



**FAKULTA  
ŠROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Analýza využití odlehčovacích otvorů v konstrukci  
hrubé stavby kolejového vozidla**

**Analysis of the Relief Holes Use in the Design of  
Frame of a Railroad Car**

**Diplomová práce**

**2020**

**Miroslav KNESPL**

**Studijní program:** N2301 Strojní inženýrství

**Studijní obor:** 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Hoidekr



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knespl** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **439073**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**  
 Studijní program: **Strojní inženýrství**  
 Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Analýza využití odlehčovacích otvorů v konstrukci hrubé stavby kolejového vozidla**

Název diplomové práce anglicky:

**Analysis of the Relief Holes Use in the Design of Frame of a Railroad Car**

Pokyny pro vypracování:

1. kapitola: elektrická jednotka metra s ocelovou skříní - základní požadavky, parametry, technický popis, typový výkres
2. kapitola: vliv odlehčovacích otvorů na hmotnost, pevnost a tuhost ocelových profilových nosníků
3. kapitola: aplikace odlehčovacích otvorů v letectví, automobilech a kolejových vozidlech
4. kapitola: principiální návrh ocelové hrubé stavby vozové skříně z neodlehčených profilů, výběr profilů vhodných k odlehčení
5. kapitola: volba kritérií optimalizace pro odlehčování profilů z hlediska hmotnosti, pevnosti a tuhosti
6. kapitola: aplikace principů odlehčování profilů na ocelové hrubé stavbě vozové skříně vozidla metra, diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- J. Leinveber and P. Vávra, Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření, 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011.
- ŠVEC, Vladimír. Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 170 s. ISBN 978-80-01-04138-3.
- POSPÍCHAL, Jaroslav. Technické kreslení. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 84 s. ISBN 978-80-01-03214-52008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

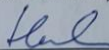
**Ing. Jan Hoidekr, ústav konstruování a částí strojů FS**

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

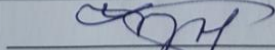
Datum zadání diplomové práce: **23.03.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.05.2020**

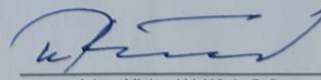
Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Jan Hoidekr  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. František Lopot, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



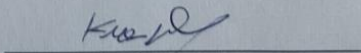
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## 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.

**28.5.2020**

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Analýza využití odlehčovacích otvorů v konstrukci hrubé stavby kolejového vozidla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Hoidekra za využití konzultací s odborníky na praxi. Použitá literatura a odborné zdroje jsou uvedeny v příloženém seznamu.

V Praze .....

.....

Bc. Miroslav Knespl

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat za vedení a ochotu při tvorbě této diplomové práce Ing. Janu Hoidekrovi. Dále bych rád poděkoval všem vyučujícím na navazujícím magisterském studiu. Velmi rád bych poděkoval inženýrům z vývojového a konstrukčního oddělení Siemens Mobility v Praze za předané zkušenosti na odborné praxi, především Ing. Zbyňku Šretrovi a Ing. Matěji Slívovi, za jejich cenné rady a pomoc. Děkuji také rodičům za podporu při studiu.

## ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Miroslav KNESPL
Název práce:	Analýza využití odlehčovacích otvorů v konstrukci hrubé stavby kolejového vozidla
Anglický název:	Analysis of the Relief Holes Use in the Design of Frame of Railroad Car
Rok:	2020
Studijní program:	N 2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. Jan Hoidekr
Konzultant:	Ing. Zbyněk Šretr
Bibliografické údaje:	počet stran 102
	počet obrázků 121
	počet tabulek 7
	počet příloh 2
Klíčová slova:	Železniční doprava, kolejová vozidla, jednotka metra, hrubá stavba, odlehčovací otvory, metoda konečných prvků, skříň metra
Keywords:	Rail transport, railway vehicles, metro unit, vehicle body, relief holes, finite element method, metro vehicle body

## ANOTACE

Předmětem diplomové práce Analýza využití odlehčovacích otvorů v konstrukci hrubé stavby kolejového vozidla bylo vytvořit principiální návrh ocelové hrubé stavby metra. Navržená hrubá stavba je svařovaná diferencíální konstrukce. Cílem bylo popsat účinky a zpracovat přehled odlehčovacích otvorů na návrh hrubé stavby skříně. Výsledkem by mělo být určení jak efektivně aplikovat odlehčovací otvory na skříň kolejového vozidla.

## ABSTRACT

The subject of the diploma thesis Analysis of the relief holes use in the design of frame of railroad car is to create principial design of the vehicle body of metro car. Created vehicle body is of welded differential construction. The main focus is on describing the effects of relief holes on vehicle body. The outcome should suggest an effective application of relief holes on railway vehicle body.

## Obsah

ZADÁNÍ.....	2
PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ .....	4
ANOTAČNÍ LIST.....	5
ANOTACE.....	5
ABSTRACT.....	5
1. Úvod .....	1
2. Cíl práce .....	3
3. Metro.....	4
3.1. Koncepce – druhy.....	5
3.2. Pražské metro .....	6
3.3. Vozový park pražského metra .....	8
4. Elektrická jednotka metra .....	9
4.1. Technické parametry [6] .....	10
4.2. Technický popis metra M1 .....	11
4.3. Hrubá stavba.....	12
4.4. Podvozek.....	14
4.5. Napájení a pohon – systémy trakce .....	15
4.6. Spřáhlo a nárazníky.....	16
4.7. Dveře a okna .....	17
4.8. Interiér .....	19
4.8.1. Podlaha .....	19
4.8.2. Obložení madla a ostatní vybavení .....	20
4.8.3. Sedačky .....	21
4.9. Kolej a tunel .....	22
5. Konstrukce skříně kolejových vozidel .....	23
5.1. Diferenciální stavba hrubé skříně.....	25
5.2. Integrovaná stavba hrubé skříně .....	27
5.3. Hybridní stavba hrubé skříně .....	28
5.4. Používané materiály pro konstrukci skříně [10] .....	29
6. Aplikace odlehčovacích otvorů v dopravních prostředcích .....	30
6.1. Automobily .....	30
6.2. Letectví .....	32
6.3. Kolejová vozidla .....	33
7. Vlivy odlehčovacích otvorů .....	35
7.1. Ohyb [17] .....	35
7.2. Metody zvýšení ohybové tuhosti a snížení hmotnosti .....	39
7.3. Nosníky s kruhovými otvory.....	41
7.4. Přehled a závislosti jednotlivých kritérií při odlehčování .....	42
8. Principiální návrh hrubé stavby vozové skříně z neodlehčených profilů .....	54
8.1. Diferenciální stavba hrubé skříně.....	55
8.2. Hlavní rám.....	56

8.3.	Bočnice .....	60
8.4.	Čelnice .....	61
8.5.	Střecha.....	61
8.6.	Interiér a vnitřní obložení .....	62
8.7.	Souřadnicový systém kolejového vozidla.....	63
8.8.	Typový výkres .....	64
9.	Nároky na skříň vozidla metra .....	65
9.1.	Prokázání statické pevnosti dle ČSN EN 12 663-1:2015 [22].....	66
9.1.1.	Podélné statické zatížení skříně vozidla dle ČSN EN 12 663-1 [22] .....	67
9.1.2.	Svislé statické síly dle ČSN EN 12 663-1 [22].....	68
9.1.3.	Kombinace zatížení [22] .....	69
9.2.	Statická pevnostní kontrola – výpočtový model .....	70
9.2.1.	Příprava výpočtového modelu .....	71
9.2.2.	Materiál skříně .....	73
9.2.3.	Okrajové podmínky – vazby .....	73
9.2.4.	Síť.....	74
9.2.5.	Zatížení a hmotnostní rozbor .....	74
9.2.6.	Výsledky statického pevnosti. kombinované zatížení .....	77
10.	Aplikace odlehčovacích otvorů na ocelové hrubé stavbě vozidla metra .....	81
10.1.	Volba kritérií odlehčení.....	82
10.2.	Aplikace odlehčování profilů na návrh hrubé stavby skříně.....	83
10.3.	Zhodnocení vlivu a aplikace odlehčování profilů hrubé stavby .....	89
11.	Závěr.....	90
	Seznam použité literatury .....	91
	Seznam obrázků .....	93
	Seznam grafů.....	93
	Seznam tabulek .....	95
	Seznam příloh.....	95

## 1. Úvod

Vznik podzemní dráhy je datován na rok 1863 v Londýně mezi stanicemi Paddington a Farrington na úseku šesti kilometrů. Trať budována mezi londýnskými nádražími byla částečně umístěna v tunelech, kvůli vysoké ceně pozemků v centru. Podzemní dráha byla obsluhována parními lokomotivami, první elektrizovaný úsek zahájil provoz v roce 1890. S výstavbou metra následovala řada Evropských a Severo Amerických měst, podzemní dráha signalizovala pokrok a důležitost města. Aktuálně podzemní dráhou disponuje přes 180 měst. [1]

Ve světě přibývá měst s rostoucí populací a s tím je potřeba i rozšířit dopravní kapacitu více než nabízí pozemní komunikace. Není možné, aby se většina lidí dopravovala ve městech automobily ať už z nedostatku parkovacích míst, nebo velkého vytížení pozemních komunikací.

Městská hromadná doprava je dopravní páteř každého velkoměsta, ale autobusy, trolejbusy a tramvaje jsou stále omezovány situací na pozemní komunikaci. Zbývá tedy podzemní a nadzemní dráha. Tunely zajišťují velmi stálé podmínky provozu a zajištění vysoké systémové bezpečnosti. Jednotky metra jsou tedy nezávislé na ostatních druzích dopravy a přispívají ke snížení využití pozemních komunikací. Některá města části dráhy postavily na mostech, což je levnější než razit tunely, ale vozy jsou vystaveny vnějším vlivům a mohou obtěžovat okolí hlukem.

Aby lidé zvolili městskou hromadnou dopravu před jízdou osobním automobilem, je potřeba zajistit komfortní a rychlou dopravu v centru měst bez komplikací. Zastávky podzemní dráhy měli být vystavěny, tak aby navazovali na hromadnou dopravu po pozemních komunikacích, nebo stanice železniční a autobusové regionální dopravy pro lidi dojíždějící do práce ve městě. Je také důležité na zastávkách vybudovat zázemí pro cestující.

Motivovat lidi pro volbu MHD lze mnoha způsoby od slev na jízdném, budováním záchytných parkovišť přilehlých k zastávce metra, poplatkem za vjezd do centra města, rychlou a pohodlnou hromadnou dopravou. Přesto že veřejná doprava může být rychlejší a levnější řešení vzhledem k rostoucím cenám pohonných hmot, pokud nebude mít určitou úroveň lidé se stejně přikloní k automobilům. Je důležité, aby vozy metra působily čistě a udržovaně. Podle klimatických podmínek je vhodné vozy vybavit topením, nebo klimatizací.

Jelikož kolejová doprava má velké fixní náklady je potřeba zajistit velkou využitelnost. Do tohoto vstupují výrobci kolejových vozidel, jejichž úkolem je poskytnout dopravním podnikům nové a modernizované vozy, které poskytují velkou přepravní kapacitu a komfort, spolu s větší ekonomičností provozu. Nové vozy musí výrazně předčít volbu modernizace již používaných souprav, aby nedocházelo ke stárnutí vozového parku.





*Obr. 1.: Nové autonomní metro pro Vídeň [2]*

Obrázek 1 zobrazuje nový vůz metra pro Vídeň. Siemens bude dodávat 34 plně autonomních souprav od poloviny roku 2020. Celá souprava o šesti vozech bude plně průchozí. Převážná kapacita je díky novému uspořádání interiéru 928 pasažérů. Vozy také disponují novým informačním systémem pro cestující, který jim poskytuje informace o přestupech, pro snazší pohyb cestujících mezi zastávkami. [2]

Lze tedy říct, že na nové soupravy metra jsou kladeny velké nároky, aby jejich volba byla zvažena. Musí být úspornější než soupravy, které budou nahrazovat. Možnost rekuperace energie při brždění a její zpětné využití. Systémové zabezpečení a vhodný stupeň autonomie. Výstavba nových linek a modernizace stávajících nabízí možnost implementace technologických řešení, které zvýší bezpečnosti nebo snižují náklady na provoz.

Důležitý parametr pro dosažení vyšší účinnosti je nízká hmotnost vozidel, které lze dosáhnout moderními postupy konstrukce. Odlehčování hrubé stavby se bude věnovat v této práci.

## 2. Cíl práce

Cíl práce se skládá ze dvou hlavních obsáhlých úkolů. Prvním je návrh hrubé stavby skříně ocelové diferenciální konstrukce vozidla metra. Hrubá stavba skříně je zjednodušena, ale dostatečná pro zobrazení efektů odlehčovacích otvorů. Rozměry a rozložení návrhu skříně je inspirováno jednotkou metra M1. Dále provést statickou pevnostní kontrolu podle příslušné normy.

Cílem druhého úkolu je zpracovat rozbor odlehčovacích otvorů a přehled vlivu otvoru na pevnost, deformaci a hmotnost, ekonomičnost odlehčování, nalezení optimálního bodu odlehčení profilů. Určení profilů vhodných k odlehčení a popis efektu odlehčení.

### 3. Metro

Metro je součástí městské hromadné dopravy je zpravidla vedeno pod úrovní terénu a funguje jako samostatná trať. Je zařazeno do kategorie speciální železniční dráhy. Charakteristikou metra je vysoká přepravní efektivita, vysoká cestovní rychlost a nerušenost ostatními druhy provozu. Metro bývá označováno jako podzemní dráha, protože zpravidla vede pod povrchem, neplatí to vždy.

Konstrukce trati metra se skládá z kolejového spodku, který tvoří stavby podzemní jako jsou tunely a stanice a povrchové jsou mosty, opěrné zdi, zemní těleso a další. Kolejový svršek tvoří kolejnice, pražce, výhybky.

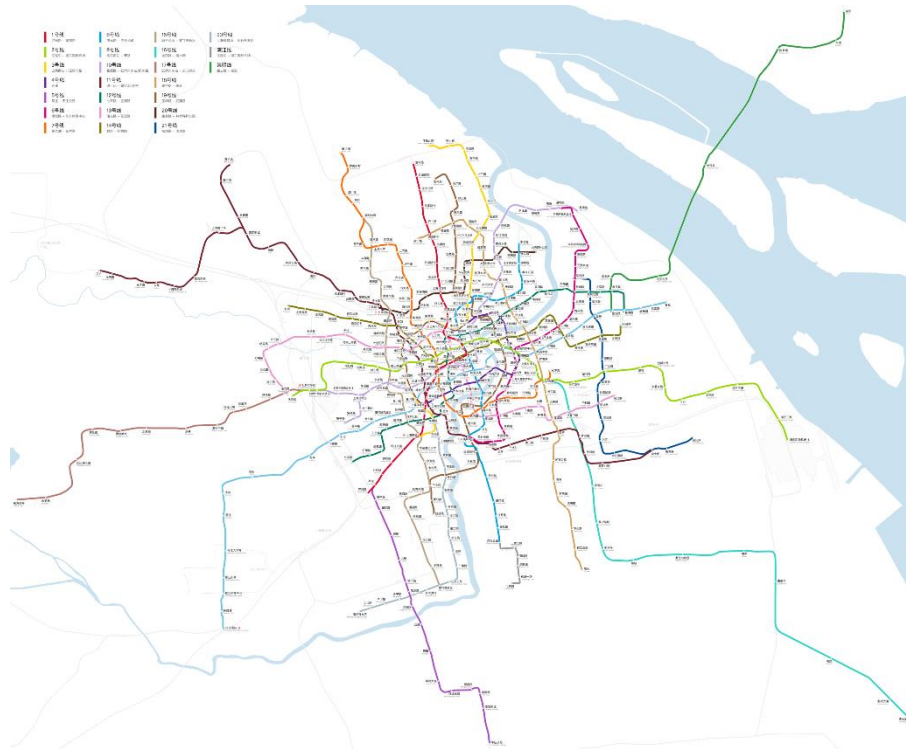
Rozchod koleje mají města pro své metro různé, většinou se používá stejně jako u železnice 1435 mm, ale například Tokio používá úzký rozchod 1067 mm, široký rozchod používají města Sapporo – 2180 mm, Lille – 2060 mm, Helsinky – 1527 mm, Moskva – 1520 mm. Barcelona má například soupravy fungující na dvou rozchodech a to 1435 mm a 1672 mm.

Tunely se razí kruhové, obdélníkové nebo eliptické. Druhá možnost je budování v otevřených jámách, nelze v místech se zástavbou.

Kapacita metra je určena délkou vlaků a intenzitou provozu a rychlostí jízdy. Délka vlaků se odvíjí podle délky nástupiště ve stanici, je tedy pevně daná maximální přepravní kapacita pro jednu soupravu. Pokud se chce zvýšit kapacita přepravených cestujících například ve špičce, lze toho docílit snížením vlakového intervalu a zdržení vlaku ve stanici. Kapacita vozů bývá 100–300 cestujících. Na obou koncích jsou vozy s kabinou strojvedoucího, pokud nejsou plně automatické.

Vozy mohou být plně průchozí, nebo průchozí pouze pro evakuaci po centrálním odemknutí. Nástupní dveře se otevírají centrálně a hlášení stanic probíhá rozhlasem a upozorněním na infopanelech. Vozy jsou spřaženy automatickým nebo poloautomatickým spřáhlem. [1]

Ve statistice z roku 2018 se uvádí, že metrem disponuje 178 měst (z toho přes 40 v Číně) z 56 států. Nejstarší je londýnské metro 1863, nejdelší je metro v Šanghaji (obr. 2) (676 km) a metro s nejvíce stanicemi se nachází v New Yorku. [3]



*Obr. 2.: Schéma sítě metra v Šanghaji, 17 linek a 413 stanic [3]*

### **3.1. Koncepce – druhy**

Konstrukci a vzhled metra určuje celá řada podmínek v jednotlivých městech, což zapříčiňuje velikou rozmanitost těchto vozidel. Například vozidla monorail mohou být jediným možným řešením v již zastavěných oblastech nebo v oblastech kde nelze hloubit tunely.

Rozdělení metra:

- Konvenční (obr. 3) – klasické provedení kolejnice a vozů jako u železniční trati
- Nekonvenční (obr. 4) – monorail, maglev, na pneumatikách, lehké metro [4]



*Obr. 3.: Konvenční provedení metra [4]*



*Obr. 4.: Nekonvenční provedení metra [4]*

### 3.2. Pražské metro

V roce 1967 bylo rozhodnuto o stavbě metra v Praze, o rok dříve se začala výstavba prvního úseku podpovrchové tramvaje. Tunely metra měli být ražené ve větší hloubce a přizpůsobeny také jako válečný kryt. Mimo tunely jsou vedeny části sítě metra po mostech, nebo nadzemním tunelem. Nejznámějším mostem je Nuselský, přes nějž vede trasa C. Nejstarším úsekem pražského metra je Florenc – Kačerov, kde byl zahájen provoz 9. května 1974. Dále probíhalo rozšiřování jednotlivých linek metra podle rostoucích periférií.

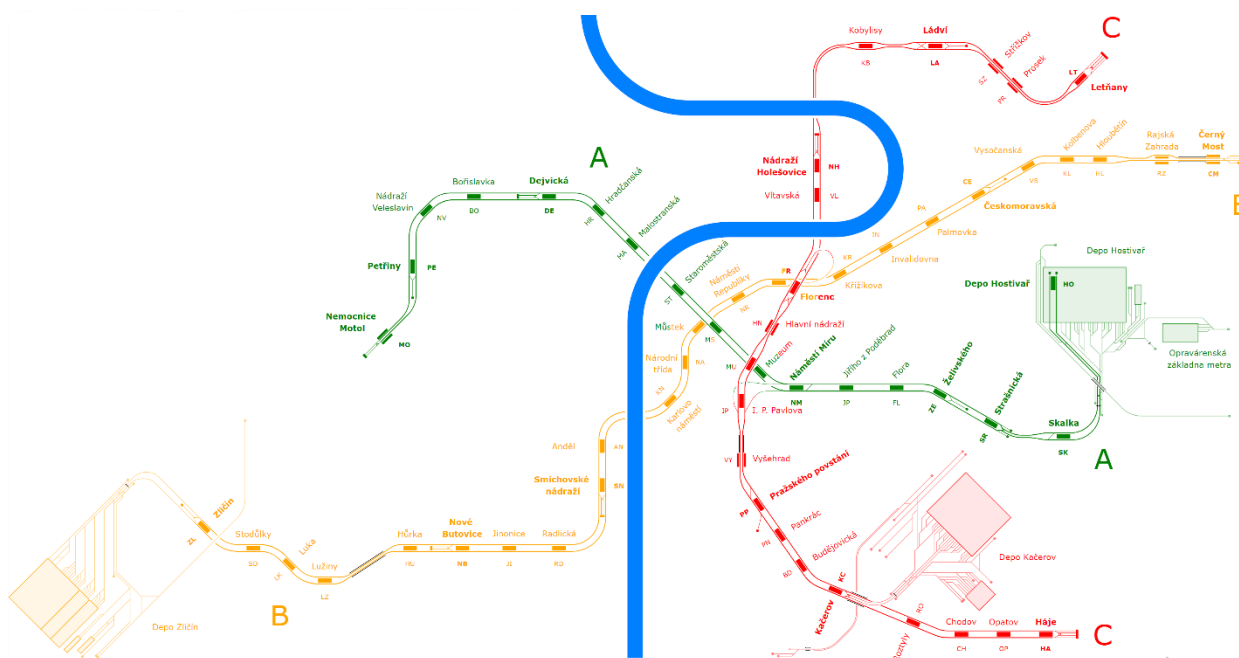
ČKD Tatra Smíchov vyvinula prototypy vozů R1 (obr. 5) pro pražské metro, vyrobeny byly pouze 2 exempláře, protože se současně bylo rozhodnuto o dovozu sovětských vozů Ečs. Tyto vozy byli ve svém provedení značně modernější a pokrokové, skříň vozidla byla ocelová, bočnice hliníkové a střecha s čelem z laminátu. Na fotce je vůz během testování se sběračem na střeše pro jízdu v tunelu by měl sběrač na podvozku. [5]



*Obr. 5.: Prototypový vůz R1 linky C [5]*

Aktuálně pražské metro (obr. 6) disponuje třemi linkami zelenou A, žlutou B a červenou C. Dráha metra měří zhruba 65 kilometrů a má 58 stanic z toho 3 jsou přestupní. Nejdelší je žlutá trasa s 24 stanicemi, dále červená s 20 stanicemi a zelená se 17. [1]

V rámci rozvoje města a ekologie je důležité stavět nové úseky a také linky. Nejnovějším úsekem pražského metra jsou 4 stanice linky A od Dejvické na Nemocnici Motol, které byly otevřeny 6. dubna 2015, tento úsek měří 6134 metrů.



Obr. 6.: Schéma pražského metra, linky A, B, C se svými depy [5]

Aktuálně probíhá geologický průzkum pro stavbu nové modré linky D. Magistrát stavbu schválil v roce 2013. V druhé polovině roku 2020 je plánováno získání stavebního povolení a zahájení stavby prvního úseku. Linka D je naplánována přes Bělnice na Náměstí Republiky, bude křížit všechny tři stávající linky. Vybudovány budou čtyři přestupní stanice z toho dvě s linkou C na Pankráci a Hlavní nádraží, jednu s linkou B na Náměstí Republiky a s linkou A na Náměstí Míru.

Vedení města a dopravní podnik diskutují možné varianty podoby metra a stále nebylo učiněno finální rozhodnutí o podobě a koncepci metra vozů. Byla potvrzena automatizace souprav kvůli výhledu menších provozních nákladů. Stále se, ale debatuje nad konečnou podobou, zda bude linka D inspirována novými vozy vídeňského metra, nebo bude zanechán ovládací pult pro poloautomatický provoz v případě poruchy.

