplotě a další. Některé základní parametry tohoto materiálu jsou uvedeny v následující tabulce.

materiál	S355J2H	
Mez kluzu $R_{p0,2}$	355	MPa
Pevnost v tahu $R_m$	490-630	MPa
Tažnost A	20	%
Svařitelnost	zaručená	
Vrubová houževnatost KV	27	J při -20°C
mez únavy $\sigma_c$	290	MPa

## Oprava a doplnění kapitoly 5.

Výpočtům pomocí metody konečných prvků byl v této práci podroben zavěšený článek konkrétně jeho hrubá stavba. V případě výpočtů statické pevnosti se dle normy EN 12 663-1 používá vztah:

$$U = \frac{\sigma_c * S_1}{R} \leq 1$$

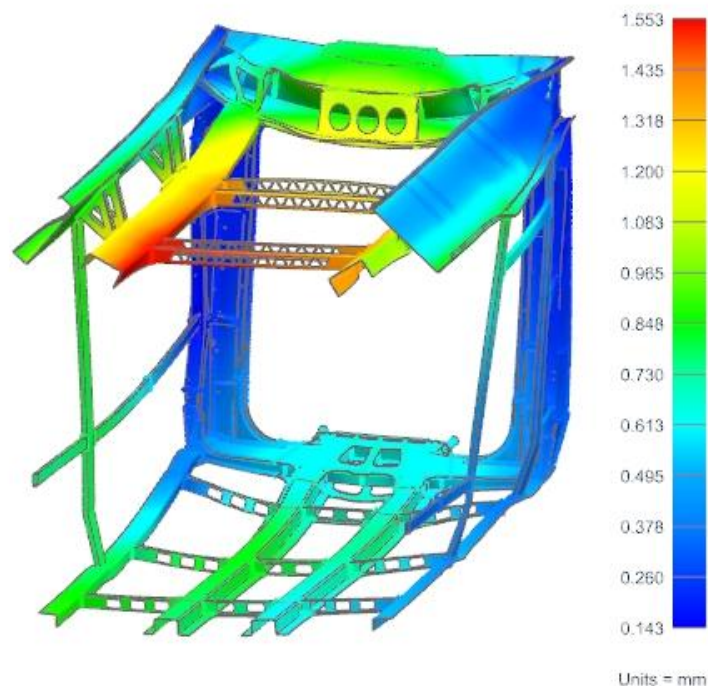
- kde ... U je využití  
...  $S_1$  je bezpečnostní součinitel pro mez kluzu  
... R je smluvní mez kluzu materiálu  
...  $\sigma_c$  je vypočítané napětí

Pro tento případ je  $R = 355$  MPa a  $S_1 = 1,15$ .

Tato norma také definuje zatěžovací stavy, pro které musí být hrubá stavba dle předchozího stavu vyhovující. V rámci této práce se omezí pouze na 3 stavy. U každého stavu se sleduje tuhostní kontrola, tedy zda jsou deformace v rozumné míře, a pevnostní kontrola, tedy zda po dosažení vypočtených napětí vztah uvedený výše platí.

### Zatěžovací stav podélnou tlakovou silou 200 kN.

U tohoto zatěžovacího stavu se tlaková síla aplikuje na spojovací desky zavěšeného článku. Velikosti deformací jsou zde relativně malé. Jejich maximální hodnota vyšla 1,583 mm a to u podélného nosníku střechy viz obrázek níže. Maximální deformace v dveřním prostoru se pohybují okolo 0,8 mm.