### 3.3. Vozový park pražského metra

Vozový park pražského metra je tvořen modernizovanými vozy 81-71M na linkách A, B a vozy M1 na lince C. Oba typy jsou nedělitelné soupravy s určeným pořadím vozů, kde první a poslední vůz mají stanoviště strojvedoucího. [1]

Souprava 81-71M (obr. 7) je složena z pěti vozů označených 2Mt – 4Mt – 3Mt - 4Mt - 2Mt. 2Mt je čelní motorový vůz s kabinou strojvedoucího a zabezpečovacím zařízením. 3Mt je označení vloženého vozu s akumulátorovými bateriemi. 4Mt je motorový vložený vůz s kompresorovým ústrojím. Vozy byly vyvinuty pro pražský dopravní podnik v Mytiščínském strojírenském závodě, ale byly dodávány i do jiných socialistických států. Celkem má pražský dopravní podnik k dispozici 93 souprav. V názvu soupravy metra M označuje modernizaci, původní soupravy měli označení 81-71. Modernizace proběhla v letech 1996-2011 firmou Škoda Transportation. [1]

Trakční napětí je 750 V a je dodáváno třetí kolejnicí. Vozy jsou spřaženy spřáhly Dellner a čelní vozy mají původní spřáhla vybavená o nový tlumící člen. Hmotnost vložených vozů je přibližně 31 tun a čelních 32 tun. Vozy mají svařené ocelové skříně. [5]



Obr. 7.: Souprava 81-71M linky A, B [5]



Obr. 8.: Souprava M1 linky C [5]

Souprava M1 (obr. 8) linky C je popsána detailně v další kapitole, model ocelové hrubé stavby skříně použitý pro analýzu odlehčovacích otvorů je inspirován rozměry a konfigurací vozů M1.

## 4. Elektrická jednotka metra

Vozidla metra jsou specifická pro svoje místo provozu, na rozdíl od osobních a regionálních vozů jsou zřídka ve stejné konfiguraci ve více městech. To je dáno již existujícími tunely nástupišti, infrastrukturou a klimatickými podmínkami. Provedení vozů metra je z konstrukční stránky tedy velmi ovlivněno okolními podmínkami. Výrobce přizpůsobují vzhled, konfiguraci vnitřních prostor, barvy a technologie podle přání dopravních podniků a technologických a finančních možností. Na podobě metra se také může projevit nedostatek personálu, kdy se musí řešit parkování vozů v depu, aby se neplýtvaly lidské zdroje na přejíždění soupravami, nebo plná automatizace. Automatizace metra umožňuje ihned nasazovat vozy do provozu podle aktuální situace. Metra bez strojvedoucích jezdí už v 15 evropských městech (Norimberk, Paříž, Londýn...).

Vnitřní vybavenost vozidel metra je většinou poměrně strohá, protože cestující se ve voze rychle vyměňují. Na rozdíl od vozů kolejových vozidel pro dálkovou dopravu není potřeba zajišťovat toalety, místa pro zavazadla, stolky, zásuvky a jiné funkcionality. Důležité je rozmístění sedadel, madel, rozčlenění vnitřního prostoru a velký počet dveří, aby se cestující mohli rychle pohybovat při nástupu a výstupu. Důležitý prvek vybavení je vnitřní infopanel, správné řešení předání informací cestujícím může zkrátit zastávky ve stanicích.

Pro dopravní podniky a provozovatele je velmi důležitá spotřeba energie, která je velmi závislá na hmotnosti. Metro neustále zastavuje a akceleruje, proto je důležité redukovat hmotnost vozidel odlehčovacímí otvory a použitím vhodných materiálů. Nejen že se snížením hmotnosti dosáhne lepší spotřeby, ale prodlouží se životnost dílů (brzdy, dvojkolí, kolejnice). Hmotnostní rozdíl mezi vloženým vozem M1 a 81-71M je 5 tun.

Vozidla metra jsou konstruována na životnost několik desítek let. Během celkové životnosti jsou soupravy modernizovány.



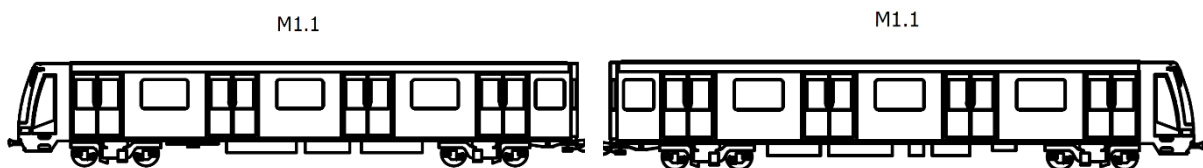
#### 4.1. Technické parametry [6]

Délky vozů: M1.1	19 521 mm
M1.2, M1.3	19 206 mm
Délka soupravy přes spřáhla:	96 660 mm
Šířka skříně:	2 712 mm
Výška vozu:	3 670 mm
Výška podlahy:	1 150 mm
Šířka dveří:	1 300 mm
Rozchod:	1 435 mm
Vzdálenost středů podvozků:	12 600 mm
Rozvor podvozku:	2 100 mm
Konfigurace pojezdu:	Bo + Bo
Průměr dvojkolí:	850 mm
Hmotnost podvozku:	5940 kg
Hmotnost vozů: M1.1	27 900 kg
M1.2	25 900 kg
M1.3	26 600 kg
Maximální provozní rychlost:	80 km/h
Maximální zrychlení (0-30 km/h):	1,3 m/s <sup>2</sup>
Maximální dovolený sklon:	40 ‰
Trakční napětí:	750 V
Trakční motor:	BASu 5529/4
Výkon trakčního motoru:	160 kW
Primární vypružení:	vinuté pružiny
Sekundární vypružení:	vzduchové měchy
Počet dveří vozu:	2x4
Počet míst k stání v soupravě:	1240 osob
Počet míst k sezení v soupravě	224 osob

## 4.2. Technický popis metra M1

Řazení vozů v soupravě je vždy M1.1 + M1.2 + M1.3 + M1.2 + M1.1, kvůli rozdílnému vybavení jednotlivých vozů jsou soupravy nedělitelné, jedná se o tři typy vozů. Metro M1 je kolejové vozidlo závislé trakce. Vozidla metra mají provedení skříň bez strojovny, což zvětšuje kapacitu soupravy, ale nabízí rovnoměrnější zatížení podvozků. Všechna dvojkolí jednotky jsou trakční.

- **M1.1** - čelní vůz (obr. 9), obsahuje stanoviště strojvedoucího, vlakové zabezpečení, trakční kontejner, bateriovou skříň a brzdovou výstroj



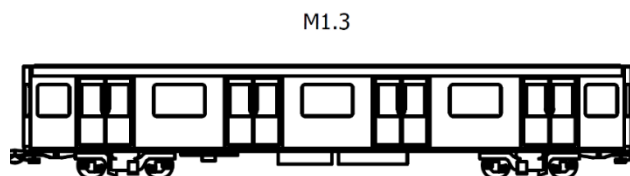
*Obr. 9.: Schéma čelních vozů metra*

- **M1.2** - vložený vůz (obr. 10) umístěný vždy za čelním vozem, obsahuje kompresor pro pneumatické zařízení



*Obr. 10.: Schéma vložených vozů metra*

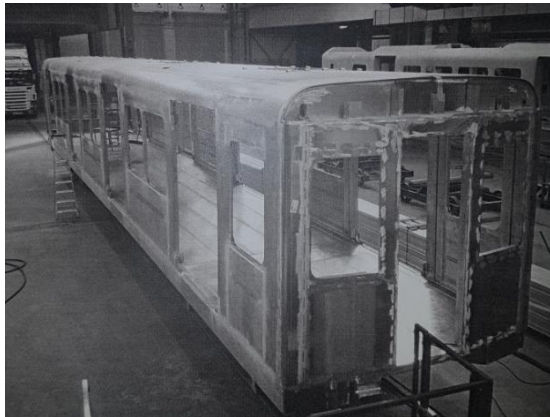
- **M1.3** - prostřední vůz (obr. 11), obsahuje centrální počítač vlaku



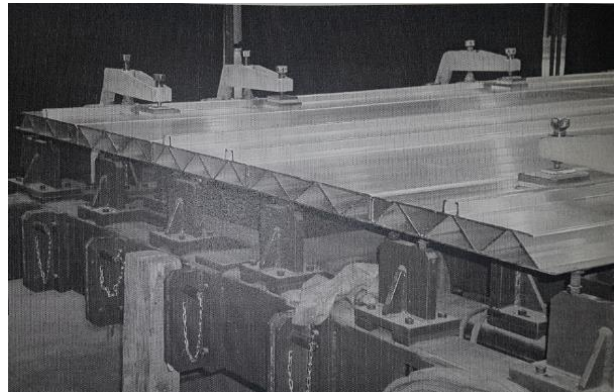
*Obr. 11.: Schéma vloženého vozu metra*

### 4.3. Hrubá stavba

Skříň (obr. 12) vozů je integrální hliníkové stavby. Celá skříň je svařena z protlačovaných hliníkových profilů, do kterých jsou vyfrézovány otvory pro okna. Metro má komplikovanou konstrukci a svaření bočnic, kvůli velkému počtu dveří. Protlačované profily mohou být velmi dlouhé, proto se musí zajistit správné upevnění do svařovacích přípravků (obr. 13), aby nedošlo během svařování k výrazným deformacím. [6]

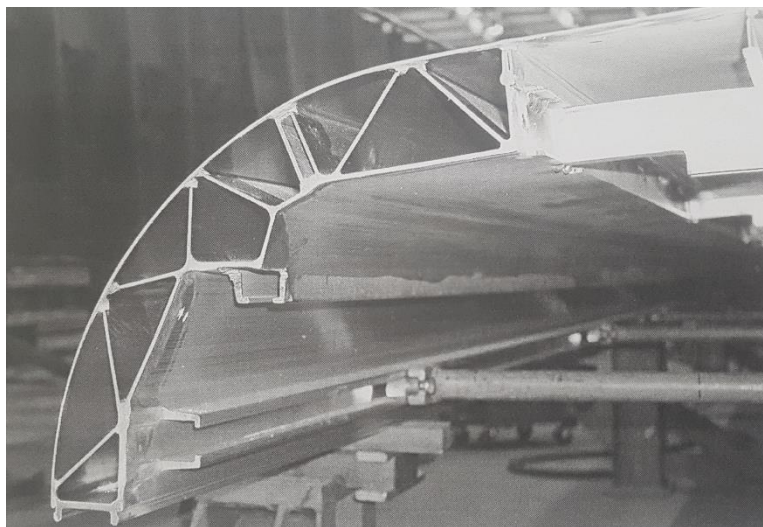


*Obr. 12.: Hrubá stavba metra M1 z protlačovaných profilů [6]*



*Obr. 13.: Svařovací přípravek pro hliníkový profil [6]*

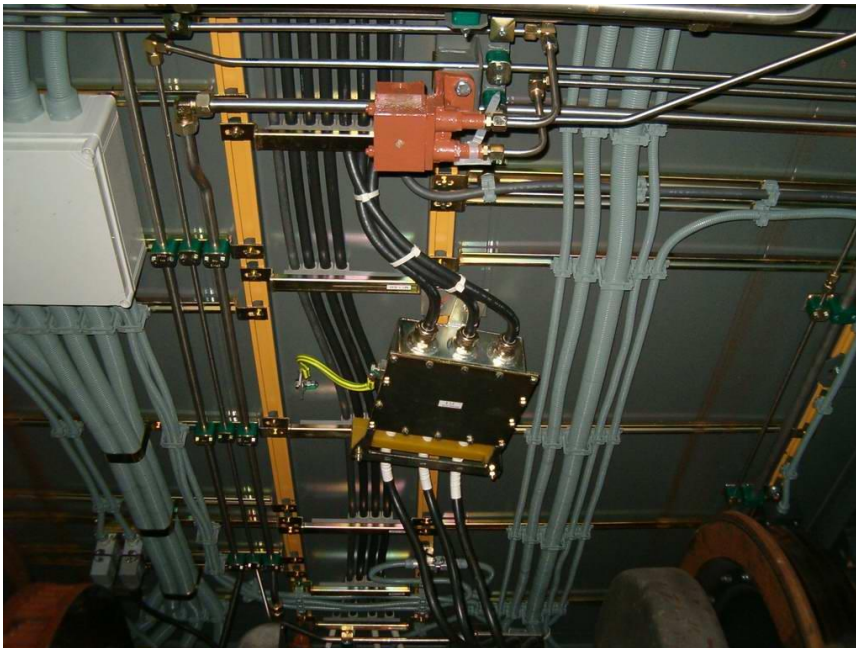
Protlačované profily jsou složitých tvarů a vyráběné na zakázku pro výrobce kolejových vozidel, to umožňuje dosáhnout velmi komplikovaných tvarů. Integrální stavba nabízí snazší vyplnění průjezdného profilu, profily bočnic a střechy mohou být různě tvarované. Konstrukteři skříní kolejových vozidel do protlačovaných profilů umísťují C drážky (obr. 14), které slouží k montáži prvků interiéru a externího zařízení vozidla například na střechu nebo na spodek hlavního rámu mezi podvozky.



*Obr. 14.: Profil střechy metra M1 s viditelnými drážkami a zámky [6]*

Jednotlivé prvky hrubé stavby jako jsou bočnice, střecha, podlaha nelze vytvořit z jednoho profilu, jsou složeny a svařeny z více prvků. Tyto svary jsou zhotoveny v zámčích spoje a mohou probíhat po celé délce vozidla. Svary na skříni vozidla mohou být velmi dlouhé a je potřeba zajistit jejich uniformnost, proto se využívají svařovací roboti.

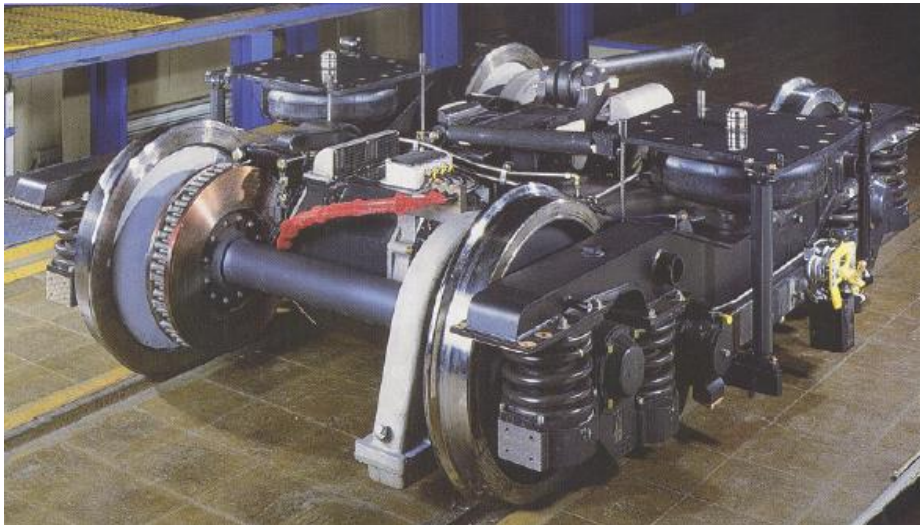
Na obrázku 15 lze vidět C drážky probíhající po celé délce spodku vozidla. Slouží k snadné montáži výbroje vozidla a rozvodům tlakového vzduchu a veškerých kabelů. Výzbroj mají vozidla umístěnou do kontejnerů, které mají vlastní větrání a přístup postranními dvířky.



*Obr. 15.: C drážky na spodku skříně [7]*

#### 4.4. Podvozek

Většina osobních vozů a lokomotiv používá dvounápravové podvozky, zřídka se uplatňují podvozky jednonápravové a vícenápravové. Podvozek je umístěný mezi hlavní rám vozidla a kolej. Podvozky jsou dvou typů trakční a běžné. Podvozky lokomotiv a osobních vozů mají dvojité vypružení, primární vypružení šroubovitými pružinami s paralelním tlumičem, nachází se mezi ložiskovou skříní a rámem podvozku. Sekundární vypružení je zajištěno šroubovitými pružinami s kolébkou, pneumatickým vypružením nebo flexikoilovým vypružením. Sekundární vypružení se nalézá mezi rámem podvozku a skříní vozidla. Tuhost vypružení je nutné rozdělit správně mezi primární a sekundární. [10]



*Obr. 16.: Podvozek metra M1 [8]*

Podvozky vozidel metra M1 (obr. 16) byly konstruovány firmou ADtranz, kterou později koupil Bombardier. Rám má dva prohnuté podélníky a jeden příčný mezi nimi. Celý rám podvozku je svařené skříňové konstrukce tvaru H. Dvojkolí mají průměr 850 mm a rozchod 1435 mm. Brzda je používána elektrodynamická a kotoučová. Dvojkolí jsou monobloková. Pohon je zprostředkován trakčním motorem a jednostupňovou nápravovou převodovkou. Na obou stranách podvozku jsou sběrače proudu. Trakční motor o výkonu 160 kW je na rámu podvozku, pohon je částečně odpružený. Nápravová převodovka je se svislým závěsem a zubová spojka vyvažuje pohyb motoru.

Primární vypružení je typu Flexiguide a vede dvojkolí. Sekundární vypružení podvozku je zajištěno vzduchovou membránovou pružinou, ta umožňuje změnou tlaku regulovat výšku podlahy vůči nástupišti. Tlumiče na podvozku utlumují vznikající kmitání. Příčné pohyby jsou vymezeny pryžokovovými dorazy. Tažné a brzděné síly mezi skříní a podvozem přenáší tažné tlačná tyč. Podvozek má vysokou bezpečnost proti vykolejení.

Trakční motor o výkonu 160 kW je na rámu podvozku, pohon je částečně odpružený. [8]

#### 4.5. Napájení a pohon – systémy trakce

Trolejové vedení se používá u metra, které je vedeno převážně povrchově a není překážkou větší výška vozidla. Toto řešení je nevhodné do tunelů. Vozidla metra fungující v tunelech většinou používají napájení třetí kolejnicí (obr. 17).



*Obr. 17.: Napájení třetí kolejnicí pražského metra [7]*

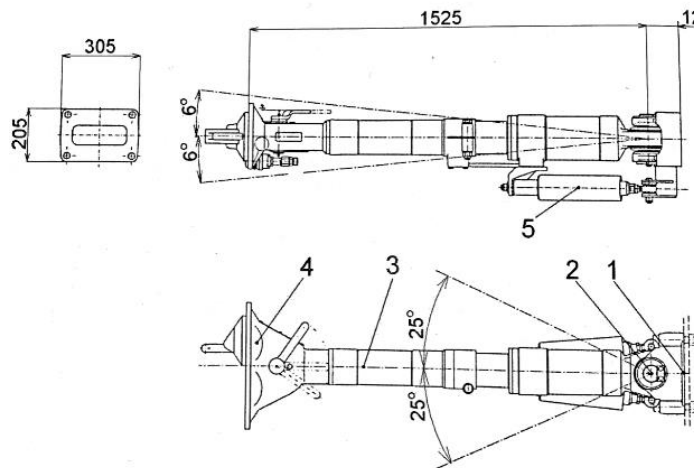
Vozidla metra M1 existují v obou konfiguracích. Pražské M1 je napájeno třetí kolejnicí. Metro M1 vyrobené pro venezuelské město Maracaibo (obr. 18) má vrchní sběrač proudu. Pohon soupravy metra M1 je zajištěn asynchronními trakčními motory, trakční napětí je 750 V.



*Obr. 18.: Metro se střešním sběračem v Maracaibo [9]*

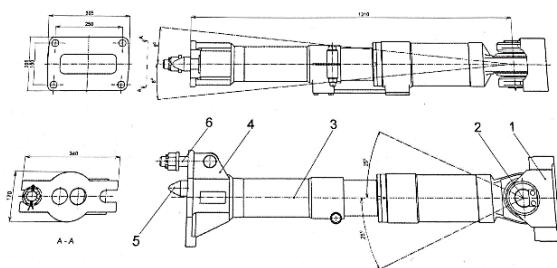
#### 4.6. Spřáhlo a nárazníky

Čelní vozy metra M1 jsou vybaveny automatickými spřáhly od firmy Dellner. Spřáhlo (obr. 19) se skládá ze základního tělesa - 1, otočného kloubu - 2, tělesa spřáhla - 3, které tlumí rázy hydraulickým tlumičem. Hlava spřáhla – 4, typu Scharfenberg. Na obrázku lze vidět rozměry spřáhla a jeho výkyvné vertikální a horizontální úhly. Spřažení vozů je řešeno mechanicky a pneumaticky. Tímto způsobem se vozy spojují pouze výjimečně, při poruše nebo jiné události. Pokud by mělo docházet k častému spojování je výhodnější vozy vybavit elektrickým propojením. [6]

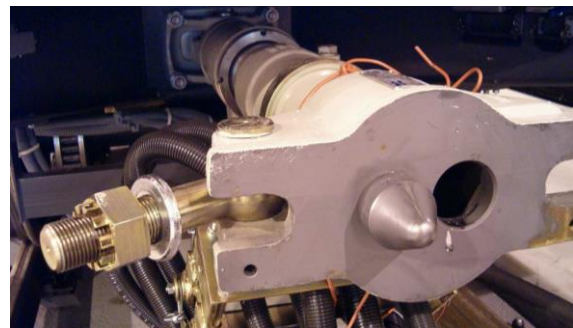


Obr. 19.: Spřáhlo Dellner čelních vozů metra [6]

Vložené vozy jsou spojeny semipermanentními spřáhly (obr. 20, obr. 21) firmy Dellner. Tento typ spojuje vozy pouze mechanicky, jelikož vozy metra jsou trvale spojeny a k jejich rozpojení dochází jen při servisu nebo záměně vozu v soupravě. Konstrukce semipermanentního spřáhla je podobná jako permanentního liší se hlava spřáhla. Spojení je provedeno pomocí otočné šroubu a korunové matice zajištěné závlačkou. [6]



Obr. 21.: Semipermanentní spřáhlo vložených vozů [6]



Obr. 20.: Detail čela spřáhla [5]

Kolejová vozidla se podle odolnosti proti nárazu rozdělují do 4 kategorií podle normy ČSN EN 15 227. Vozidla metra spadají do kategorie C-II, každá kategorie má předepsané nejtypičtější kolize a má zajistit ochranu cestujících. Pro vozidla metra připadá v úvahu pouze kolize s totožnou jednotkou, metro funguje jako samostatný systém bez kontaktu se silniční nebo železniční dopravou. [8]

#### **4.7. Dveře a okna**

Konstrukce a provedení dveří a oken se značně liší podle typu vozidla. Dveře vysokorychlostních vlaků musí být zejména tlakotěsné. Dveře vozidel městské hromadné dopravy se často otevírají a musí být dostatečně spolehlivé a rychlé. Většina moderních vozidel má automatické dveře elektrické nebo pneumatické. Mechanismus dveří je zpravidla umisťován do horní části. Dveře musí být vybaveny nouzovým odblokováním, pro otevírání ručně v případě nouze.

Typy konstrukcí dveří metra:

- Jednokřídlé – používané především u vozů dálkové dopravy
- Dvoukřídlé – MHD a příměstská doprava, kde je potřeba rychlá výměna cestujících

Podle způsobu otevírání:

- Výkyvné – výkyvný pohyb kolem dvou svislých os
- Předsuvné – dveře se vysunou z úrovně bočnice a posouvají se podél ní
- Posuvné kapsové – dveře se zasouvají do prostoru v bočnici
- Posuvné – dveře jsou předsazeny a posouvají se po bočnici

Boční okna kolejových vozidel musí dobře izolovat hluk a teplo, zároveň by měla poskytovat cestujícím dobrý výhled ven. Okna musí být dostatečně pevná, aby dokázala odolat tlakovým vlnám. Podle toho, zda je vůz klimatizován, mohou být okna otevírací. Čelní okna vozidel musí zaručit dobrý výhled strojvedoucího a zaručit mu dostatečnou ochranu v případě kolize s objektem. Čelní okna určují vzhled vozidla a výrazně ovlivňují jeho aerodynamiku.

Okna jsou slabým místem v oblasti tepelné izolace vozidel, proto vozidla, u kterých není velký nárok na nízkou hmotnost používají dvojitá skla. Metra a tramvaje upřednostňují nízkou hmotnost kvůli častému zastavování, proto tepelná izolace nehraje tak velkou roli při návrhu. Pevná okna jsou levnější a mají snadnou montáž, pokud ale přestane fungovat klimatizace jednotky v letních měsících může být vůz nekomfortní až nebezpečný. Některá vozidla mají okna jako únikový východ, v blízkosti okna je umístěno kladívko na rozbití okna. [8]



Vozy metra M1 mají předsvuné dveře, které se vysouvají z roviny bočnice vozu ven a poté se vysouvají do stran. Dveře lze otevřít z prostoru pro pasažéry tlačítkem, nebo ze stanoviště strojvedoucího. Pro tyto dveře je nutné zajistit rychlost otevírání, ale také jejich bezpečnost, pokud někoho přivřou. Při zavírání dveří se musí kontrolovat jejich citlivost a změřit sílu, jakou působí při dovírání. Špičková síla tohoto zavírání nesmí být větší než 300 N. Dalším důležitým aspektem je signalizace zavření dveří a zablokování rozjezdu vozidla, pokud některé dveře nejsou plně zavřené. [6]

Provedení dveří a jejich umístění má vliv na cestovní rychlost. Dveřnatost je ukazatel poměru délky dveří na jedné straně vozidla vůči celkové délce vozu. Pro vozidla MHD je kritické zajistit co největší dveřnatost, aby se mohli cestující na zastávce rychle pohybovat. Dveřnatost se přibližně pohybuje pro vozidla městské dopravy okolo 25 %, příměstská vozidla 10 % a dálkové vozy 5 %. [6]

Dveřnatost pro vložené vozy:

Metro M1 má na každé straně 4 dveře, které se rozevírají do šířky 1300 mm.

$$d = \frac{\sum a_i}{l} \cdot 100 = \frac{5200}{19206} \cdot 100 = 27,1\% \quad (1)$$

Dveřnatost pro čelní vozy:

$$d = \frac{\sum a_i}{l} \cdot 100 = \frac{5200}{19521} \cdot 100 = 26,6\% \quad (2)$$

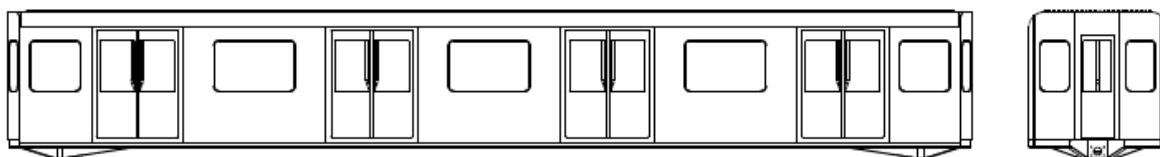
d – dveřnatost [%]

a – šířka dveří [mm]

l – délka vozu [mm]

Okna mají vozy metra M1 pevná lepená. Lepení je náročný proces, musí se pečlivě odmastit doléhající plochy a lepidlo správně vytvrdit. Pevná okna zaručují jednotlý a nerušený vzhled vozidla a menší hmotnost oproti oknům otevíracím. Existuje mnoho řešení konstrukce pevných i otevíracích oken pro různé aplikace.

Rozměry mého modelu (obr. 22) odpovídají vnějším rozměrům metra M1, proto i dveřnatost se shoduje.



Obr. 22.: Pohled na bok hrubé skříně mého návrhu

## 4.8. Interiér

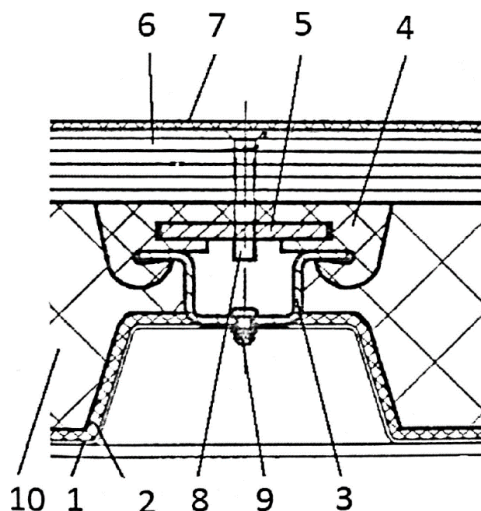
Interiér kolejových vozidel je složen z několika hlavních částí, které jsou připevněny na hrubou stavbu nebo vzájemně na sebe. Interiér lze rozdělit na podlahu, izolaci, obložení, příčky, madla, sedadla, vybavení pro komfort cestujících (osvětlení, vzduchotechnika, toalety, infopanely).

Při návrhu interiéru se výrobci zaměřují na několik zásadních aspektů, kterými jsou estetický vzhled interiéru, barevné kombinace a jejich vliv na cestující, nehořlavost, odolnosti proti opotřebování a vandalismu.

### 4.8.1. Podlaha

Podlaha vozidel metra má na rozdíl od podlahy tramvajových vozidel nosnou konstrukci. Provedení podlahy se liší podle konstrukce hrubé stavby skříně vozidla. Podlaha přenáší zatížení od cestujících, sedadel a dalších prvků interiéru. Je nutné zajistit správné odtoky vody, kterou zanesou cestující do vozidla a materiál který bude odolávat opotřebení a zároveň bude snadno omyvatelný.

Řez podlahou vozidla metra diferenciální konstrukce lze vidět na obr. 23. Podlaha metra se skládá z vlnitého plechu 1, většinou je tloušťky 1 – 1,5 mm. Na vlnitém plechu je nanášena protihluková izolace 2. Plech 3 je přinýtován na vlnitý plech a je na něm nasazen gumový profil 4. Deska z překližky 6 je upevněna šroubem 8. Horní vrstva 7 je protiskluzová a barvy interiéru. Prostor mezi vlnitým plechem a překližkou vyplňuje izolace 10. [6]



Obr. 23.: Řez podlahou vozidla metra diferenciální konstrukce [6]

Podlaha metra integrální konstrukce (obr. 24) se umísťuje na protlačovaný hliníkový profil. Přímou na hliníkové profily se pokládá pryžová deska, která funguje jako zvuková a tepelná izolace. Dále se jako poslední část upevní sendvičová deska s protiskluzovým povrchem nebo nehořlavá překližka – metro M1. Výhodou sendvičů s pěnovým jádrem je jejich několikanásobně nižší hmotnost oproti překližce. [6]



*Obr. 24.: Řez podlahou metra integrální konstrukce se sendvičovou deskou a pryžovou izolací [6]*

#### **4.8.2. Obložení madla a ostatní vybavení**

Konstrukce jsou obloženy plechy, které jsou při jízdě náchylné k vibracím a tím vytvářejí nadměrný hluk. Ke snížení vibrací se používají antivibrační nástřiky. Tepelnou izolaci většinou tvoří minerální vlny, různého provedení.

Na vnitřní obložení interiéru se hodně využívá skelný laminát. Příčky a zástěny mohou být vytvořeny z různých laminátů a kompozitu, které se velmi využívají pro svou nízkou hmotnost a příznivé materiály.

Madla jsou trubky obvykle průměru 30 až 40 mm tloušťky 2 a 3 mm. Trubky jsou různě ohýbané, aby kopírovaly linie interiéru a udržovali si stálou výšku. Je potřeba správné ergonomické rozmístění, aby madla nechyběla v místech, kde cestující budou stát, ale zároveň nepřekážela při pohybu dovnitř a ven vozidla. Většinou jsou madla z oceli nebo nerezů s povrchovou úpravou práškováním. Nerezové trubky mohou být pouze leštěné bez povrchové úpravy. Trubky madel se spojují pomocí spojovacích prvků šroubovými spoji, aby šli v případě poškození snadno vyměnit. [6]

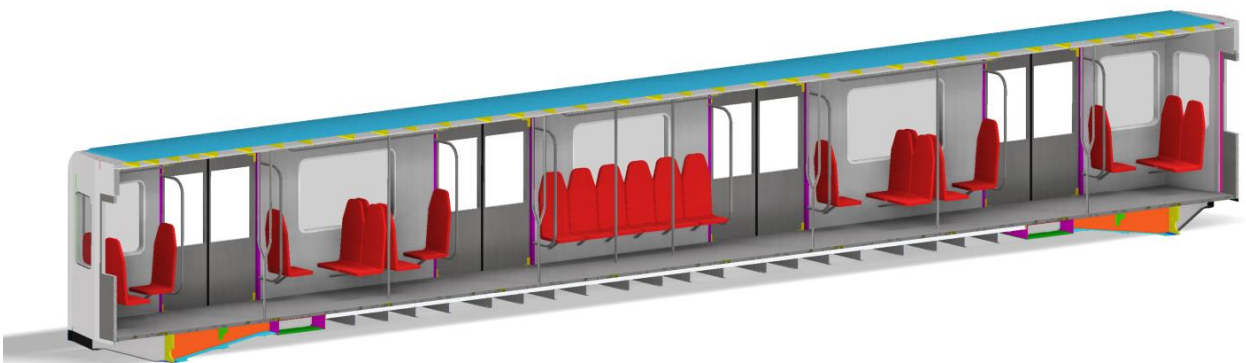
Dalšími nezbytnými prvky interiéru (obr. 25) jsou reproduktory, osvětlení, větrání, klimatizace a vytápění – záleží na podmínkách provozu vozidla, místo pro vozíčkáře a kočárky, nouzové východy a přechodové měchy, pokud jsou vozidla průchozí. Větrání ve vozidle je přetlakové pomocí větráků ve střeše vozu, vzduch je rozveden větracím kanálem v centrální části stropu.



*Obr. 25.: Interiér metra pro Řím s nerezovými madly a plastovými sedačkami, pražské metro čalouněné sedačky a povrchově upravená madla [6]*

#### **4.8.3. Sedačky**

Metro M1 má uspořádání sedaček (obr. 26) v konfiguraci příčně 2+1 a 1+2. Podélně uspořádané sedačky ve středové části vozu mezi dveřmi. Podélná konfigurace vytváří více místa pro stojící cestující ve středu vozu.

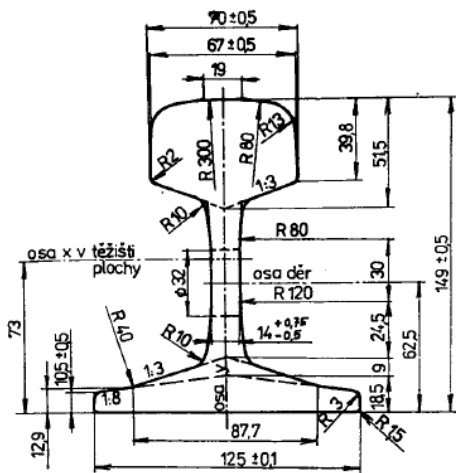


*Obr. 26.: Rozmístění sedaček metra M1*

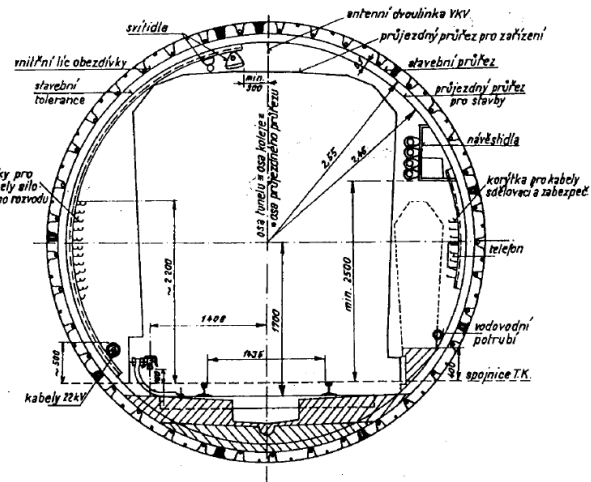
#### 4.9. Kolej a tunel

Konvenční tratě metra mají dvojí provedení, častější dvoukolejné a méně časté jednokolejné v nezávislých tunelech. Rozchod koleje pražského metra 1435 mm, vzdálenost pražců je 0,61m. Tratě metra zpravidla tvoří samostatnou síť, výjimkou je například metro v Amsterdamu, spojuje se zde linka metra a tramvaje. Nekonvenční tratě mají mnoho variant maglev, monorail, metro na pneumatikách a další. [4]

Pražské metro používá širokopatní stojinovou kolejnici S49 (obr. 27). Označení S – Schiene (německy – kolejnice), číslo 49 udává hmotnost úseku jednoho metru kolejnice. Kolejnice jsou umístěny na pražce nebo betonový podklad. [13]



Obr. 28.: Průřez kolejnice S49 [4]



Obr. 27.: Průřez tunelem pražského metra [14]

Tunelové trouby mohou být kruhové, eliptické nebo obdélníkové. Tunely se razí nebo budují v otevřené jámě. Při budování metra se vytvořili čtyři charakteristiké typy podle způsobu budování. Tratě a stanice berlínského metra jsou budované v otevřených jáměch jako železobetonové konstrukce. Pařížské metro je budované tunelářsky, stanice a tunely mají klenbový tvar. Londýnské metro budováno tunelářsky, tratě jsou vedeny v samostatných tunelových troubách. Moskevský typ metra má jednokolejné tunely, budované v hloubce 25-40 m.

Stanice metra mohou být podzemní nebo povrchové. Budování stanic se spojuje s podchody a různým zázemím pro cestující. Pohyb cestujících a překonání výšek umožňují schody, eskalátory a výtahy. Stanice pražského metra jsou trojlodní. [14]

Tunel pražského metra (obr. 28) má vnitřní průměr ostění 5,10 m a vnější průměr 5,50 m.

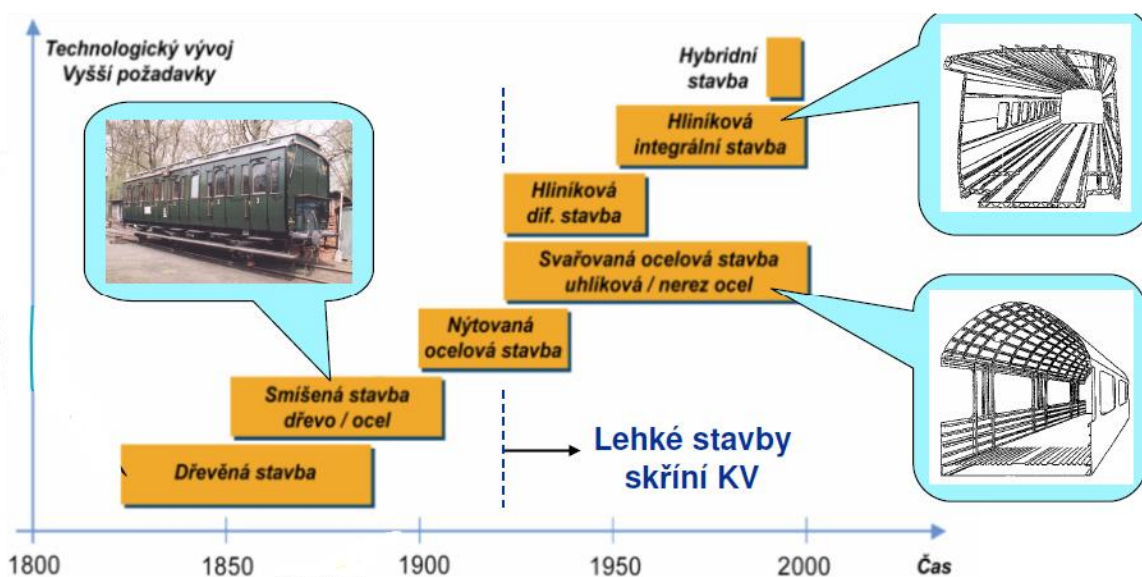
## 5. Konstrukce skříň kolejevých vozidel

Skříň kolejového vozidla je nosná konstrukce vozidla nad systémem vypružení, na kterou jsou upevněny další části vozidla. Skládá se z hrubé stavby, vnitřního obložení a interiéru. Podobně jako karoserie automobilu je hrubá stavba kolejového vozidla samonosná konstrukce. Hrubá stavba je složena ze spodku, čelnic, bočnic, střechy a pro dvoupodlažní kolejová vozidla ještě z podlahy druhého patra. Pro vozidla metra je důležitá vysoká dveřnatost a modularita. Tramvaje musejí být nízkopodlažní pro snadný přístup a snadno opravitelné kvůli častým střetům s automobily. U vysokorychlostních vozidel je kladen důraz na tlakotěsnost, komfort a aerodynamiku.

Hrubá stavba musí odolat všem silám zatěžující vozidlo při provozu, ale také při výjimečných situacích jako je například náraz při nehodě nebo zdvihání vozidla. Dále hrubá stavba slouží jako prostředek pro montáž vybavení vozidla a zajištění podmínek pro cestující.

Konstrukce hrubé stavby železničního vozidla musí odpovídat provozním podmínkám vozidla a požadavkům vozidla, které stanovuje norma ČSN EN 12 663. Obvykle jde o pevnost, snadnou opravitelnost, nízkou hmotnost a požární odolnost. Živostnost vozidel bývá obvykle předpokládána na 30 let. [10]

Na obrázku 29 lze vidět postupný technologický vývoj skříní vozidel, který se měnil s nároky na vyšší rychlost jízdy a užitnou hmotnost a vývojem výrobních technologií a materiálů. [12]



Obr. 29.: Vývoj konstrukce skříní kolejových vozidel s postupem času [12]

Výhod lehké stavby je celá řada technických, ekonomických a ekologických:

- Vyšší užitečná hmotnost
- Vyšší rychlost
- Větší dojezd
- Nižší spotřeba energie
- Menší opotřebení kolejnic a dvojkolí
- Nižší poplatky za použití dopravních cest

Nevýhody lehké stavby vycházejí z komplikovanosti:

- Vývoj a výpočty (velký objem výpočtů a zkoušek)
- Nákladné materiály
- Komplikovanost výroby (svařovací přípravky, svařovací technologie)

Hmotnost vozidla se promítá do jízdního odporu (3) a tím také do spotřeby energie vozidla. Každá redukce hmotnosti se kladně projeví na snížení jízdního odporu. Hmotnost skříně tvoří 12–20 % celkové hmotnosti vozidla. [10]

$$W = c_1 \cdot m \cdot g \pm s \cdot g \cdot m \pm a \cdot m + C_1 \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (3)$$

W – jízdní odpor vozidla  
m – celková hmotnost vozidla  
c<sub>1</sub> – součinitel odporu valení  
C<sub>1</sub> – součinitel odporu vzduchu  
A – čelní plocha  
P – hustota vzduchu

Podobu skříně metra v průřezu určuje průjezdný průřez tedy tunel. Dále podobu ovlivňuje délka a výška nástupiště, délka skříně, počet dveří, počet oken, počet sedaček a volba podvozků.

V současné praxi se používají tři hlavní způsoby konstrukce popsané níže, každý z těchto způsobů má své přednosti a podle toho je vhodný k určité aplikaci.

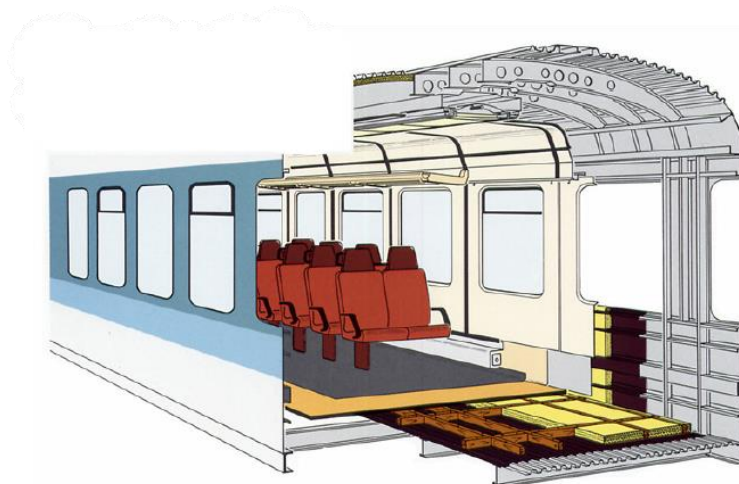
## 5.1. Diferenciální stavba hrubé skříně

Diferenciální stavba (obr. 30) je definována jako plechem obložená svařovaná konstrukce z podélně probíhajících nosníků a příčných obvodových žeber. [8]

Každý stavební díl hrubé stavby vzniká spojováním jednotlivých prvků.

- Spodek (hlavní rám) - tvoří základ, je svařen z válcovaných podélníků, příčnicků (válcované nebo ohraňované), představku a podlahy (vlnitý plech)
- Bočnice – příhradová konstrukce s oplechováním
- Střecha – kostra s plechovým opláštěním (mnoho provedení kružin a výtuh)

Části výše popsané jsou zhotoveny v přípravcích, prvky samy o sobě nemají dostatečnou tuhost, teprve spojením do celku vytvoří tuhou skříň. Diferenciální hrubá stavba může být navržena z hliníku, ale častěji se používá ocel a nerezová ocel vzhledem k vysokému počtu svarů. [10]



Obr. 30.: Ukázka diferenciální stavby hrubé skříně [8]

Výhody:

- Použití normalizovaných profilů a plechů – nízké pořizovací náklady, nízká cena materiálu a polotovarů
- Možnost hmotnostně optimalizovat konstrukci
- Snadná opravitelnost – vyjmutí poškozených částí a jejich nahrazení je snadné
- Nízká náročnost výroby
- Lepší deformační vlastnosti ocelové skříně při nehodě

Nevýhody:

- Velký počet montážních dílů a svarů – vysoké výrobní náklady

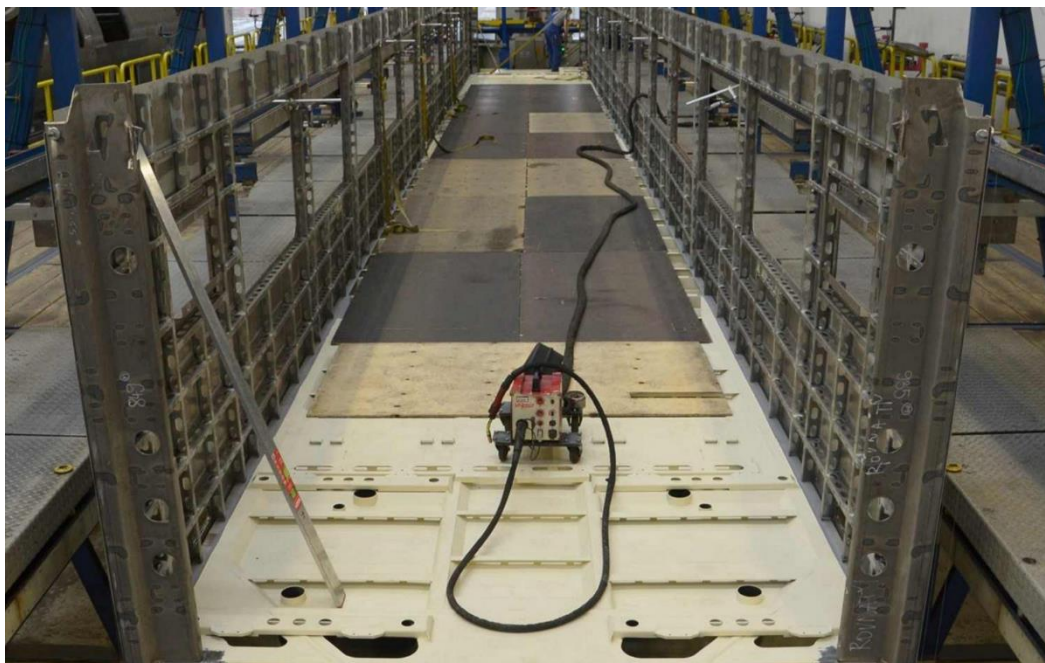


Ukázkou provedení diferenciální ocelové konstrukce je vysokorychlostní vlaková souprava Siemens Viaggio Comfort (obr. 31). Skříň tohoto kolejového vozidla je tlakotěsná a jednotlivé vozy jsou průchozí. Vůz má ohraňované podélníky, podlahu z vlnitého plechu, bočnice se skládají z plechů a ohraňovaných Z profilů. Střecha je také z vlnitého plechu, vyztužená příčnickami mezi vaznicemi.