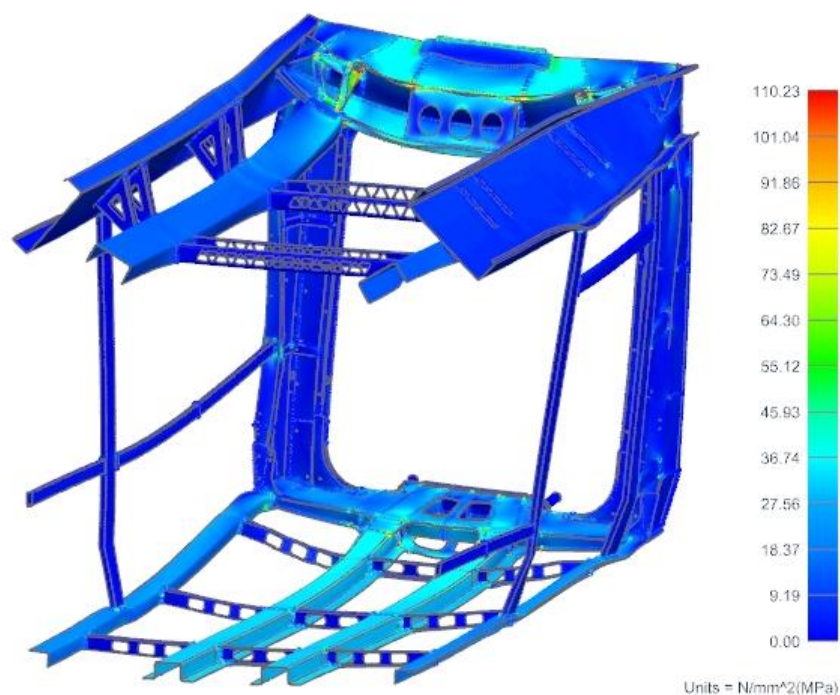
Obr. 1 Výsledky deformační analýzy pro zatěžovací stav podélnou tlakovou silou 200 kN.

I velikost maximálního napětí 110,23 MPa vyšla příznivá, což lze dokázat dle hodnotícího kritéria.

$$\frac{110,23 * 1,15}{355} \leq 1$$

$$U = 0,357$$

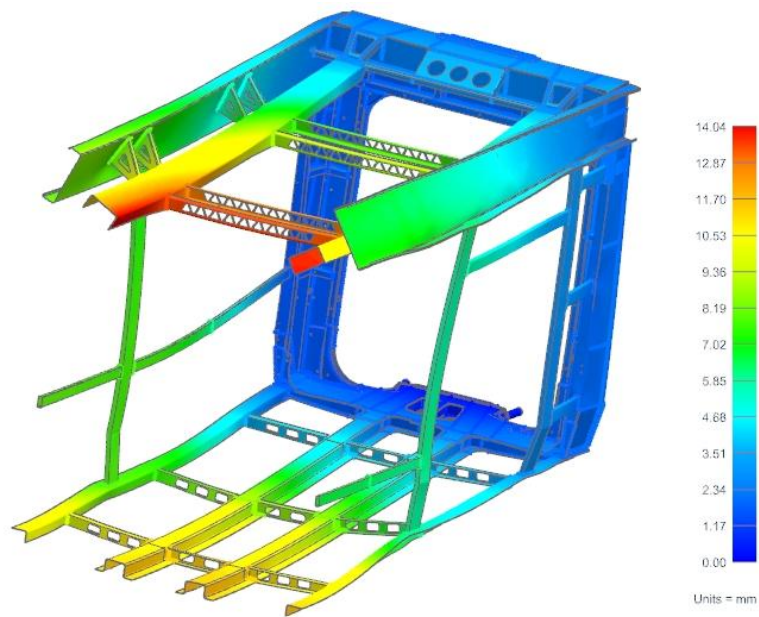
Napětí se šíří od spojovacích desek přes části čelnice na podélné nosníky. Největší hodnota se nachází v horní části čelnice v místech napojení horního plechu a výztuh spojující tento plech s nosníky střechy. U těchto nosníků střechy je velikost napětí směrem od čelnice klesá, zatímco u podélných nosníků podlahy je více méně konstantní. V ostatních částech článku (bočnic, bočních krytů střechy, sloupků čelnice) jsou velikosti napětí velmi malá.