*Obr. 31.: Vysokorychlostní vlak Siemens Viaggio Comfort [15]*

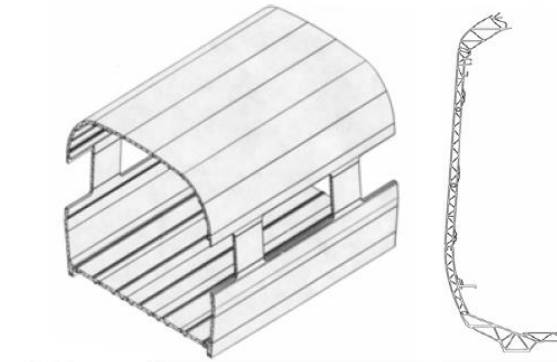
Na obrázku 32 je vůz Viaggio Comfort upnutý do přípravku v procesu svařování. Lze vidět příhradovou konstrukci bočnic a zesílené sloupky okolo dveří. Zároveň lze také vidět odlehčovací otvory na bočnicích.



*Obr. 32.: Diferenciální stavba hrubé skříně [15]*

## 5.2. Integrální stavba hrubé skříně

Každý stavební díl se skládá z jednoho stavebního celku. Používá velké protlačované hliníkové profily (obr. 33), probíhající po celé délce skříně. Profily tvoří nosnou strukturu a mají v sobě začleněny prvky pro upevnění komponentů interiéru a vnějších komponent. Na rozdíl od diferenciální konstrukce má tato hrubá stavba méně dílů a svarů (obr. 34).



Obr. 33.: Ukázka skříně z hliníkových protlačovaných profilů [8]

Výhody:

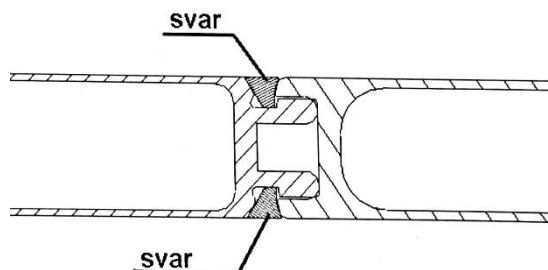
- Málo navařovaných dílů – nižší výrobní náklady
- Integrovaná funkce Al profilů
- Vhodné k automatizaci
- Snadněji recyklovatelné než ocelivé skříně

Nevýhody:

- Nelze hmotnostně optimalizovat – průřez je dimenzován na nejkritičtější místo
- Vysoké náklady na výrobu – individuální výroba
- Náročná výrobní technologie – složité přípravky, svařovací roboti
- Obtížně opravitelné – protlačované profily mají velkou délku

Použití integrální skříně je výhodné pro dlouhé skříně bez dveřních otvorů ve středu. Například pro regionální a vysokorychlostní vlaky, které mají dlouhé bočnice, nebo vysoké kvůli druhému podlaží. [10]

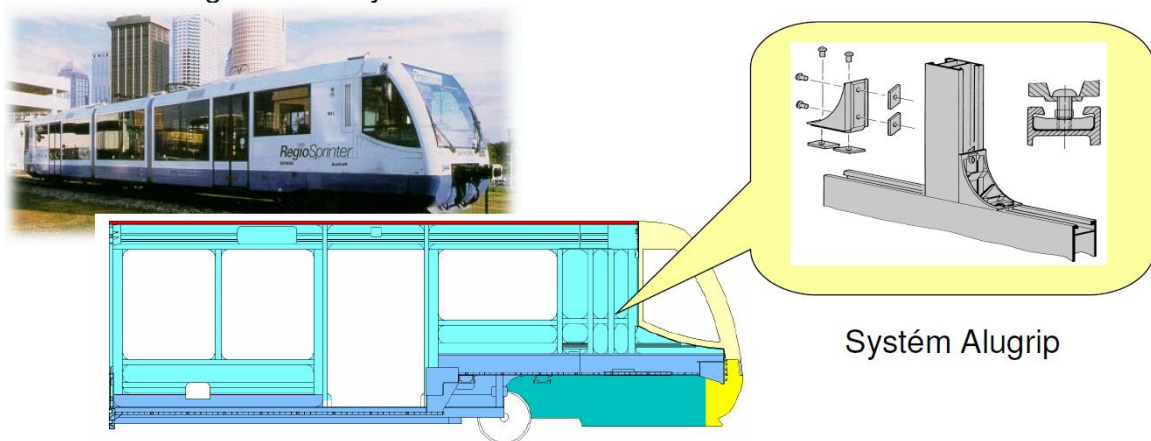
Použití hliníkových profilů pro vozy metra ztrácí své výhody kvůli velkému počtu dveří a oken v bočnicích. Hliníkové vozy metra jsou tedy částečně svou konstrukcí diferenciální.



Obr. 34.: Spojování profilů pomocí svarů [10]

### 5.3. Hybridní stavba hrubé skříně

Kombinace diferenčně integrální stavby. Každý stavební díl se skládá z různých materiálů. Díly s velkou členitostí jsou z kompozitů. Tento způsob konstrukce nabízí optimální použití jednotlivých materiálů a technologií podle jejich vlastností. [8]



Obr. 35.: Hybridní stavba hrubé skříně [8]

Výhody:

- Optimální využití specifických vlastností použitím různých materiálů
- Nízká hmotnost
- Snadné opravy

Nevýhody:

- Náročné technologie spojování
- Obtížná recyklace

Hybridní konstrukce (obr. 35) využívají více studených spojů (lepení, šroubový spoj, nýtování), než diferenční a integrální stavby. Tento fakt se může ukázat jako výhoda, protože na rozdíl od svařování při nich nevznikají deformace a teplotní ovlivnění materiálu, je ale potřeba promyslet a otestovat spojování jednotlivých dílů, aby nedocházelo k tvorbě prasklin a elektrolytické korozi. Tento způsob konstrukce skříně vozidel je nákladný na výrobu a také na návrh, lze docílit velmi optimalizovaných konstrukcí.

#### 5.4. Používané materiály pro konstrukci skříně [10]

Nosná struktura kolejových vozidel je většinou svařena z oceli a hliníku. Rozsah vzhledem k teplotám, v jakých bude vozidlo operovat se musí kontrolovat vrubová houževnatost, která by neměla klesnout pod  $KCV = 27 \text{ Jcm}^{-2}$ , aby se předešlo křehkému lomu. Důležitý je uhlíkový ekvivalent pro správnou svařitelnost ocelí, u hliníkových skříní se musí dát pozor na elektrolytickou korozi. Pro tvarově komplikovanější díly se vyplatí použití plastů a kompozitů (skelný laminát).

Pro diferenciální stavby se používají materiály:

- Standartní ocel,  $R_m 370\text{-}450 \text{ MPa}$  .. RSt 37-2 (1.0038) ČSN EN 10 025-2
- Standartní ocel,  $R_m 480\text{-}620 \text{ MPa}$  .. RSt 37-2 (1.0570) ČSN EN 10 025-2
- Ocel S355 J2G3 s mezí kluzu  $Re 355 \text{ MPa}$  a mezí pevnosti  $R_m 500 \text{ MPa}$
- Ocel S500 QL s mezí kluzu  $Re 500 \text{ MPa}$  a mezí pevnosti  $R_m 590 \text{ MPa}$
- Nerozové oceli – např.: X5CrNiMoTi15-2 se smluvní mezí kluzu  $Re 550 \text{ MPa}$  a mezí pevnosti  $R_m 750 \text{ MPa}$

Pro integrální stavbu se používá:

- Protlačované profily – AlMgSi0,7
- Vnější oplechování – AlMgSi0,5
- Příčné střešní profily – AlZn4,5Mg1

Při svařování skříně dochází k degradaci materiálu a poklesu jeho dovolené napětí, toto nejvíce ovlivňuje hliník a pokles podle podmínek svaru může být až o polovinu.

## 6. Aplikace odlehčovacích otvorů v dopravních prostředcích

Odlehčovací otvory jsou v praxi používané už dlouho, ale v současnosti při využití výpočetních softwarů mohou být aplikovány s velkou přesností a efektivně. Snížení hmotnosti dopravních prostředků má pozitivní vliv na jízdní/letové vlastnosti, ale také na ekologii a ekonomičnost provozu. Výrobci všech dopravních prostředků jsou nuceni státy a zákazníci neustále snižovat spotřebu své flotily, toho se snaží dosáhnout vývojem optimalizované struktury vozidla nebo zdokonalením pohonné soustavy. Konstrukteři musí najít správný balanc mezi bezpečností, životností a minimální hmotností.

V tomto ohledu hraje velkou roli sériovost výroby. Automobilový průmysl si může dovolit při své obrovské produkci v milionech dílů, každý plech na karosérii vozu ideálně navrhnout, aby splňoval pevnostní a tuhostní podmínky a zároveň nevznikalo hodně odpadu. Výrobci letadel nejsou tolik omezováni cenou, což jim umožňuje využití nákladných technologií a přesného návrhu. Výroba kolejových vozidel se pohybuje ve stovkách kusů, proto se musí odlehčování vozidel zajistit tak aby výrazně nezdražovalo každý díl.

### 6.1. Automobily

Většina automobilek, vyrábějící osobní vozy používá výhradně samonosnou karosérii (obr. 36). Samonosná karosérie je velký technologický skok od nosného rámu, na který se umístila karoserie. Celý celek automobilu lze optimalizovat jako jeden velký díl, je svařen z plechů různých pevností a nabízí lepší vlastnosti automobilu ať bezpečnostní nebo ovladatelnosti. Výrobci tloušťky plechů a jejich vlastnosti tak optimalizují, že odlehčovací otvory nejsou výrazné a mohou být použity například pro vedení kabelových svazků, nebo pro řízení deformačních zón. Otvory lze najít v malém počtu na velkých plošných dílech například na kapotě a výztuhách sloupků.



*Obr. 36.: Pohled na samonosnou karosérii vozu mercedes G, odlehčovací otvory jsou patrné na výztuhách dveří [19]*



*Obr. 37.: Rám užitkového vozu Chevrolet Silverado [20]*

Starší koncepce nosného rámu s oddělenou karosérií se používá dodnes u terénních vozidel, nebo u některých nákladních a užitkových vozidel. Karosérie je nesena mohutným rámem, na kterém lze vidět aplikaci odlehčovacích otvorů. Na obrázku 37 je užitkový vůz Silverado, vyráběný v konfiguracích s korbou, plošinou a podobně.



*Obr. 38.: Otvory vytvořené v U profilech rámu vozidla Chevrolet Silverado [20]*

Otvory jsou vytvořeny ve středové části U profilů spojujících podélné části rámu (obr. 38), podobně jako u spodku kolejového vozidla.

## 6.2. Letectví

Výrobci letadel se mají snahu zkonstruovat a vyrobit co nejúspornější letouny, úspory motivují letecké společnosti k nákupu nových letadel. Každý kilogram může po roce provozu letadla znamenat ušetřené tisíce na palivu. Na obrázku 39 lze vidět řez trupem letounu Airbus A300, jsou na něm patné otvory různých tvarů v profilu podlahy. Plechy podlahy nákladového prostoru a prostoru pro cestující, jsou viditelně odlehčeny.



*Obr. 39.: Řez trupem letadla A300, příčnky podlahy mají patné odlehčení podobně jako rám automobilu a kolejových vozidel [21]*

Obrázek 40 zobrazuje spodní část Airbusu A380, tento prvek zvyšuje tuhost a pomáhá přenášet vysoká zatížení od podvozků. Lze na něm vidět odlehčovací otvory různých tvarů od elipsy po trojúhelníky. Otvory mají vždy zaoblené rohy, aby se předešlo vysoké koncentraci napětí a tvoření trhlin.



*Obr. 40.: Část ocelové konstrukce Airbusu A380 zvyšující tuhost konstrukce [21]*

### 6.3. Kolejová vozidla

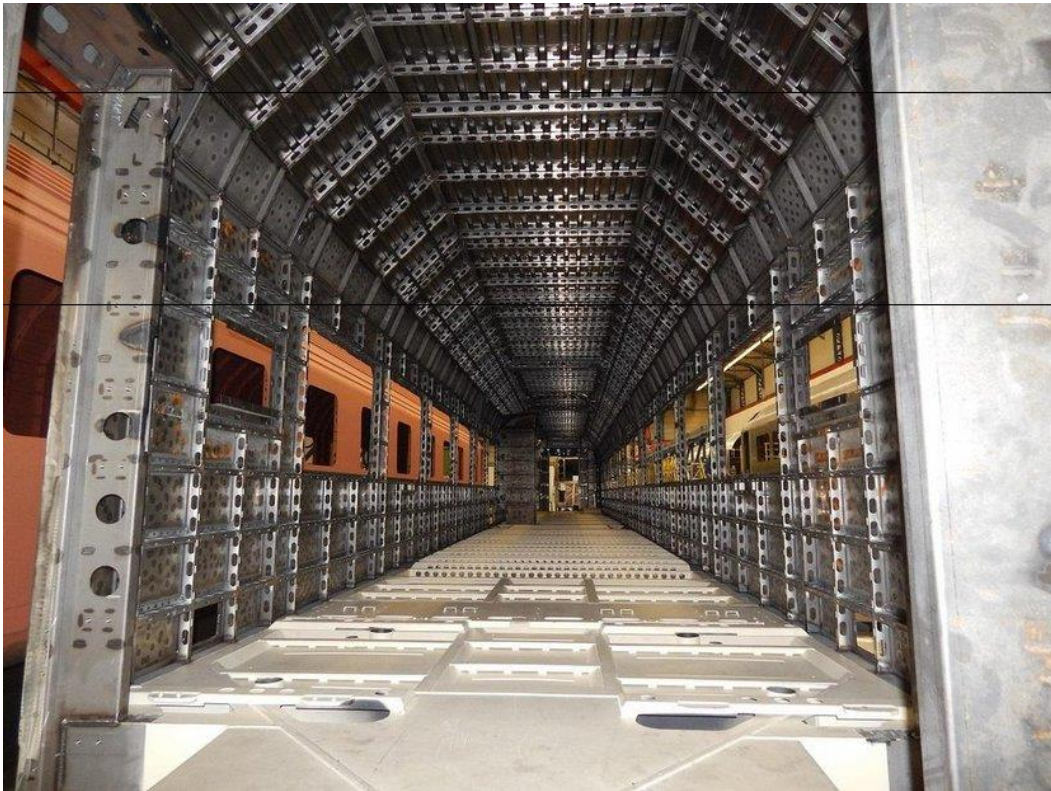
Odlehčovací otvory se používají zejména na diferenciální ocelové stavbě. Ta bývá nejčastěji používána na vozidla metra, tramvaje a lokomotivy. Odlehčování se provádí hlavně na příčnících hlavního rámu a střechy, dále také na sloupcích bočnic. Na obrázku číslo 41 je hrubá stavba tramvaje.



*Obr. 41.: Hrubá stavba tramvaje Avenio [15]*

Kolejová vozidla lze touto metodou velmi dobře hmotnostně optimalizovat. Použití otvorů je omezeno technologií použitou na výrobu. Vyplatí se optimalizovat objemné díly a díly s velkou tloušťkou materiálu. Vzhledem k velkým rozměrům kolejových vozidel a velkému počtu opakujících se dílů dává smysl odlehčovat opakující se typy dílů stejným způsobem. Pokud by se optimalizoval, každý díl zvlášť navyšoval by se počet výkresové dokumentace a složitost výroby. Na rozdíl od velkovýroby automobilů se musí najít balanc mezi šetřením hmotnost a složitostí konstrukce.





*Obr. 42.: odlehčovací otvory ve skříni vozidla Railjet [15]*

Na obrázku 42 je vidět využití odlehčovacích otvorů v hrubé stavbě vozidla Railjet. Na příčnicích podlahy jsou kruhové otvory.

## 7. Vlivy odlehčovacích otvorů

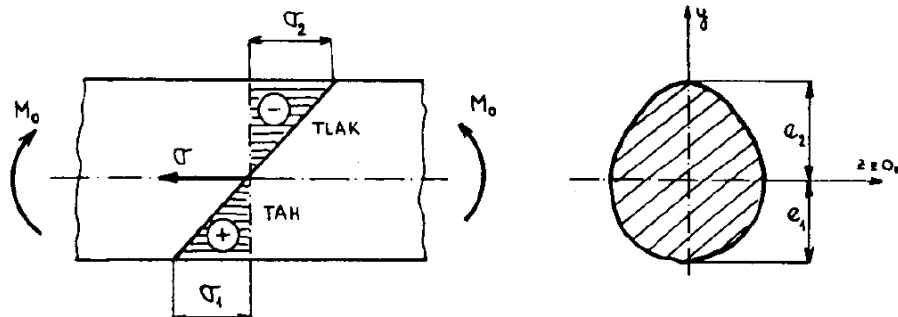
Deformaci skříní kolejových vozidel vyvolávají hlavně síly působící na spřáhlo a podlahu, nejvíce je konstrukce kolejového vozidla a její části namáhána na ohyb. Proto se zaměřím na vliv ohybového momentu na nosníky. Příčníky, podélníky a sloupky spodku a střechy vozidla nabízí také největší potenciál redukce hmotnosti. Kritéria porovnání budou hlavně vliv na hmotnost, ohybové napětí a deformace.

### 7.1. Ohyb [17]

Ohyb je druh namáhání, při němž se původně přímý prut zakřivuje do rovinné či prostorové křivky. Za nosník uvažujeme každý přímý prut, namáhaný převážně na ohyb. Nosník může být zatížen silou kolmou k ose, silovými dvojicemi nebo spojitým zatížením.

Vlastnosti nosníku jsou závislé na způsobu jeho uložení. Pro znalost ohybového napětí je potřeba znalost geometrických charakteristik průřezu, tzv. kvadratických momentů ploch.

Ohybem se spodní vlákna prodlouží a vrchní zkrátí (obr. 43). Vlákna, která nemění svou délku se nachází v neutrální ploše, které protíná každý průřez v neutrální ose. Prodloužení i poměrné prodloužení jsou úměrná vzdálenosti od neutrální osy. Velikost napětí je tedy přímo úměrná vzdálenosti od neutrální osy, tvar průřezu nehraje žádnou roli.



Obr. 43.: Rozložení ohybových napětí po průřezu [17]

Lineární teorie rozložení ohybových napětí po průřezu:

$$\sigma(y) = \frac{M_o}{J_z} \cdot y \quad (4)$$

$M_o$  [Nm] – ohybový moment

$J_z$  [m<sup>4</sup>] – kvadratický moment průřezu k ose z (ose ohybu)

Maximální ohybové napětí vzniká v místech nejvzdálenějších od neutrální osy průřezu:

$$\sigma_{omax} = \frac{M_o}{J_z} \cdot |e_{max}| = \frac{M_o}{W_o} \quad (5)$$

$$W_o = \frac{J_z}{|e|} \quad (6)$$

$W_o$  [m<sup>3</sup>] – průřezový modul v ohybu

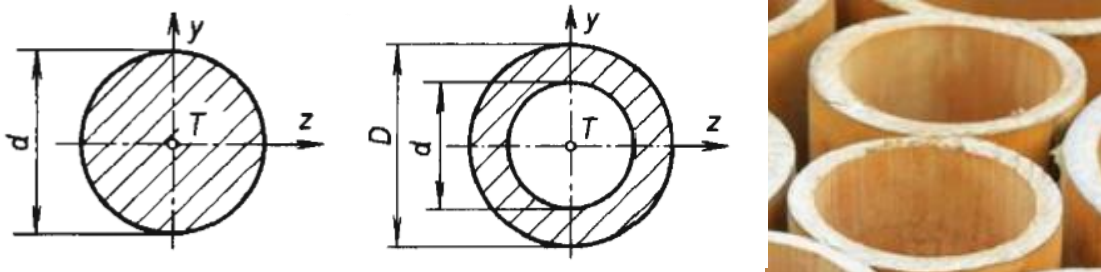
$e$  [mm] – vzdálenost krajního vlákna průřezu

Modul průřezu v ohybu plného válcového profilu:

$$W_{oz} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (7)$$

Modul průřezu v ohybu dutého válcového profilu:

$$W_{oz} = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (8)$$



Obr. 44.: Dutý válcový profil

Nosníky s neproměnným průřezem jsou nazývány prizmatické. Pokud chceme snížit maximální ohybové napětí a nelze redukovat ohybový moment, zbývá změna modulu průřezu v ohybu. Tohoto faktu využívají tvary s velkým průměrem nebo výškou. Pokud se odebere materiál v okolí centrální osy ohybu vzniknou profily lehké a zároveň odolné proti ohybu a krutu. Po odebrání materiálu blízko neutrální se mírně zvětší průhyb, ale hmotnost se sníží výrazněji. Odolné a lehké materiály, využívající nízkou hmotnost a vysoký modul průřezu, lze najít v přírodě v různých formách. Bambus (obr. 44) je lehký a odolný proti ohybu, lze využít na výrazně namáhané struktur na ohyb. Dalšími příklady jsou stébla a kosti, kost se skládá na povrchu z tuhé okostnice a uvnitř z měkké kostní dřevě.

Při ohybu se projeví také účinek posouvající síly, která vyvolává smyková napětí v průřezech kolmých k podélné ose nosníku. Pro vysoký profil platí, že smyková napětí jsou rovnoběžná se směrem posouvající síly a jsou stejná po celé šířce.

Žuravského vzorec:

$$\tau_z = \frac{T \cdot S}{J_z \cdot b} \quad (9)$$

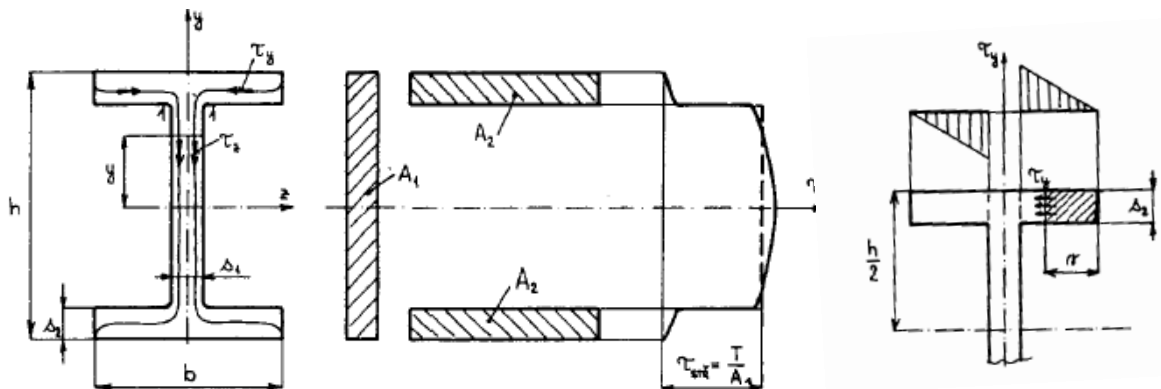
T [N] – posouvající síla

S [m<sup>3</sup>] – statický moment k neutrální ose

b [m] – šířka průřezu

Vzorec umožňuje spočítat smyková napětí tenkostěnných profilů.