Obr. 2 Výsledky napěťové analýzy pro zatěžovací stav podélnou tlakovou silou 200 kN.

#### Zatěžovací stav svislou statickou silou - maximální provozní zatížení $1,3 * g * (m_1 + m_4)$

Hmotnost  $m_1$  je konstrukční hmotnost skříně vozidla v provozním stavu a  $m_4$  je výjimečné užitečné zatížení.  $m_1$  tedy odpovídá polovině hmotnosti hrubé skříně a  $m_4$  polovině hmotnosti osob vážících 70 kg v počtu určeném maximální obsaditelností článku. Polovina se uvažuje proto, že díky symetričnosti úlohy se počítá pouze polovina článku. V tomto zatěžovacím stavu vyšla maximální deformace 14,04 mm, což na rozdíl od předchozího stavu je hodnota, které už může působit z hlediska tuhostní kontroly problémy. Nachází se ovšem ve stejných oblastech jako u podélného zatěžovacího stavu, kde tak velký důraz na tuhost konstrukce kladen není. Ale v místech dveřního prostoru by velikost tamní deformace až 6 mm jistě problémy způsobit mohla.



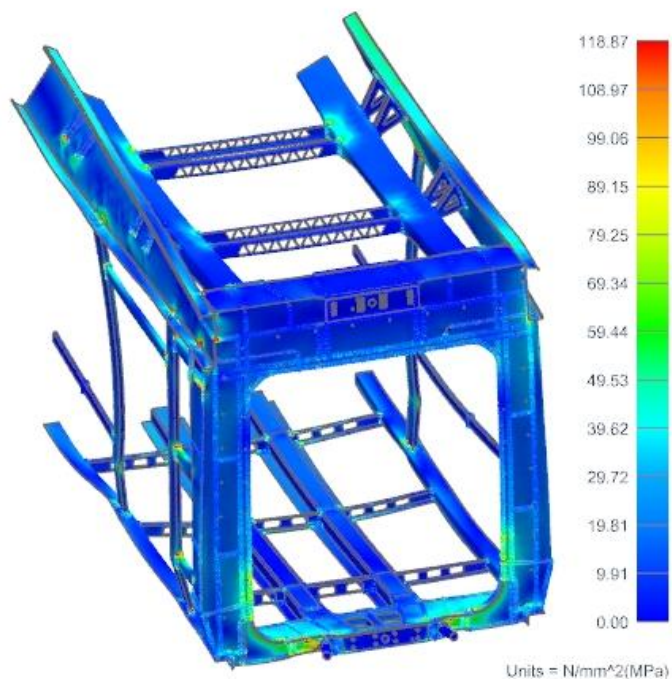
Obr. 3 Výsledky deformační analýzy pro zatěžovací stav svislou statickou silou.

U pevnostní analýzy vyšlo maximální napětí zjištěné v oblasti spojení krajních čelníků se středním u spodní části čelnice 118,87 MPa. To je dle hodnotícího kritéria vyhovující.

$$\frac{118,87 * 1,15}{355} \leq 1$$

$$U = 0,385$$

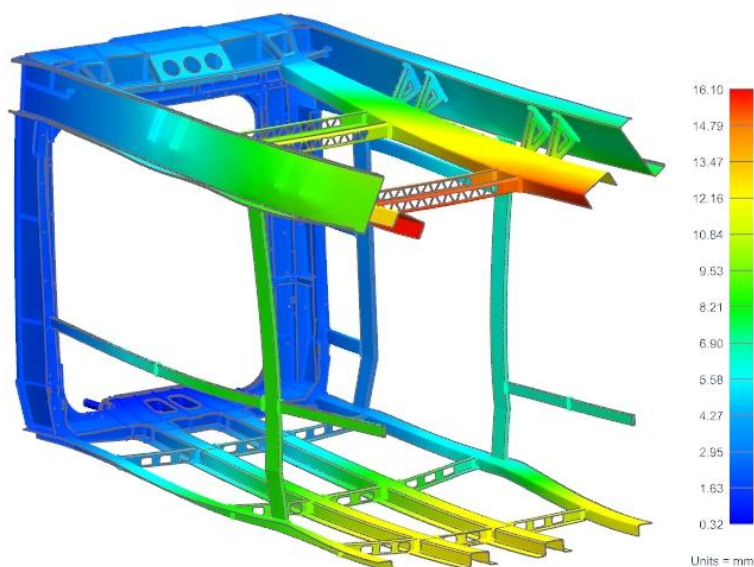
V ostatních místech článku dochází k skokovému zvýšení napětí zejména v blízkém okolí svarových spojů a to i až o 90 MPa. Naproti tomu u podélných nosníků jsou kromě zmíněných oblastí výsledné hodnoty relativně nízké.



Obr. 4 Výsledky napěťové analýzy pro zatěžovací stav svislou statickou silou.

#### Zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou 200 kN a svislým zatížením $g^*(m_1+m_4)$

Při aplikaci tohoto zatěžovacího stavu vyšla maximální deformace 16,1 mm a opět na těch samých místech jako v předchozích stavech, ale důležitější z hlediska tuhosti je deformace až 8 mm v dveřním prostoru, kde to může působit problémy.



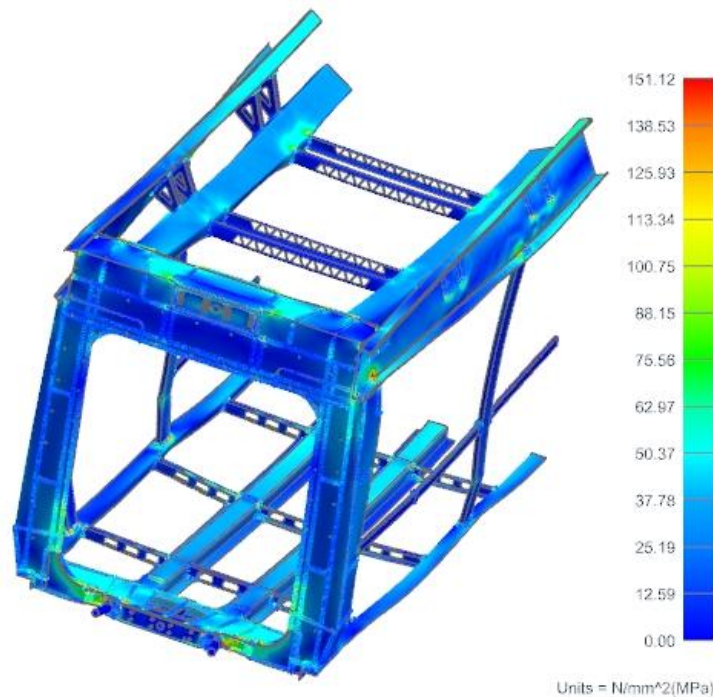
Obr. 5 Výsledky deformační analýzy pro zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou 200 kN a svislým zatížením.

Velikost maximálního napětí se nachází na stejném místě jako v případě stavu svislého zatížení tedy v blízkém okolí spojení krajních čelníků se středním. Jedná se o hodnotu 151,12 MPa. Ta je dle hodnotícího kritéria vyhovující.

$$\frac{151,12 * 1,15}{355} \leq 1$$

$$U = 0,489$$

Stejně jako u svislého zatížení i tady lze pozorovat skokový nárůst napětí v okolí svarových spojů. V některých případech to přesahuje 100 MPa. Dále lze pozorovat, že u podélních nosníků podlahy a střechy se napětí lineárně zvyšuje směrem od čelnice do prostředku článku. U sloupků bočnice se napětí v průběhu celé jejich délky v podstatě nemění a zůstává na relativně nízké hodnotě.