Vliv smykových napětí se projeví na deformaci nosníku. Jednotlivé elementy se zkostí, nejvíce na neutrální ose. Největší smykové napětí je na neutrální ose.

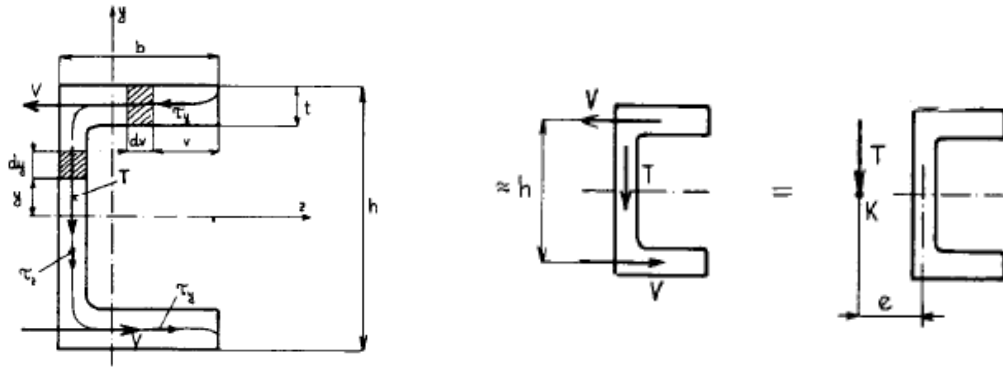


Obr. 45.: Rozložení smykového napětí v tenkostěnném I profilu

$$\tau_z(y) = \frac{T}{A_1} \cdot \frac{\frac{A_1}{4} \left[ 1 - \left( \frac{2y}{h} \right)^2 \right] + A_2}{\frac{A_1}{6} + A_2} \quad (10)$$

$$\tau_y = \frac{T \cdot h \cdot v}{2 \cdot J_z} \quad (11)$$

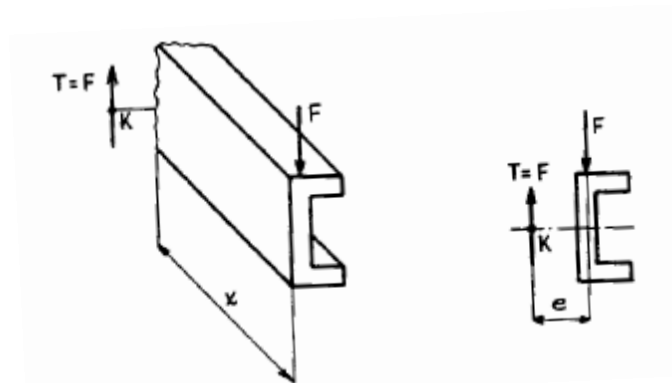
Na obrázku 45 jsou znázorněny smykové čáry tenkostěnného profilu, které sledují jeho obrys. V horní a dolní pásnici působí  $\tau_y$  (11) a ve stojině jen napětí  $\tau_z$  (10). Ve stojině profilu se mění smykové napětí podle paraboly. V přechodu stojiny a pásnice napětí výrazně klesne.



Obr. 46.: Rozložení smykového napětí v U profilu

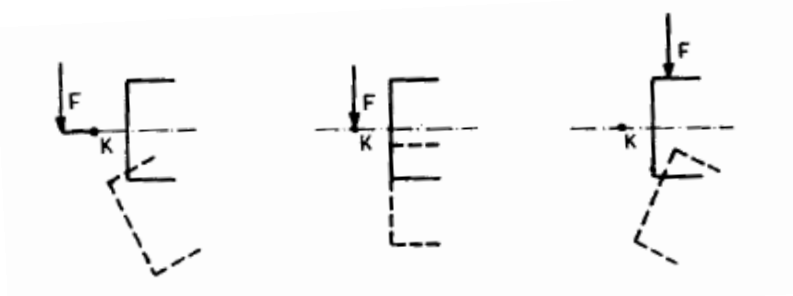
Pro profil U jsou smyková napětí rozložena (obr. 46) stejně jako pro předchozí I.

T je výslednice smykových sil, složena ze síly ve stojině a dvou sil v pásnicích. Složením sil se výslednice posune o vzdálenost  $e$ . Výslednice prochází bodem K (středisko smyku), který leží na ose souměrnosti profilu (obr. 47).



Obr. 47.: Reakce ve středisku ohybu

Pokud vnější síla neprochází střediskem ohybu nedojde pouze k prohnutí nosníku, ale nosník je zatížen ohybovým momentem  $Fx$  a také kroutícím momentem  $F_e$ . Nosník se pod kombinací zatížení prohne a zkroutí (obr. 48).



Obr. 48.: Zkroutení nosníku

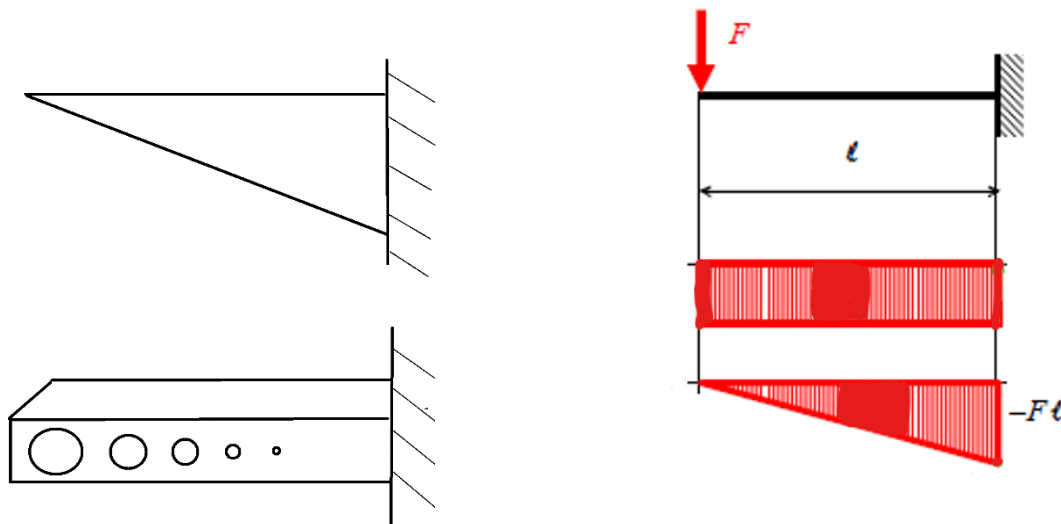
## 7.2. Metody zvýšení ohybové tuhosti a snížení hmotnosti

Velké uplatnění kromě kruhových profilů mají také profily tvaru I, T, C, L, Z lze je vhodně kombinovat a přizpůsobit do konstrukce. Použití je často také limitováno cenou a technologickými podmínkami. Na nosníky nesoucí spojitě zatížení se hodně využívají normalizované válcované profily, nebo profily ohraňované. Ve snaze zvýšit u těchto nosníků modul průřezu byla vymyšlena řada způsobů, jak tyto profily aplikovat a modifikovat.

### Nosník stálé pevnosti:

Průběh ohybového momentu je funkcí souřadnice  $x$ . Při dimenzování průřezu na maximální moment, který je v místě vetknutí, budou ostatní místa předimenzovaná. Optimální je tedy zeslabovat nosník, tak aby po celé jeho délce bylo stejné namáhání.

Nosník stálé pevnosti má proměnný průřez. Výroba takového profilu je složitá a nosník je poměrně rozměrný, proto se moc nepoužívá. Jeho použití si lze všimnout převážně na estetické aplikace.

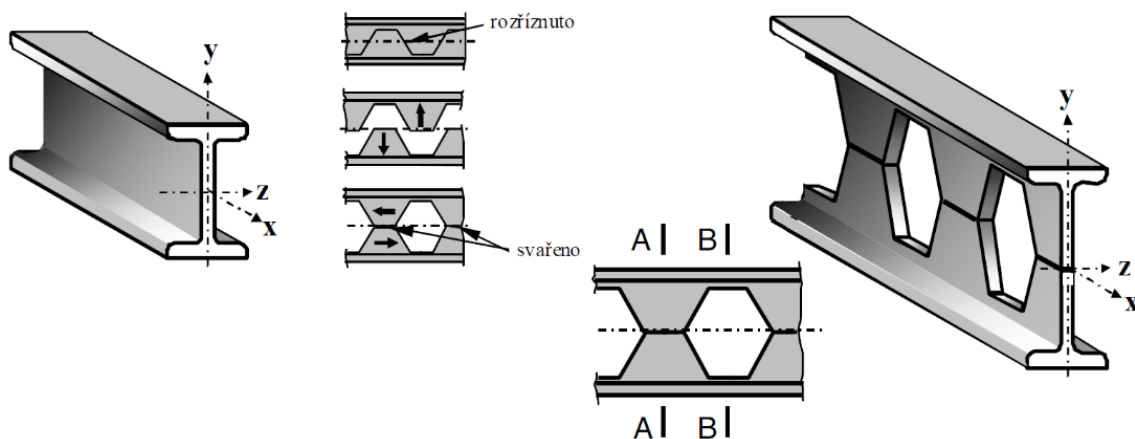


Obr. 49.: Ukázka závislosti geometrie na průběhu ohybového momentu [16]

Obrázek 49 zobrazuje průběh ohybového momentu vetknutého nosníku, je patrné zeslabování nosníku stálé pevnosti směrem od vetknutí. Pomocí otvorů by šlo dosáhnout podobného efektu u nosníku stálé výšky.

### Prolamované nosníky:

Prolamované nosníky (obr. 50) jsou vytvořeny z válcovaných profilů I, které se rozdělí pravidelným řezem ve stojně, nebo svařené z plechů a pásů. Rozdělené poloviny válcovaného profilu I se vůči sobě posunou a ve styčných plochách svaří. Takto vzniklý nosník má skoro stejnou hmotnost jako původní polotovar, ale byla u něj výrazně navýšena ohybová tuhost. Podle potřeby se vyrábí se symetricky/asymetricky umístěnými kruhovými/šestihrannými otvory.



Obr. 50.: Prolamovaný nosník z válcovaného profilu [16]

Mohou být také svařeny z pásů a s různou kombinací výztuh okolo otvorů (obr. 51).



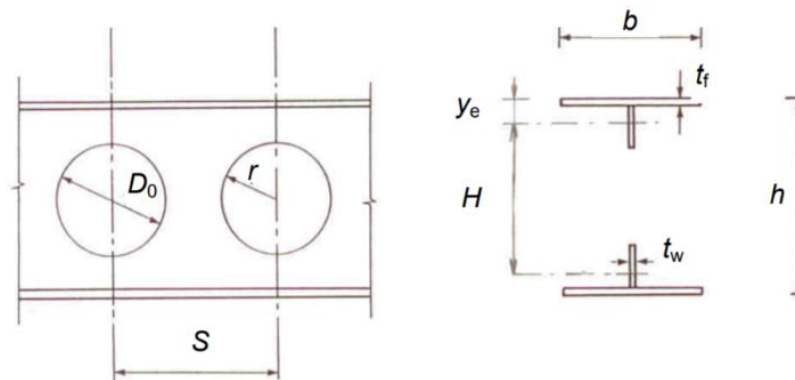
Obr. 51.: Prolamovaný nosník svařen z pásů [18]

Nevýhodou těchto nosníků je velký počet svarů, používají se převážně na statické konstrukce ve stavebnictví.

### 7.3. Nosníky s kruhovými otvory

Rozměry a technologie výroby příčniců a sloupků jsou podřízeny velikosti kolejového vozidla a jeho provedení. Není proto možné například při velkém průhybu podlahy výrazně zvětšovat výšku nosníků. Větší tuhosti lze dosáhnout zvětšením tloušťky nosníků nebo změnou materiálu a dodržení hmotnostních limitů se dosáhne pomocí otvorů.

Vypálení otvorů do profilů se provádí na plechových laserech při řezání, dále je profil ohraňován nebo svařen.



Obr. 52.: provedení kruhových otvorů v I profilu [18]

Kruhové otvory (obr. 52) lze provést v mnoho provedeních. Uvažoval jsem symetrické umístění otvorů. Plocha, na které jsou otvory vypáleny je jednotná, nosník lze svařit ze dvou částí v místě mezi otvory. Tento druh svařeného nosníku se konstrukci kolejových vozidel nepoužívá, protože navyšuje počet. Plocha mezi otvory má určitou smykovou únosnost. Ze středu nosníku lze odebrat materiál, dokud se tato únosnost nepřekročí a v okolí děr a neutrální osy výrazně nevzroste napětí.



## 7.4. Přehled a závislosti jednotlivých kritérií při odlehčování

Vlastnosti nosníku jsem určoval pomocí metody konečných prvků.

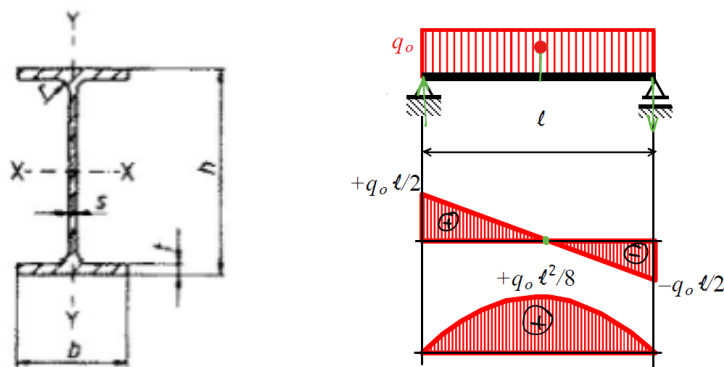
Pro zjištění vlivu odlehčovacích otvorů na vlastnosti nosníku jsem použil válcovaný I profil ČSN 42 5553, rovnoměrně zatížený.

velikosti IPE 160 délky 2600 mm

modul v průřezu k ose ohybu x má tento profil  $W_{ox}=109 \text{ cm}^3$

stálé zatížení na horní ploše  $Q = 2 \text{ kN}$

spojité zatížení  $q_o = 0,77 \text{ kN/m}$



Obr. 53.: Testovaný profil a jeho uložení [23] [16]

Vztahy pro výpočet reakcí a ohybového napětí nosníku stálého průřezu:

$$M_{omax} = \frac{q_o \cdot l^2}{8} \quad (12)$$

$$R_A = + \frac{q_o \cdot l}{2} \quad (13)$$

$$R_B = - \frac{q_o \cdot l}{2} \quad (14)$$

$$\sigma_{omax} = \frac{M_{omax}}{W_o} = \frac{M_{omax} \cdot h}{2 \cdot I_x} \quad (15)$$

$$W = \frac{5 \cdot q_o \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I_x} \quad (16)$$

Pro určení nejuvhodnější konfigurace děr jsem si určil jako ukazatel poměr rozteče středů otvorů a jejich průměr. Délku nosníku jsem měl pevně stanovenou 2600 mm z každé strany pro okrajových 100 mm jsem odlehčování neuvažoval, to znamená že na odlehčení připadá délka 2400 mm.

Pro 30 a 45 % odebrané plochy stojiny jsem vyzkoušel různý počet otvorů (tab. 1) po délce neutrální osy nosníku. Zvolený počet otvorů na délce 2400 mm určil jejich rozteč a průměr jsem dopočítal, aby odpovídal 30 a 45 % plochy.

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
<b>Rozteč</b>	80	100	120	150	200
<b>Počet otvorů</b>	30	24	20	16	12
<b>Průměr otvorů</b>	55,3	61,8	67,7	75,7	87,4
<b>Rozteč/Průměr</b>	1,4	1,5	1,8	2,0	2,3
<b>Deformace</b>	1,332	1,323	1,302	1,327	1,331
<b>Napětí</b>	43,591	32,468	32,68	33,433	38,109

Odebraná plocha	45 %	45 %	45 %	45 %	45 %
<b>Rozteč</b>	80	120	133,33	150	171,5
<b>Počet otvorů</b>	30	20	18	16	14
<b>Průměr otvorů</b>	67,7	82,9	87,4	92,7	99,1
<b>Rozteč/Průměr</b>	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7
<b>Deformace</b>	1,385	1,384	1,386	1,384	1,396
<b>Napětí</b>	49,964	48,576	44,891	44,926	45,572

*Tab. 1.: Deformace a napětí v závislosti na poměru rozteče a průměru otvorů*

Pro obě velikosti odebrané plochy stojiny vycházely nejmenší napětí při poměru rozteče a průměru okolo 1,5. Tento poměr jsem zvolil pro další výpočty. Pro známou délku nosníku a poměr rozteče a průměru 1,5 jsem dále spočítal průměr pro každou velikost odebrané plochy stojiny odstupňované po 5 % (tab. 2).

Zjistil jsem jednotlivé deformace a napětí, o kolik se snížila hmotnost profilu a maximální možné zatížení do meze kluzu.

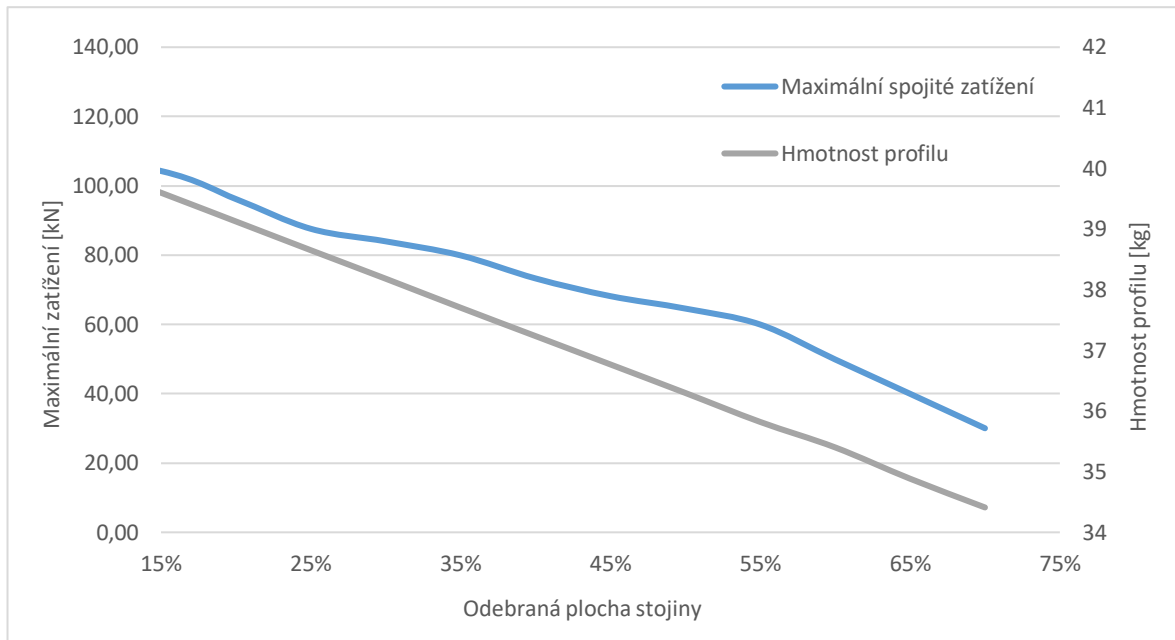
Odebraná plocha	0 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Plocha stojiny	330720	330720	330720	330720	330720
Odebraná plocha stojiny	0	49608	66144	82680	99216
Rozteč	-	42,9	57,1	70,6	85,7
Počet otvorů	-	56	42	34	28
Rozteč/Průměr	-	1,5	1,5	1,5	1,5
Průměr otvorů	-	28,6	38,1	47,4	57,2
Deformace	1,262	1,287	1,302	1,317	1,328
Napětí	30,53	34,046	36,913	40,529	42,277
Hmotnost	41,006	39,6	39,126	38,652	38,182
Ušetřená hmotnost	0,00	1,41	1,88	2,35	2,82
Mez kluzu/Napětí	11,63	10,43	9,62	8,76	8,40
Stálé zatížení kN - MAX	116,28	104,27	96,17	87,59	83,97
Zatížení/hmotnost	2,84	2,63	2,46	2,27	2,20
Hmotnost/Zatížení	0,35	0,38	0,41	0,44	0,45

35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %
330720	330720	330720	330720	330720	330720	330720	330720
115752	132288	148824	165360	181896	198432	214968	231504
100,0	120,0	133,3	150,0	160,0	171,4	184,6	200,0
24	20	18	16	15	14	13	12
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
66,8	78,2	87,4	97,7	105,9	114,4	123,6	133,5
1,343	1,373	1,397	1,429	1,469	1,528	1,609	1,753
44,423	48,454	52,086	54,98	59,21	71,159	88,792	118,256
37,704	37,236	36,768	36,298	35,82	35,4	34,884	34,41
3,30	3,77	4,24	4,71	5,19	5,61	6,12	6,60
7,99	7,33	6,82	6,46	6,00	4,99	4,00	3,00
79,91	73,27	68,16	64,57	59,96	49,89	39,98	30,02
2,12	1,97	1,85	1,78	1,67	1,41	1,15	0,87
0,47	0,51	0,54	0,56	0,60	0,71	0,87	1,15

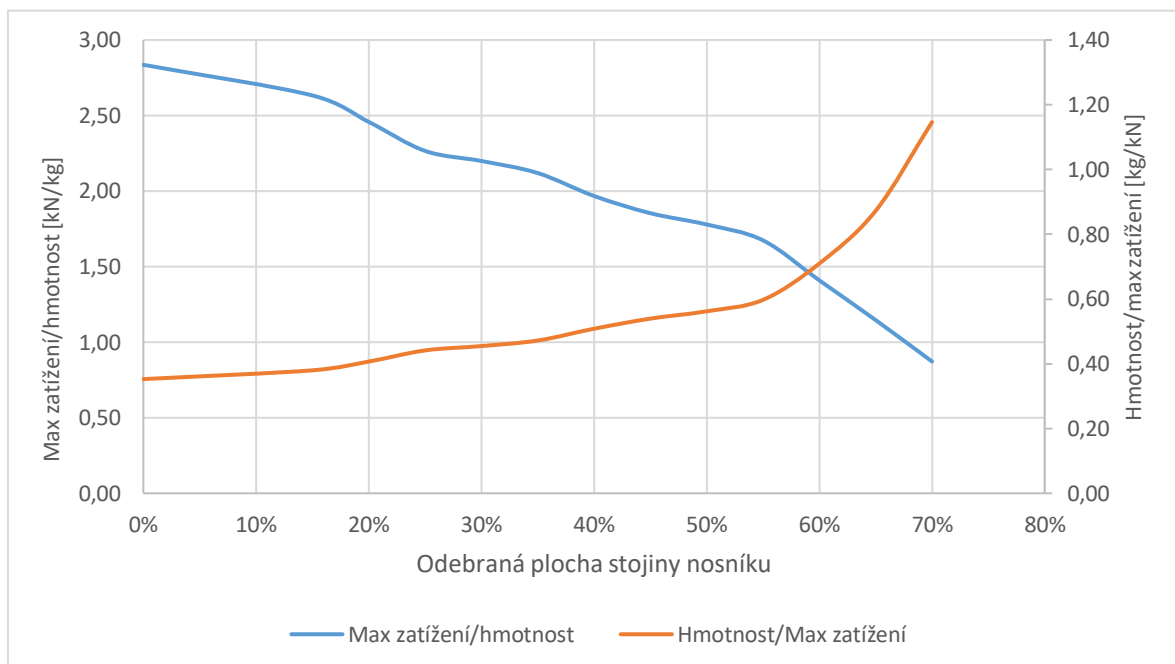
Tab. 2.: Hodnoty k velikostem odlehčovacích otvorů

Tabulka 2 zobrazuje hodnoty hmotnosti nosníku, změny deformace a maximálního napětí. Maximální zatížení, které nosník přenese jsem určil ze známé hodnoty meze kluzu.