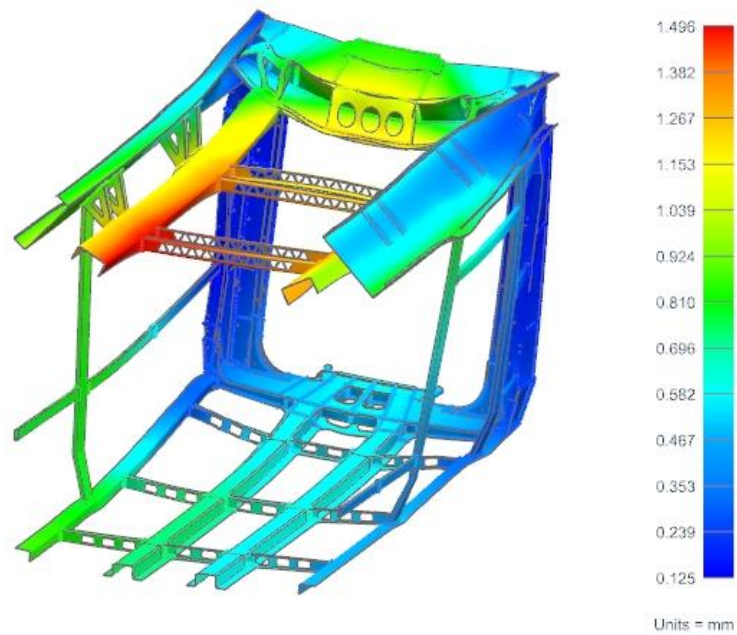
**Obr. 6 Výsledky napěťové analýzy pro zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou 200 kN a svislým zatížením.**

### Provedení úprav za účelem zvýšení tuhosti

Po získání prvotních výsledků bylo zjištěno, že deformace v dveřním prostoru jsou příliš vysoké. Z tohoto důvodu byly provedeny úpravy součástí v této oblasti. Konkrétně zvětšení tloušťky jejich profilů o 1 mm, navíc byly také zvětšeny tloušťky u středních podélných nosníků střechy o 0,5 mm, neboť zde se vyskytovaly maximální deformace. A výpočty byly pro stejné zatěžovací stavy s těmito úpravami provedeny znovu.

**Zatěžovací stav podélnou tlakovou silou 200 kN.**

Pro tento zatěžovací stav při opakování výpočtů se změnami vyšla maximální deformace 1,49 mm, což představuje relativně malý rozdíl oproti původní a maximální deformace v prostoru dveří se z původních 0,8 mm snížila na hodnotu okolo 0,5 mm.

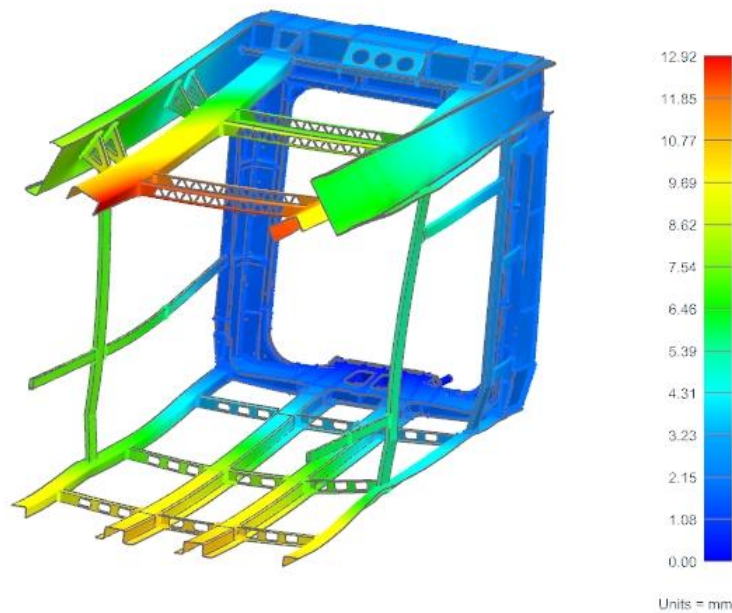


Obr. 7 Výsledky deformační analýzy u modelu s úpravami pro zatěžovací stav statickou tlakovou silou 200 kN.