Do grafu 1 jsem vynesl závislosti maximálního zatížení a hmotnosti nosníku na odebrané ploše stojiny. Lze vidět větší zlom v 55 % procentech, kde otvory jsou tak velké, že v jejich okolí vznikají špičky napětí.



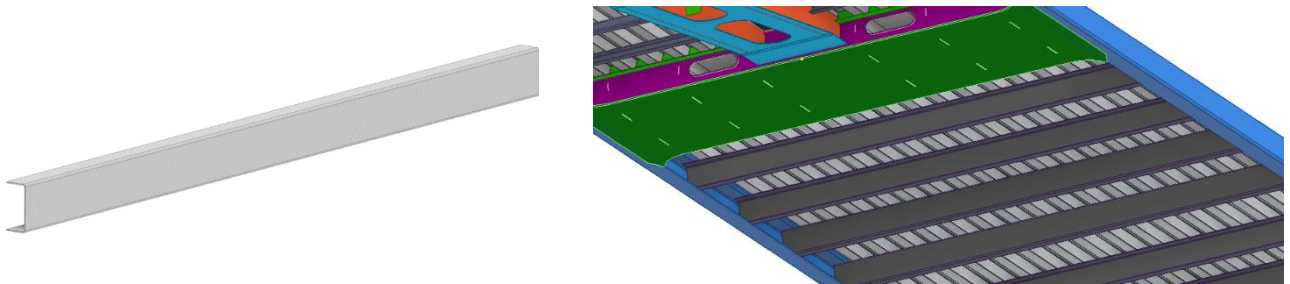
Graf 1.: Pokles maximálního zatížení nosníku a hmotnosti



Graf 2.: Poměr zatížení a hmotnosti

Optimální bod odlehčení jsem hledal poměrem zatížení a hmotnosti (graf 2). Jak lze vidět tento poměr stabilně klesá. Potvrdil se tedy předpoklad, že válcované profily jsou na ohyb přizpůsobené a další vytváření otvorů sice nosník odlehčí, ale výrazně klesne jeho únosnost.

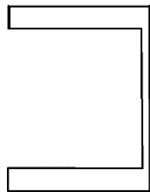
Dále se budu věnovat stejným postupem prizmatickým ohraňovaným U profilům, které se používají v hrubé stavbě skříně (obr. 54).



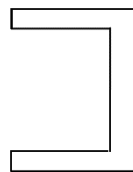
*Obr. 54.: U profily použité v konstrukci kolejových vozidel*

Válcované I profily mohou mít různou tloušťku patky a stojiny. Horní a dolní pásnice, kde působí největší namáhání mají větší tloušťku a stojina může být zeslabena. Lze se tedy více přizpůsobit volbou dvou rozměrů.

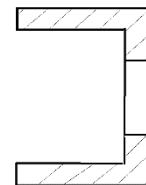
Vytvářením děr se lze přiblížit válcovanému profilu (obr. 55), který se ukázal na ohyb optimalizovaný. Ohraňované U profily ale mají konstantní tloušťku po celém průřezu (obr. 56) a nelze ji pro vertikální část změnit. Plechy na ohraňované profily se řežou na laseru, proto je nejsnazším způsobem, jak materiál odstranit je vytvořit otvory (obr. 57).



*Obr. 55.: Válcovaný profil*



*Obr. 56.: Ohraňovaný profil*



*Obr. 57.: Ohraňovaný profil s otvory*

Zkoušený profil:

H = 150 mm

W = 70 mm

l = 2600 mm

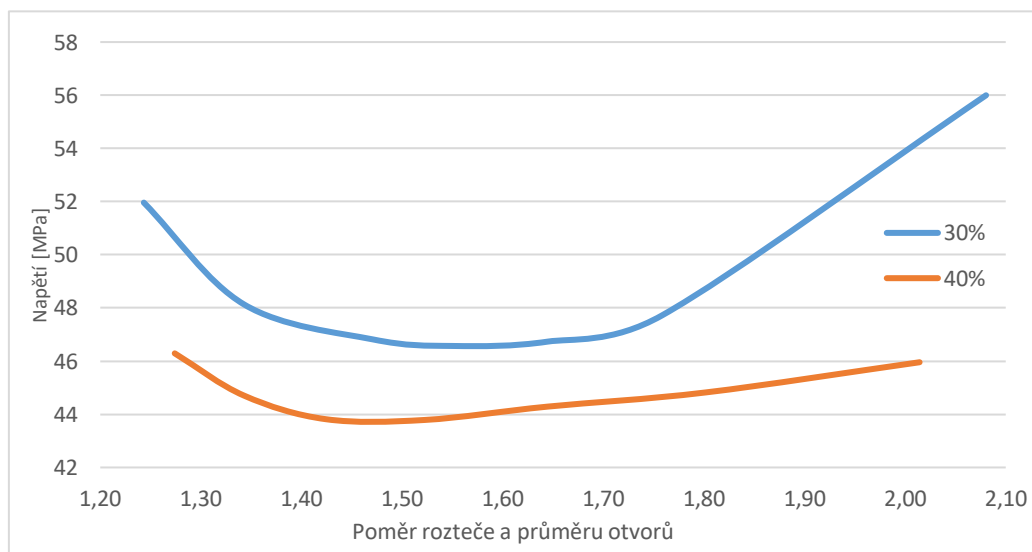
t = 4 mm

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	85,71	100,00	120,00	133,33	150,00	171,43	240,00
Počet otvorů	28	24	20	18	16	14	10
Průměr otvorů	68,9	74,5	81,6	86,0	91,2	97,5	115,4
Rozteč/Průměr	1,24	1,34	1,47	1,55	1,64	1,76	2,08
Deformace	1,9	1,881	1,882	1,888	1,901	1,923	2,019
Napětí	51,962	48,132	46,815	46,569	46,733	47,718	55,998

Odebraná plocha	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %
Rozteč	60,0	66,7	75,0	85,7	100,0	120,0	150,0
Počet otvorů	40	36	32	28	24	20	16
Průměr otvorů	47,1	49,6	52,7	56,3	60,8	66,6	74,5
Rozteč/Průměr	1,27	1,34	1,42	1,52	1,64	1,80	2,01
Deformace	1,792	1,781	1,773	1,77	1,771	1,772	1,782
Napětí	46,291	44,702	43,814	43,787	44,289	44,821	45,957

Tab. 3.: Zkouška distribuce děr po délce profilu

Vyzkoušel jsem, jak ovlivní různé počty děr po délce nosníku deformace a napětí (tab. 3). Vývoj napětí v závislosti na počtu otvorů udává pro obě zkoušené hodnoty odebrané plochy nejlepší výsledek v okolí poměru 1,5 (graf 3).



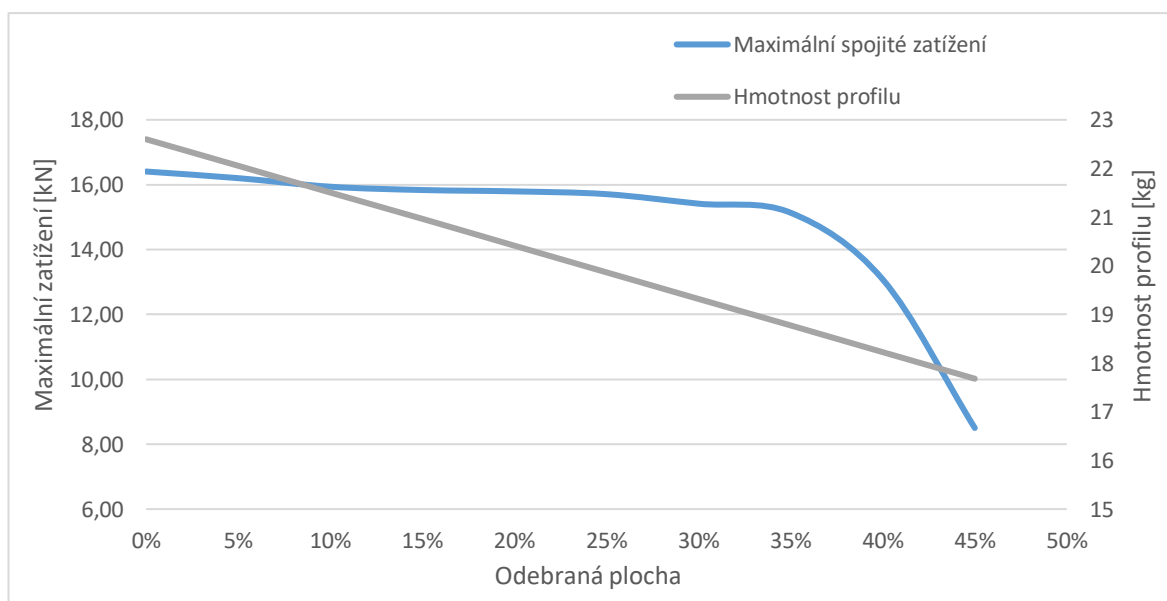
Graf 3.: Určení nejvýhodnějšího rozmístění otvorů po délce nosníku

Zvolil jsem pro další výpočty poměr rozteče a průměru otvorů 1,5. Odebíral jsem materiál z profilu po inkrementech 5 %, zvolil jsem počet děr na délku nosníku, tím je zadaná rozteč. Odebíranou plochu jsem vydělil počtem děr a z toho získal průměr děr (tab. 4).

Odebraná plocha	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %
<b>Plocha stojiny</b>	348400	348400	348400	348400	348400	348400	348400	348400	348400	348400
<b>Odebraná plocha stojiny</b>	0	17420	34840	52260	69680	87100	104520	121940	139360	156780
<b>Rozteč</b>	-	20,0	42,9	63,2	85,7	100,0	120,0	150,0	171,4	184,6
<b>Počet otvorů</b>	-	120	56	38	28	24	20	16	14	13
<b>Rozteč/Průměr</b>	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>Průměr otvorů</b>	-	13,6	28,1	41,8	56,3	68,0	81,6	98,5	112,6	123,9
<b>Deformace</b>	1,655	1,68	1,703	1,734	1,771	1,819	1,881	1,981	2,133	2,353
<b>Napětí</b>	43,279	43,822	44,549	44,836	44,954	45,199	46,061	46,912	54,279	83,528
<b>Hmotnost</b>	22,6	22,055	21,505	20,965	20,413	19,865	19,318	18,774	18,225	17,68
<b>Ušetřená hmotnost</b>	0,00	0,55	1,10	1,64	2,19	2,74	3,28	3,83	4,38	4,92
<b>Mez kluzu/Napětí</b>	8,20	8,10	7,97	7,92	7,90	7,85	7,71	7,57	6,54	4,25
<b>Zatížení kN - MAX</b>	16,41	16,20	15,94	15,84	15,79	15,71	15,41	15,13	13,08	8,50
<b>Zatížení/Hmotnost</b>	0,73	0,73	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81	0,72	0,48
<b>Hmotnost/Zatížení</b>	1,38	1,36	1,35	1,32	1,29	1,26	1,25	1,24	1,39	2,08

Tab. 4.: Změny hmotnosti, deformace a napětí

Nad 40% odebrané plochy vznikají velká napětí v okolí otvorů vlivem smykové síly a výrazně klesne únosnost (graf 4).

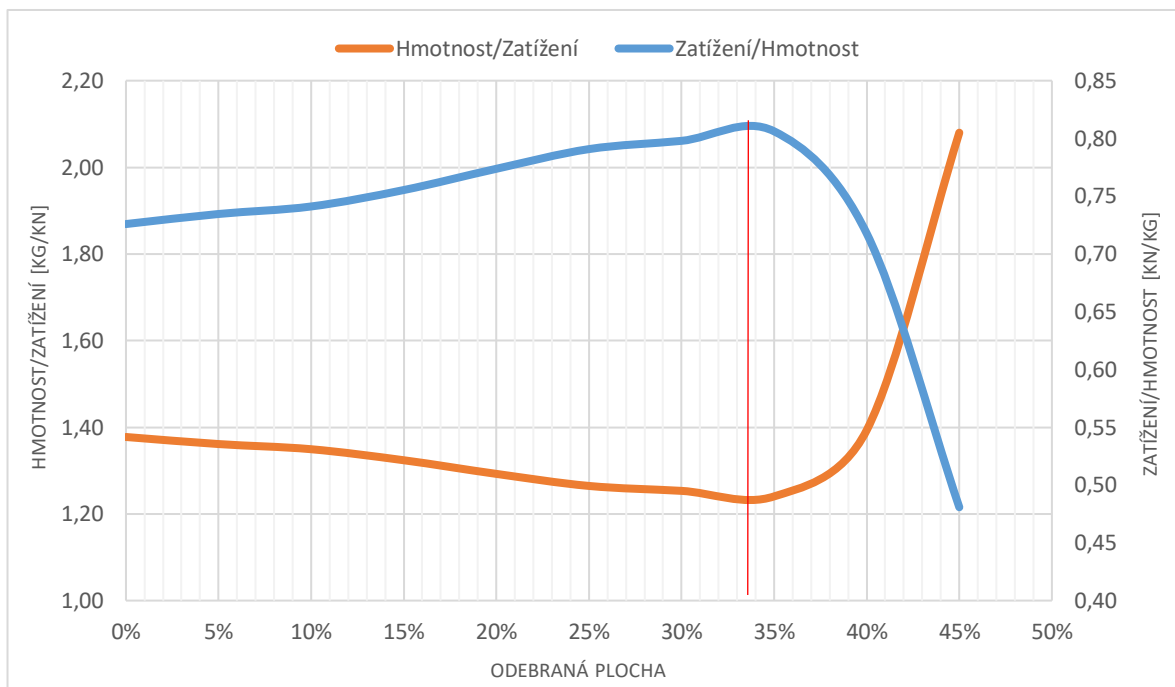


Graf 4.: Pokles maximálního zatížení, které nosník přenese v závislosti na jeho klesající hmotnosti

### Nalezení optimálního bodu odlehčení prizmatických profilů.

Optimální bod odlehčení jsem určil pomocí poměru zatížení nosníku a hmotnosti. Z průběhu grafu je patrné, že můžeme odebrat materiál v okolí neutrální osy a maximální zatížení, které nosník bude schopen přenést klesne jen minimálně. Po překročení určité hranice odebraného materiálu vzroste smykové napětí a vzroste napětí a deformace v okolí otvorů. Ideální je najít bod kde se poměr zatížení a hmotnosti zlomí z rostoucího do klesajícího a pohybovat se vlevo od něj.

Optimální bod odlehčení je dán maximem a minimem. Na grafu 5 je zvýrazněn červeně.



Graf 5.: Určení optimálního bodu odlehčení v závislosti na vlastnostech nosníku

Profil U výška: 200 mm, šířka: 70 mm, tloušťka: 4 mm

Optimální bod odlehčení 34%

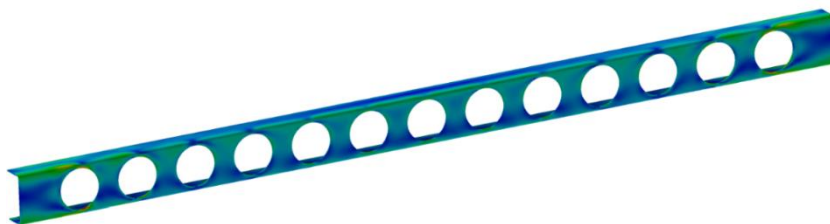
Hmotnost původního profilu: 22,6 kg

Hmotnost odlehčeného profilu: 18,885 kg

Ušetřená hmotnost: 3,72 kg

Procentuální snížení hmotnosti: 19,7 %

Únosnost snížena o 7 %



Obr. 58.: Ukázka odlehčeného profilu (34 %)

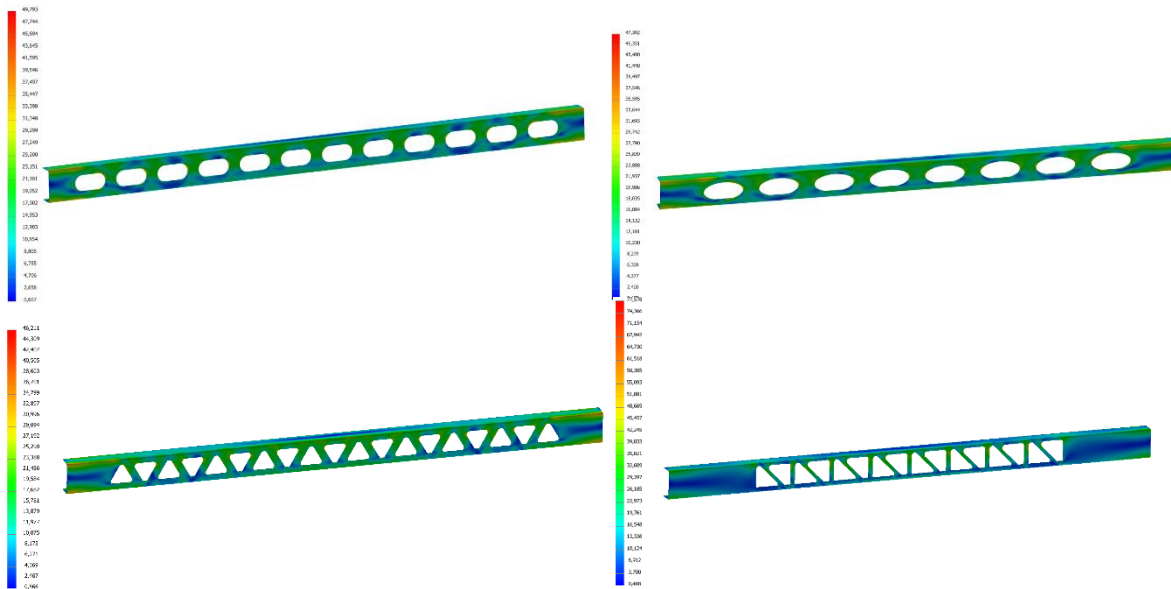


Vyzkoušel jsem U profily různých rozměrů, podobných těm, které jsou použité v návrhu hrubé stavby (tab. 5). Optimální velikost odebrané plochy se pohybuje okolo 34 %. Je výhodné se u aplikace na nové profily pohybovat pod hodnotou 30 %, sice nebude dosaženo ideálních vlastností, ale lze si být jistý, že výrazně neklesla únosnost.

Rozměry (výška x šířka)	Optimální velikost odebrané plochy
100x70	33 %
150x70	34 %
150x70 – tloušťka 2	33,5 %
200x50	34 %
200x70	34 %

*Tab. 5.: Tabulka výsledků pro další rozměry*

Pro 34 % odebrané plochy jsem vyzkoušel další tvary a různé kombinace rozložení (obr. 59):



*Obr. 59.: Test dalších používaných tvarů*

Pro průměr, který vyšel při 34 % odlehčení jsem vyzkoušel také změnit poměr rozteč/průměr z původního 1,5 (přiblížení a oddálení otvorů) a vlastnosti profilu se zhoršily.

Drážky a elipsy vycházejí přibližně stejně jako kruhové otvory, rozdíl je jen minimální ve prospěch kružnic. U elipsy záleží na její výšce, vyšší elipsa má větší vnitřní rádius a menší napětí. Nejvyšší poměr zatížení a hmotnosti byl dosažen u trojúhelníkových otvorů, umožní tedy ušetření nejvíce hmotnosti.

### Trojúhelníkové otvory

Použití trojúhelníkových otvorů umožní odebrat větší množství materiálu než při použití kružnic, elips a drážek. Na napětí a deformaci má při volbě trojúhelníkových otvorů vliv zaoblení vrcholů, výška trojúhelníku a jejich rozmístění (tab. 6).

#### Vliv zaoblení rohu na deformace a napětí

##### R15

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	60,00	68,57	77,42	88,89	104,35	126,32	160,00
Počet otvorů	39	35	31	27	23	19	15
Délka strany	87,9	94,2	96,5	99,3	107,4	117,8	131,6
Rozteč/Strana	0,68	0,73	0,80	0,90	0,97	1,07	1,22
Deformace	2,391	1,921	1,882	1,876	1,887	1,91	1,962
Napětí	171,8	53,856	46,792	45,883	46,45	46,332	46,751

##### R10

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	60,00	68,57	77,42	88,89	104,35	126,32	160,00
Počet otvorů	39	35	31	27	23	19	15
Délka strany	80,4	85,5	90,6	97,0	103,9	115,5	129,3
Rozteč/Strana	0,75	0,80	0,85	0,92	1,00	1,09	1,24
Deformace	1,906	1,89	1,886	1,887	1,892	1,929	1,985
Napětí	52,338	49,24	47	46,653	46,801	47,327	59,872

##### R7,5

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	60,00	68,57	77,42	88,89	104,35	126,32	160,00
Počet otvorů	39	35	31	27	23	19	15
Délka strany	80,1	83,7	89,5	95,3	103,4	113,7	127,6
Rozteč/Strana	0,75	0,82	0,87	0,93	1,01	1,11	1,25
Deformace	1,906	1,884	1,887	1,888	1,904	1,935	1,991
Napětí	52,198	48,398	48,206	48,142	48,548	54,096	66,371

##### R5

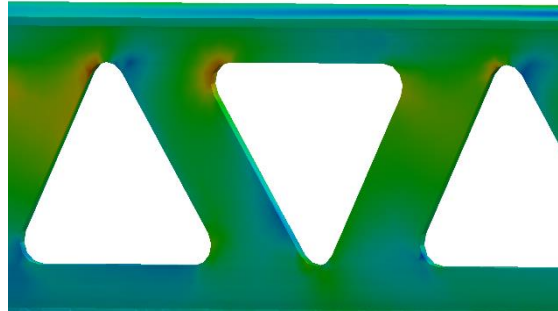
Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	60,00	68,57	77,42	88,89	104,35	126,32	160,00
Počet otvorů	39	35	31	27	23	19	15
Délka strany	79,8	82,2	88,6	94,7	102,8	113,2	127,6
Rozteč/Strana	0,75	0,83	0,87	0,94	1,02	1,12	1,25
Deformace	1,905	1,889	1,894	1,898	1,916	1,935	2,006
Napětí	49,402	48,055	48,247	48,922	56,345	58,096	76,61

##### R2,5

Odebraná plocha	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Rozteč	60,00	68,57	77,42	88,89	104,35	126,32	160,00
Počet otvorů	39	35	31	27	23	19	15
Délka strany	79,0	79,5	88,3	94,1	102,9	112,6	127,6
Rozteč/Strana	0,76	0,86	0,88	0,94	1,01	1,12	1,25
Deformace	1,892	1,9	1,9	1,904	1,924	1,961	2,033
Napětí	56,005	58,792	59,668	61,034	62,444	70,762	77,496

Tab. 6.: Hodnoty pro různé rozmístění otvorů a zaoblení rohů

Pro otvory malých rozměrů se vyplatí použít menší zaoblení. Vnitřní rádius větší než R15, zmenšuje plochu otvoru a výrazně již nezlepšuje rozložení napětí. Naopak použití příliš malého zaoblení zvýší napětí v rozích (obr. 60).



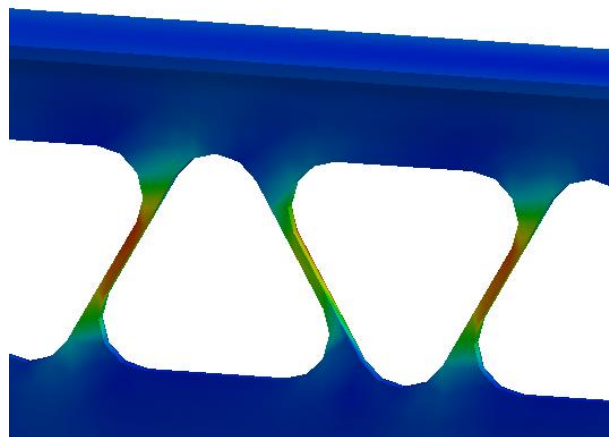
Obr. 60.: Zvýšené napětí v rohu otvorů

### Výška trojúhelníku

Podobně jako u kruhových otvorů se výška musí volit pod hodnotu 0,8 výšky profilu. Při překročení vznikají velké deformace a špičky napětí v blízkosti ohybu profilu.