**Zatěžovací stav svislou statickou silou - maximální provozní zatížení  $1,3 \cdot g \cdot (m_1 + m_4)$** 

Pro tento zatěžovací stav při opakování výpočtů se změnami vyšla maximální deformace 12,92 mm, což je o zhruba 2 mm méně oproti původní a maximální deformace v prostoru dveří se z původních 6 mm snížila na hodnotu pohybující se okolo 4,5 mm.

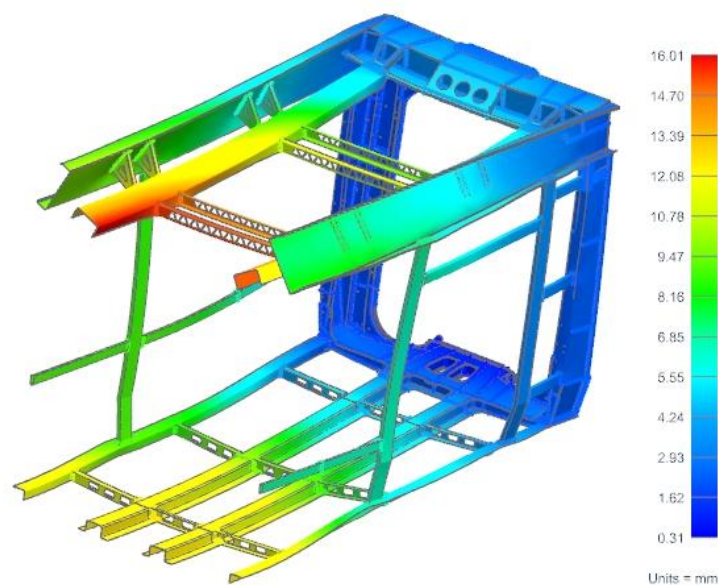




Obr. 8 Výsledky deformační analýzy u modelu s úpravami pro zatěžovací stav svislou statickou silou.

**Zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou 200 kN a svislým zatížením  $g^*(m_1+m_4)$**

Pro tento zatěžovací stav při opakování výpočtů se změnami vyšla maximální deformace 1,49 mm, což představuje relativně malý rozdíl oproti původní (necelých 0,5 mm) a maximální deformace v prostoru dveří se z původních necelých 8 mm snížila na hodnotu okolo 5 mm. To sice je přijatelnější hodnota, ale pořád může v těchto místech působit problémy.



Obr. 9 Výsledky deformační analýzy u modelu s úpravami pro zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou 200 kN a svislým zatížením.

## Oprava a doplnění kapitoly 6.

### Závěr

Jako vítězné varianty byly zvoleny pětičlávková nízkopodlažní tramvaj se třemi neotočnými podvozky a dvěma zavěšenými články a tříčlávková nízkopodlažní tramvaj, která je zkrácenou verzí té předchozí bez středního a jednoho zavěšeného článku. U obou konceptů byly určeny základní parametry jako délka vozidla, vzdálenost os podvozků a další. Poté byly podrobněji analyzovány jednotlivé články, konkrétně jejich délka, šířka, užitečná plocha, plocha pro stojící cestující, počet sedadel, maximální obsaditelnost, maximální užitečné zatížení a odhadovaná hmotnost. Dále byly pro přední článek provedeny výpočty zúžení podle normy ČSN 28 0337. Konkrétně vnitřní zúžení  $E_i$  a vnější zúžení  $E_a$  pro stanovená místa. Ve všech těchto počítaných místech přední článek vyhovuje. K tomu, aby podle této normy vyhovovalo celé vozidlo, by bylo nutné stejným způsobem spočítat zúžení i pro ostatní články.

V další kapitole byl uveden zdroj inspirace pro stavbu hrubé skříně zavěšeného článku a materiál, který byl vybrán pro tuto konstrukci včetně jeho vlastností. Na základě požadavků kladených na hrubou stavbu lze usoudit, že zvolený materiál S355J2H se svými vlastnostmi tyto nároky splňuje.

Závěrečná část se zabývala pevnostními požadavky na konstrukci hrubé skříně zavěšeného článku. Tyto analýzy byly provedeny podle normy EN 12663-1 ovšem pouze v omezeném rozsahu. Zatímco norma stanovuje širokou škálu zatěžovacích stavů, v tomto případě to bylo omezeno na tři stavy. Konkrétně se jedná o zatěžovací stav podélnou tlakovou silou, zatěžovací stav svislou statickou silou a zatěžovací stav kombinovaného namáhání statickou tlakovou silou a svislým zatížením. Ve všech těchto případech vyšla navržená konstrukce podle normy jako vyhovující. Navzdory těmto výsledkům byly provedeny úpravy, zejména zvětšení tloušťek profilů v oblasti dveřního prostoru a u podélných nosníků střechy, z důvodu zvýšení tuhosti a to i za cenu zvětšení hmotnosti. U těchto analýz byla sledována pouze velikost deformace. Jejich velikost sice byla ve sledovaných místech snížena, ale za cenu zvýšení hmotnosti o necelých 30 kg. Hledání optimálního poměru mezi nízkou hmotností a dostatečnou tuhostí nebylo dále rozpracováno. K tomu, aby se dalo prohlásit, zda je hrubá stavba způsobilá, je nutné, aby vyhovovalo ve všech zatíženích, které norma uvádí a ve které jsou detailněji popsány. Všechny stavy, pro které musí být konstrukce vyhovující, avšak kromě tří z nich, v této práci nebyly počítány. Stavy, pro které musí článek být počítán dle normy EN 12663-1, jsou uvedeny v následující tabulce:

Podélná statická zatížení skříňě vozidla	Podélná síla v prostoru nárazníků	Tlaková síla v místech uchycení nárazníků
		Tlaková podúrovň nárazníků
		Tlaková síla působící na uchycení nárazníků úhlopříčně
		Tahová síla na uchycení spřáhla
	Tlakové síly na čelní stěně	Tlaková síla v oblasti čelníku 150 mm nad úrovní podlahy
		Tlaková íla ve výšce spodního rámu okna
Tlaková síla v úrovni vaznice		
Svislá statická zatížení skříňě vozidla	Maximální provozní zatížení	Maximální provozní zatížení
	Zdvihání a zvedání	Zdvihání a zvedání ve stanovených místech na jednom konci vozidla
		Zdvihání a zvedání celého vozidla ve stanovených místech
Zdvihání a zvedání při posunutí opěrného místa		
Kombinace druhů statických zatížení skříňí vozidel	Tlaková síla a svislé zatížení	
	Tahová síla a svislé zatížení	
Mezní statická zatížení vazeb	Druhy mezních zatížení spojení skříňě s podvozkem	
	Druhy mezních zatížení v místech uchycení vybavení	Zrychlení ve směru osy x
		Zrychlení ve směru osy y
Zrychlení ve směru osy z		
Druhy mezních zatížení otočných uložení článkových vozidel		
Druhy základních únavových zatížení skříňě vozidla	Spektrum užitečného zatížení	
	Cykly stavů ložený/prázdný	
	Zatížení vyvolaná kolejí	Zrychlení ve směru osy y
		Zrychlení ve směru osy z
	Aerodynamická zatížení	
Vyvíjení tažné síly a brzdění	Zrychlení ve směru osy x	
Únavová zatížení vazeb	Spojení skříň/podvozek	
	Úchyty vybavení	
	Spřáhla	
	Únavová zatížení otočných uložení článkových jednotek	
Kombinace druhů únavových zatížení		
Vibrace	Skříň vozidla	
	Vybavení	