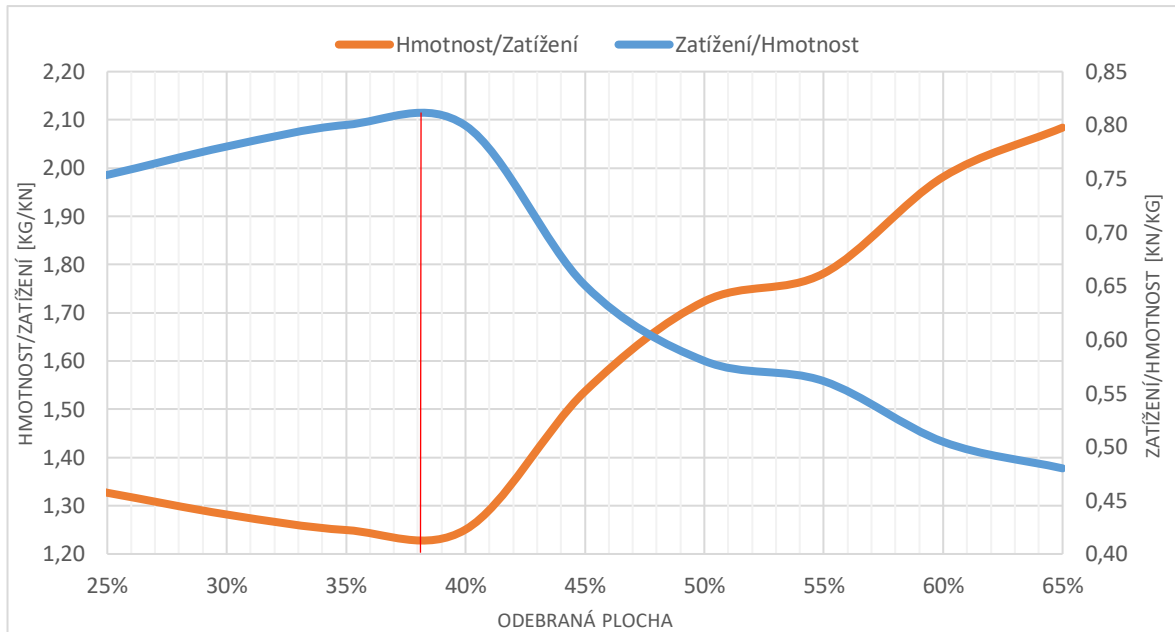
### Rozteč

Vyzkoušel jsem různé rozložení a vzdálenosti trojúhelníků (obr. 61), jako nejlepší řešení se ukázalo pohybovat se v poměru vzdálenosti výšek trojúhelníků a délky stran v poměru 1 - 0,8. Při malé vzdálenosti otvorů se mezi nimi zvýší napětí a větší vzdálenost mezi otvory nepřináší žádné výhody.



Obr. 61.: Rozteč/délka strany – extrémní případ malé vzdálenosti otvorů

Optimální bod pro trojúhelníkové odlehčovací otvory jsem určil podle grafu 6. Lze vidět maximum a minimum, které profil dosáhne při 38 % odebrané plochy.



Graf 6.: Určení optimálního bodu odlehčení v závislosti na vlastnostech nosníku a rozložení otvorů

Profil U výška: 200 mm, šířka: 70 mm, tloušťka: 4 mm

Optimální bod odlehčení 38%

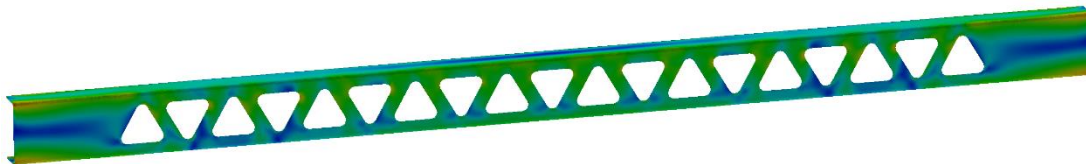
Hmotnost původního profilu: 22,6 kg

Hmotnost odlehčeného profilu: 18,473 kg

Ušetřená hmotnost: 4,13 kg

Procentuální snížení hmotnosti: 22,3 %

Únosnost snížena o 10,9 %



Obr. 62.: Ukázka odlehčeného profilu (38 %)

Pro 38 % odebrané plochy kruhovými otvory klesne únosnost o 17,65 %.

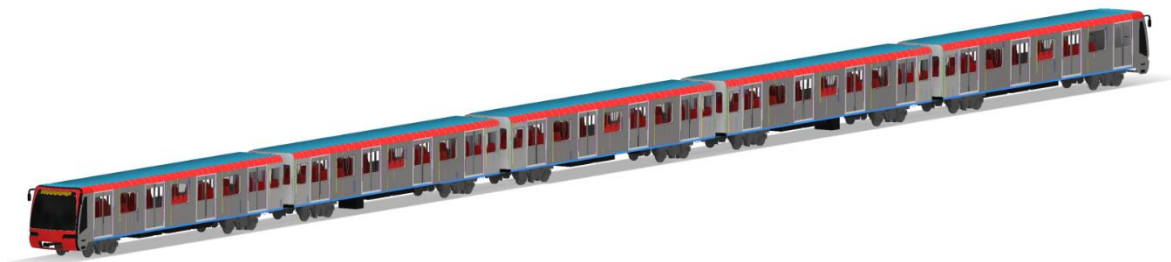
## 8. Principiální návrh hrubé stavby vozové skříně z neodlehčených profilů

Pro mé účely analýzy odlehčování jsem vytvořil zjednodušený model vozu metra (obr. 63). Vytvořený model je inspirován metrem M1 – integrální hliníkové stavby. Mnou konstruovaný vůz je diferenciální ocelové stavby skříně. Rozměrově vůz odpovídá pražskému metru M1, shoduje se průjezdný průřez má jen minimální změny a profil vozidla se shoduje. Konstruování hrubé stavby skříně a všech jejích součástí je velmi náročné a v praxi se na této detailní a odborné práci podílí mnoho konstruktérů a výpočtařů.



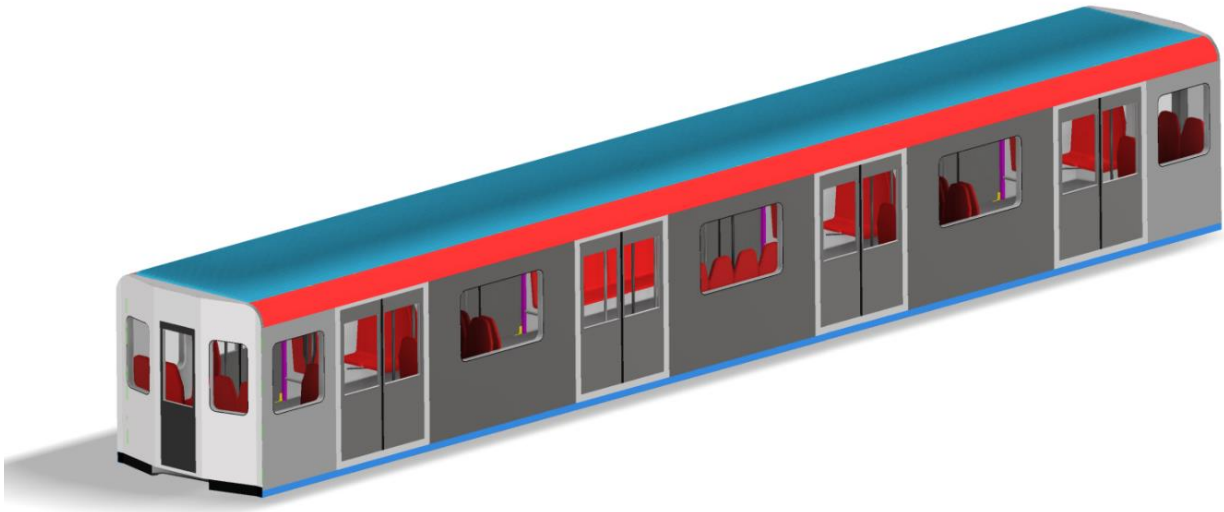
*Obr. 63.: CAD vizualizace vytvořeného modelu diferenciální stavby metra*

Pro určení vnitřního zatížení cestujícími jsem vytvořil interiér. Zobrazení vnitřních a vnějších rozměrů je zprostředkováno typovým výkresem (obr. 64).



*Obr. 64.: Souprava složená z pěti vozů*

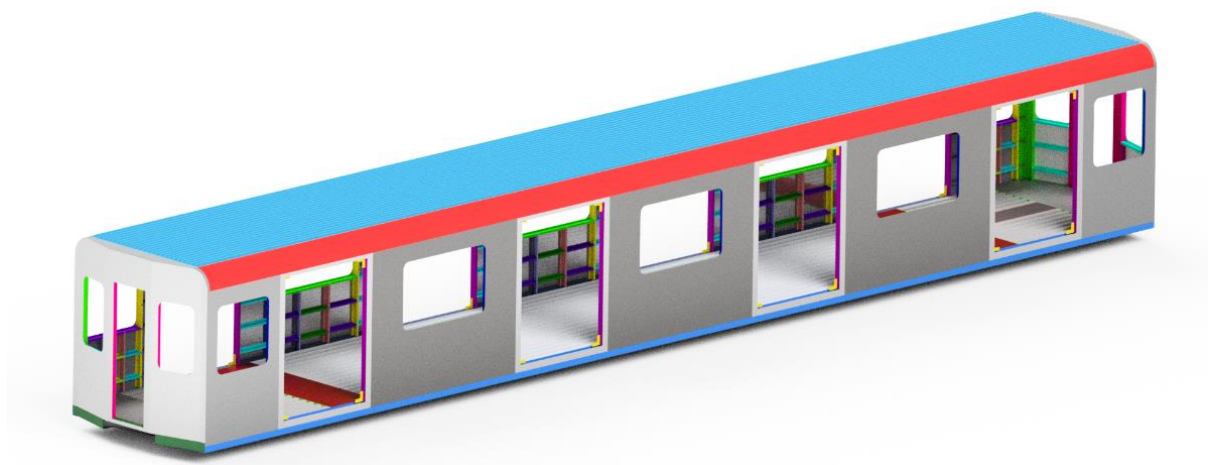
Model skříně (obr. 65) je zjednodušen a jsou na něm použity pouze hlavní prvky, výrazně ovlivňující podobu a vlastnosti hrubé stavby. Model bude dostačovat pro představu rozložení napětí a deformací v celé skříně. Na modelu chybí detaily upevnění výzbroje vozu a prvků interiéru. Omezení detailů a prvků sestavy pomůže při výpočtové kontrole v řešiči metodou konečných prvků. Jednotlivé detaily by se kontrolovali v praxi samostatně. Pro výpočet zatížení jsem vytvořil interiér konfigurací shodný s M1, rozměrově je rozdílný.



*Obr. 65.: Model skříně včetně interiéru a dveří*

### **8.1. Diferenciální stavba hrubé skříně**

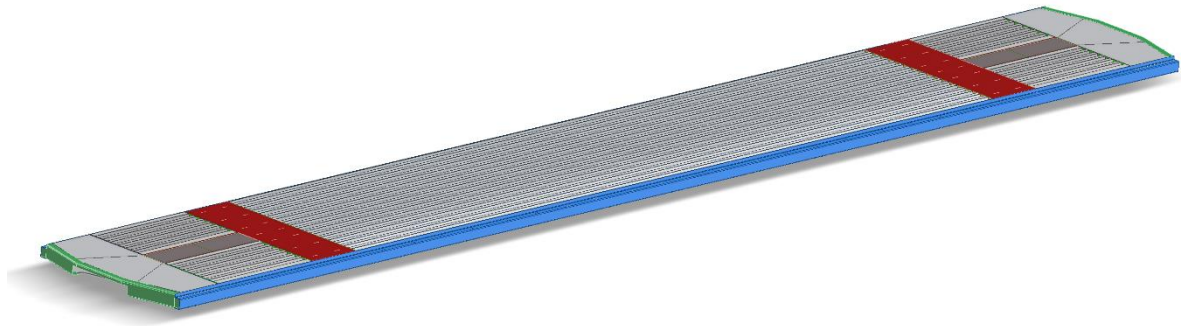
Konstrukci hrubé stavby skříně (obr. 66) jsem rozdělil do čtyř hlavních podsestav: hlavní rám, bočnice, čelnice, střecha. Tyto podsestavy a jejich díly jsou popsány v dalších kapitolách.



*Obr. 66.: Konstrukce diferenciální hrubé stavby skříně*

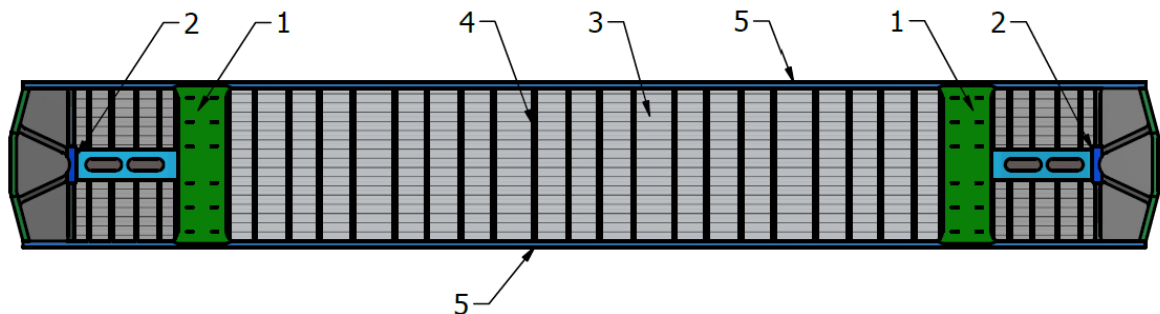
## 8.2. Hlavní rám

Základní částí skříně vozu je hlavní rám (spodek) (obr. 67). Celý hlavní rám skříně je svařenec, na který jsou připojené prvky interiéru a příslušenství vozidla, převážně šroubovými spoji, svary, lepením.



Obr. 67.: Hlavní rám skříně

Rám vozidla je svařen z: 1-hlavní příčnický na které jsou připojené podvozky, 2-představky, 3-vlnitý plech, 4-příčnický, 5-podélníky.



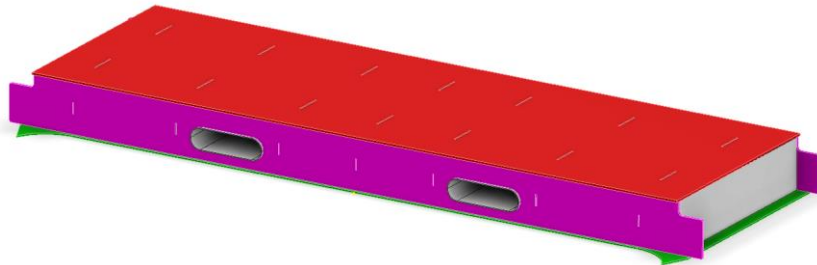
Obr. 68.: Popis komponentů rámu vozidla

Hlavní rám se skládá ze dvou podélníků probíhajících po celé délce vozidla. Podélníkové profily jsou válcované tloušťky 6 mm. Profil podélníků lze vidět na obrázku 69. Podélníky bývají speciálně válcované pro potřeby výrobce. Mezi těmito podélníky se nachází dva hlavní příčnický, na které jsou připojené podvozky vozidla



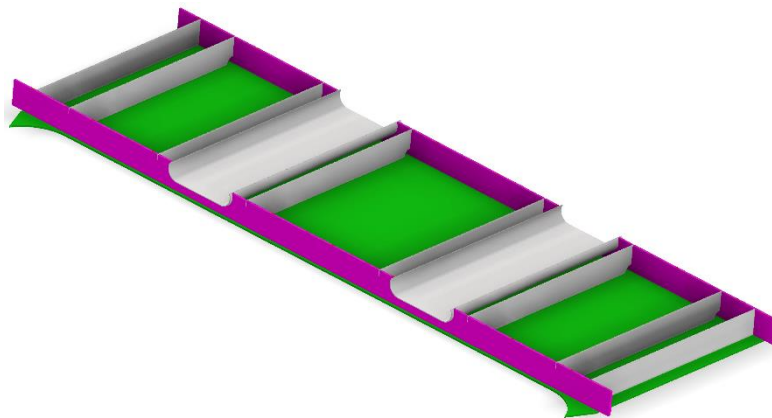
Obr. 69.: Profil válcovaných podélníků rámu

Hlavní příčníky (obr. 70) jsou v průřezu tvaru obdélníku a mají v sobě navařena žebra pomocí zámků. Žebra dostatečně zpevňují konstrukci, protože hlavní rám přenáší velké síly od podvozku. Na horní a dolní plech působí velký ohybový moment, proto jsou větší tloušťky.



*Obr. 70.: Svařenec hlavního příčníku s kanály pro rozvody*

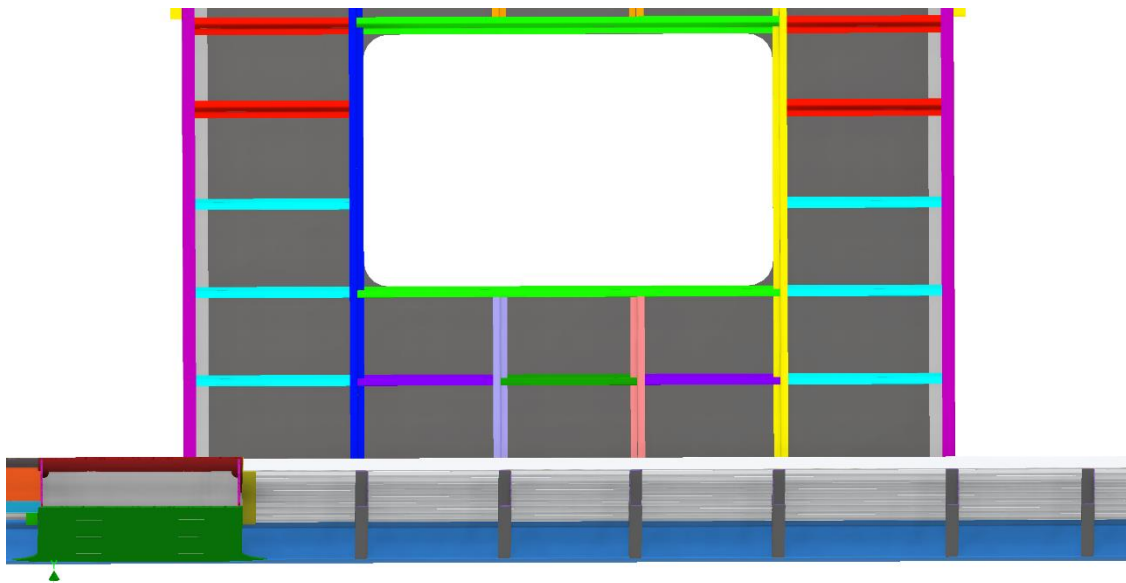
V hlavním příčníku jsou kanály pro rozvod kabelových svazků a pneumatiky (obr. 71). Žebra příčníku jsou plechové výpalky tloušťky 2 mm, ostatní plechy příčníku jsou tloušťky 6 mm.



*Obr. 71.: Řez hlavním příčníkem s viditelnými žebry*

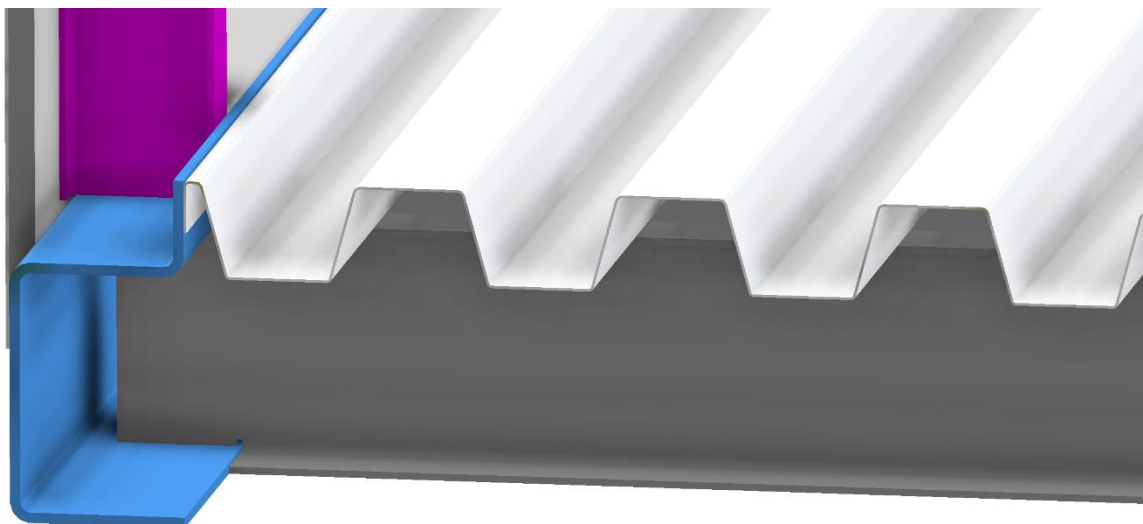
Mezi hlavními příčníky jsou ohraňované U profily tloušťky 4 mm na kterých se nachází podlaha z vlnitého plechu tloušťky 1,5 mm. U profily mají pravidelnou vzdálenost a natočení odpovídající sloupkům bočnic (obr. 72). Podlaha musí odolat vysokým zatížením, proto se využívá vlnitého plechu.





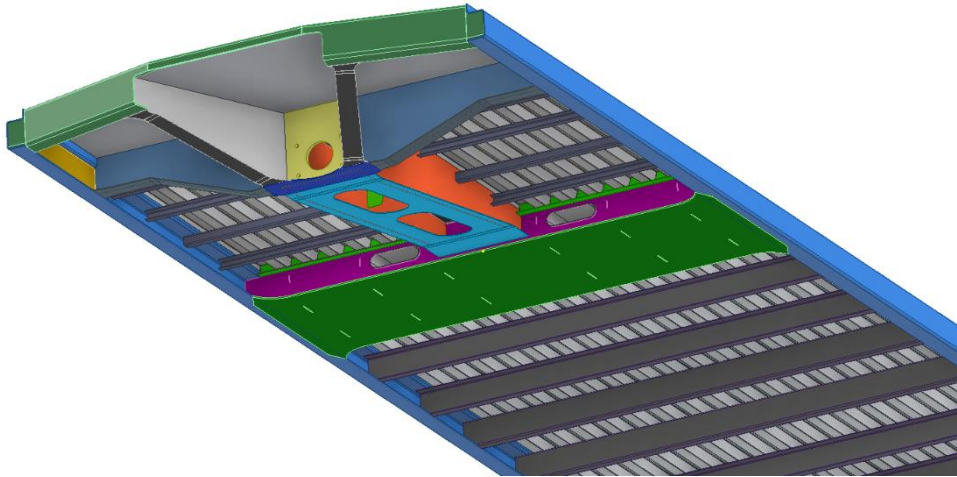
*Obr. 72.: Ukázka zarovnání příčníků hlavního rámu a sloupků bočnice*

Na obrázku 73 je patrné spojení U profilů a válcovaných podélníků. U profily jsou vloženy do podélníků a následně svařeny. Dále je na ně umístěna podlaha z vlnitého plechu, která je výškově zarovnaná s okrajem podélníku, kde je vytvořen svar. Sloupek bočnice se opírá v místě U příčníku. Plechové obložení bočnice částečně překrývá podélník rámu.



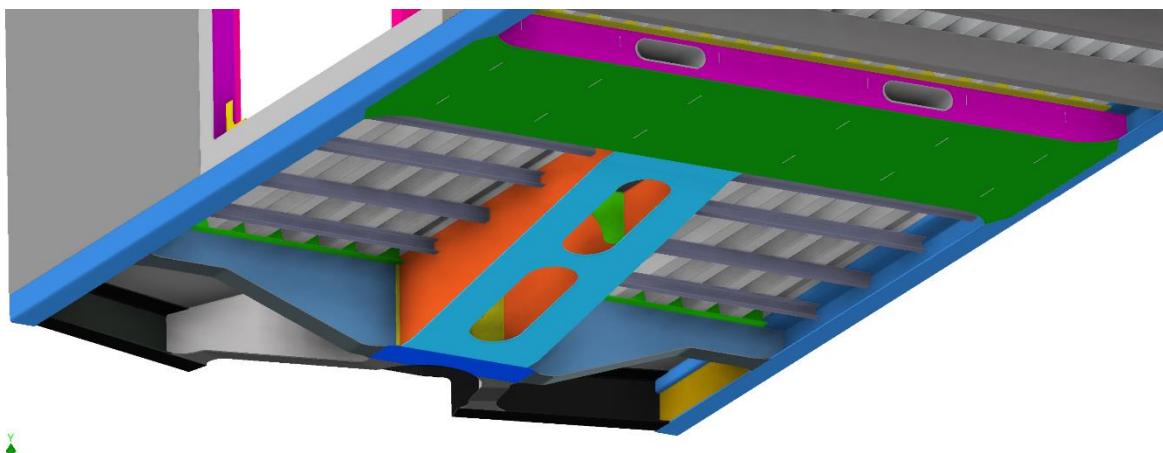
*Obr. 73.: Spojení vlnitého plechu podlahy s podélníkem a bočnicí*

Směrem od hlavních příčníků k čelu vozu jsou představky (obr. 74). Představky jsou svařené z plechů různých tloušťek. Představek musí být dostatečně tuhý, aby přenesl a rozložil sílu od spřáhla do zbytku rámu. Deska, na kterou je našroubované spřáhlo má výrazně větší tloušťku než ostatní díly. Na představku jsou viditelná žebra, která rozvádí zatížení do podélníků a tunelem k hlavnímu příčniku. Zároveň představek musí být dostatečně tuhý, aby unesl svislé zatížení.



Obr. 74.: Představek ze spodní části vozidla

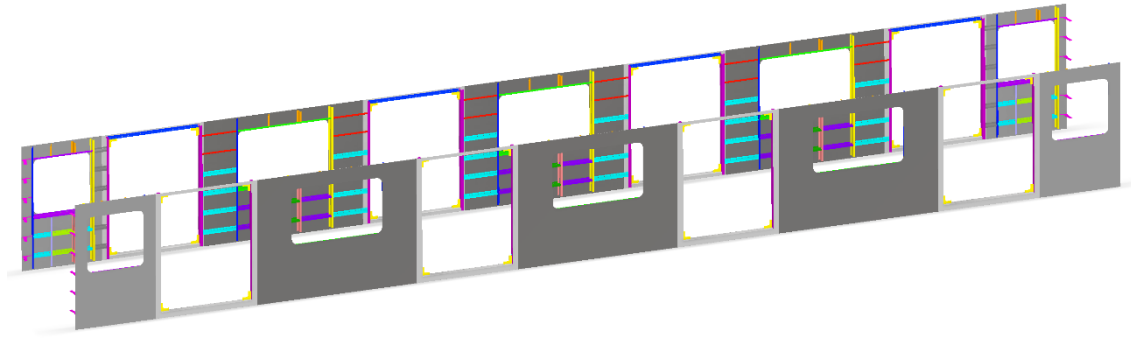
V předu představku je vytvořeno vybrání v nárazníku pro snadný přístup k spřáhlu a manipulaci s ním. Podlaha mezi hlavním příčником a čelnicí je vyztužena U profily menšího průřezu. Směrem do středu vozu vede tunel od spřáhla, který rozvádí tlak nebo tah působící od spřáhla (obr. 75).



Obr. 75.: Představek a viditelná konstrukce směrem ze středu vozu

### 8.3. Bočnice

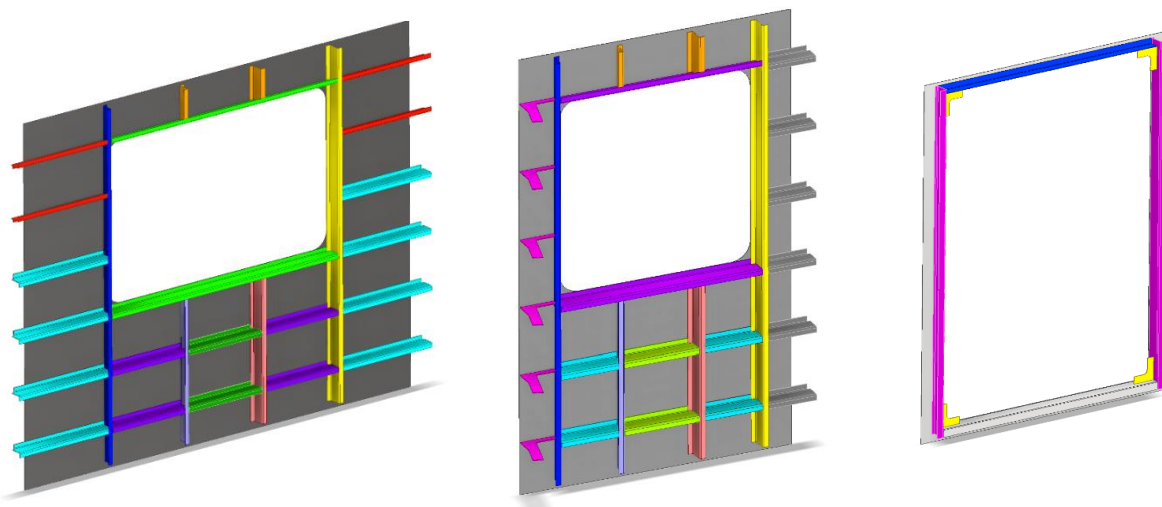
Další podsestavou skříně vozu jsou bočnice (obr. 76), skládá ze šesti mezidveřních částí a čtyř koncových. Nevýhodou vozů metra je komplikovanost jejich bočnic, kvůli vysokému počtu dveří.



Obr. 76.: Sestava bočnic vozu

Části mezi dveřmi (obr. 77) jsou identické a skládají se ze sloupků a výztuh. Sloupky a výztuhy jsou ohraňované profily Z, svařené do příhradové konstrukce. Sloupky jsou po celé výšce bočnice jednotné a výztuhy jsou mezi ně vkládány po částech. Výztuhy slouží také k montáži sedadel a dalšího vybavení vozidla. Opláštění je tvořeno hladkým plechem tloušťky 2 mm. Opláštění má kromě uzavření vozidla také pevnostní funkci. Mezi opláštěním a výztuhou se aplikuje antivibrační nástřik. Prostor mezi sloupky a výztuhou může být vyplněn tepelnou izolací například skelnou vatou.

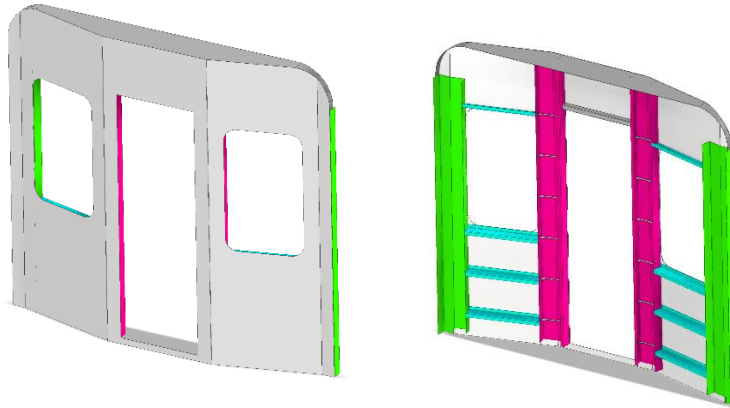
Na každé straně vozidla jsou čtyři dveře. Dveře se otvírají směrem z vozidla, jsou upevněny do sloupků. Rám dveří je vyztužen v rozích. Části bočnice na koncích vozidla jsou kratší, ale konstrukcí podobná částím mezi dveřmi.



Obr. 77.: Jednotlivé části bočnice s viditelnou vnitřní stranou

## 8.4. Čelnice

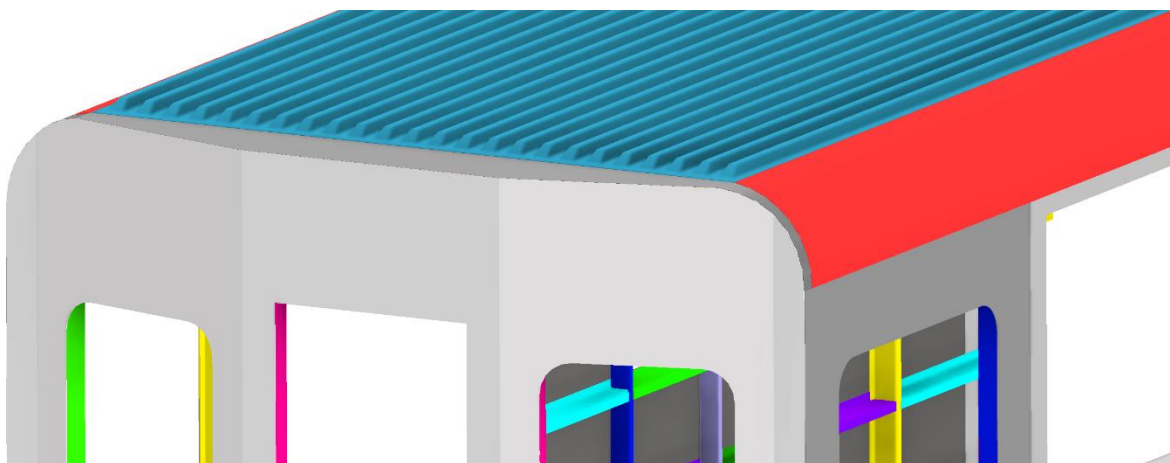
Rám dveří v čelnici (obr. 78) tvořen dvěma U profily a je vyztužen plechovými žebry. V oblastech mezi rámem dveří a sloupky jsou navařeny profily Z. V čelnici se nachází otvor pro dveře, stejně jako vozy M1 nejsou průchozí a dveře se otevírají na pokyn strojvedoucího pro evakuaci. Dveře by se do sloupek připevnili pomocí nýtovacích matic.



Obr. 78.: Pohled na čelnici z obou stran

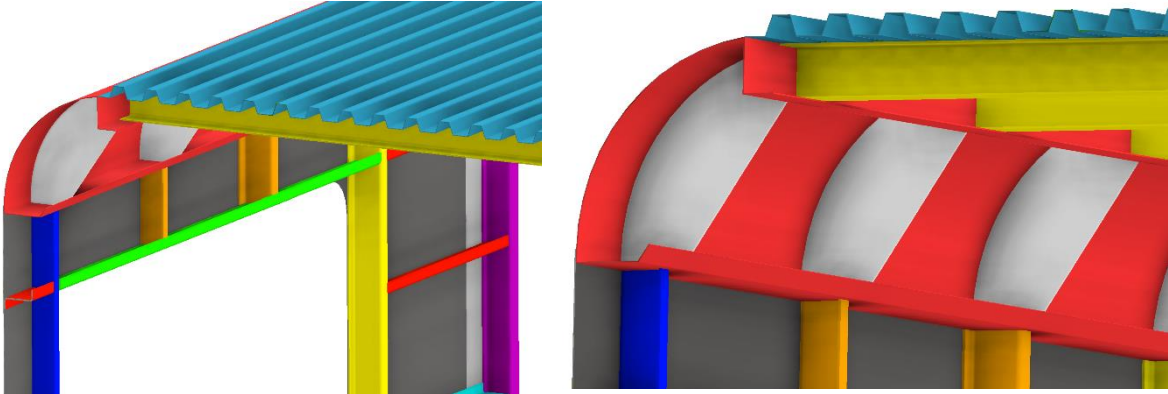
## 8.5. Střecha

Poslední podsestavou hrubé stavby skříně je střecha (obr. 79). Skládá se z vaznic a jejich výztuh. Výztuhy jsou plechové výpalky tloušťky 2 mm. Vaznice má tloušťku 3 mm. Střechy z vlnitého plechu podírají U profily po celé šířce vozidla. Vlnitý plech střechy je vystouplý, aby nezadržoval vodu a nečistoty. Střecha metra nenesou žádné zařízení, jsou na ní umístěny jen některé prvky interiéru.



Obr. 79.: Pohled na přechod zakončení střechy

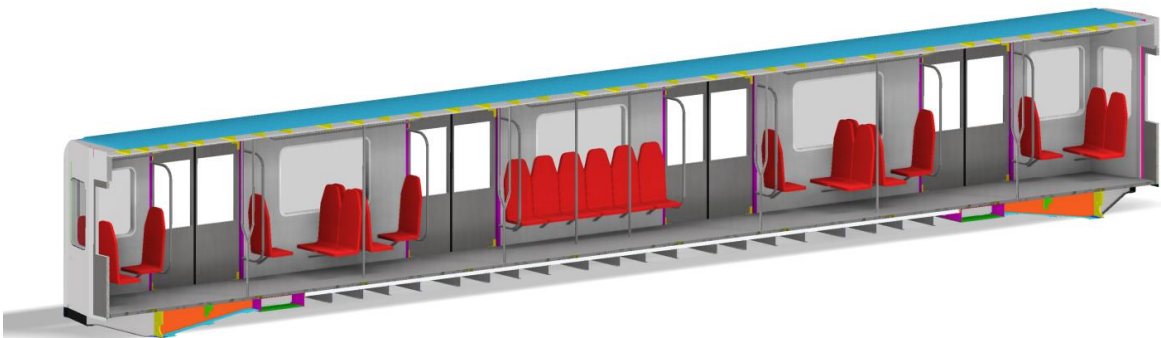
Na obrázku 80 lze vidět přechod mezi bočnicí a střechou. Vaznice je umístěna na sloupky bočnice a zároveň ji mírně přesahuje obložení bočnice. Vyztužena je navařenými výpalky a přechází v příčníky střechy, které drží plech střechy.



*Obr. 80.: Řez střechou a pohled na její konstrukci*

## 8.6. Interiér a vnitřní obložení

Zástavba interiéru (obr. 81) je téměř shodná s M1, avšak pozměnil jsem přídržná madla. Rozmístění sedaček je shodné, ale jejich rozměry a umístění bude mírně odlišné, protože neznám originální rozměry.



*Obr. 81.: Řez středem vozidla*

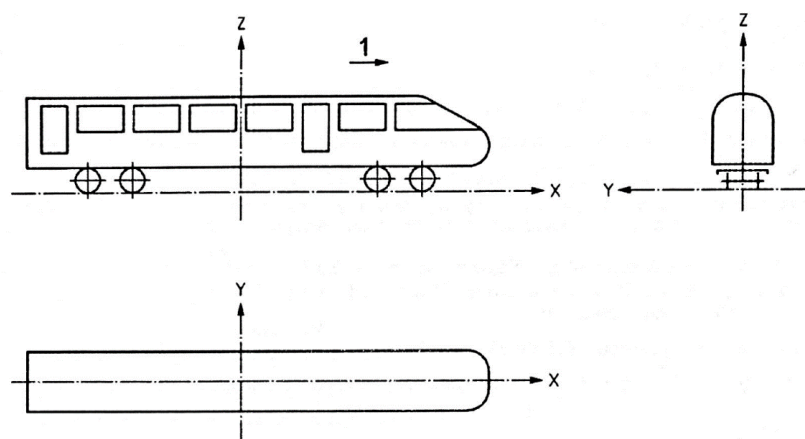
Užitnou plochu získám odečtením tloušťky stěn, podlahy a stropu od vnějších rozměrů skříně. Užitnou plochu je nutné znát pro výpočet svislého statického zatížení pro kontrolu statické pevnosti (obr. 82).



Obr. 82.: Příčný řez vozidlem s vyobrazeným interiérem a obložením

## 8.7. Souřadnicový systém kolejového vozidla

Podle normy ČSN 12 663-1 jsem zvolil systém modelu hrubé stavby. Orientace osy  $x$  je shodná s podélnou osou vozidla ve směru jízdy. Osa  $z$  je svislá osa vozidla směrem vzhůru. Osa  $y$  odpovídá příčné ose vozidla ve vodorovné rovině. Graficky zobrazeno na obrázku 83. [22]



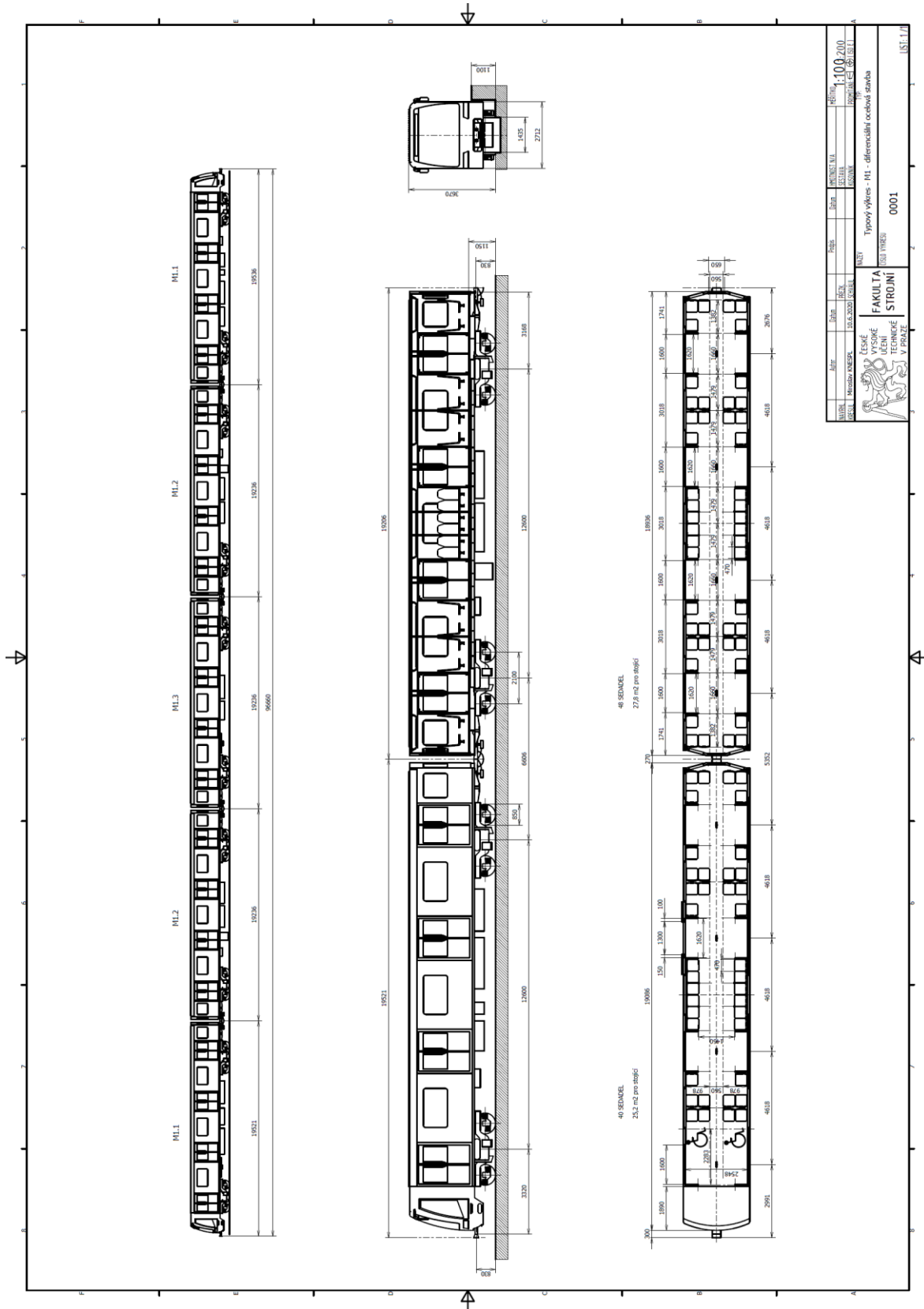
### Legenda

- 1 orientace směru jízdy
- X orientace podélného směru
- Y orientace příčného směru
- Z orientace svislého směru

Obr. 83.: Souřadnicový systém kolejového vozidla [22]

**8.8. Typový výkres**

Příloha č. 2



## 9. Nároky na skříň vozidla metra

Návrhy skříňů kolejových vozidel určují zatížení a podmínky, kterým jsou vystaveny a vlastnosti materiálů. Pevnostní požadavky na konstrukce skříňů kolejových vozidel popisuje norma ČSN EN 12 663-1 2015 – Pevnostní požadavky na konstrukce skříňů kolejových vozidel. Norma udává zatížení skříňů vozidel, jakým mají odolávat, popisuje používané materiály a zásady pro validaci návrhu analýzou a zkoušením. Jedná se o mezinárodně platný standard.

Dále se na skříň koleje vozidel vztahují požadavky na kolizní bezpečnost EN 15 227.

Kolejová vozidla jsou rozdělena podle ČSN EN 12 633 do kategorií, dle jejich konstrukčních požadavků a zatížením kterým jsou vystavena. Skříň musí odolat maximálnímu zatížení a splnit požadovanou životnost.

Norma rozlišuje tři hlavní skupiny lokomotivy (L), vozidla osobní dopravy (P) a nákladní vozy (F). Dále se tyto skupiny rozdělují podle konstrukčních požadavků. Zákazník rozhoduje, podle jaké kategorie by vozidlo mělo být navrženo a může mít také slovy do bezpečnosti vozidla, tyto rozhodnutí ale nesmějí být v konfliktu s normou. [22]

1) Lokomotivy skupina L, patří se všechny typy lokomotiv a hnacích jednotek, jejichž hlavním účelem je vyvíjet tažnou sílu a nejsou určeny k přepravě cestujících.

2) Nákladní vozy skupiny F se používají k přepravě zboží, mají dvě kategorie.

- F1 - vozidla bez omezení při posunu
- F2 – vozidla se zákazem posunu odrazem a jízdy přes svážný pahrbek

3) Vozidla osobní dopravy P, do této skupiny patří všechny typy kolejových vozidel určených pro přepravu cestujících, rozsah této skupiny je od celostátních drah, příměstské kolejové dopravy, městské a tramvaje. Tato skupina je z hlediska pevnosti rozdělena na do pěti kategorií. [8]

- P-I – osobní vozy
- P-II – ucelené vlakové jednotky
- **P-III – vozidla metra, rychlodrážní a lehké konstrukce**
- P-IV – lehká vozidla metra, vozidla tramvajové rychlodráhy
- P-V – tramvajová vozidla



### 9.1. Prokázání statické pevnosti dle ČSN EN 12 663-1:2015 [22]

„Statická zatížení jsou dle normy rozdělena do dvou kategorií, podélné statické zatížení skříně vozidla a svislé statické zatížení skříně vozidla. V úvahu se musí brát také zatížení vyvolané vlastní hmotností skříně.“

Musí se prokázat výpočtem nebo zkouškou, při předepsaných návrhových zatíženích nedojde k významné trvalé deformaci nebo porušení konstrukce jako celku. Požadavek musí být splnitelný před dosažením meze pružnosti nebo kluzu.

Při porovnání vypočítaného nebo změřeného napětí s napětím přípustným musí být využití prvku nejvýše 1 podle následující rovnice:

$$U = \frac{R_d \cdot S}{R_L} \leq 1$$

U – využití prvku

$R_d$  – hodnota stanovená výpočtem nebo zkouškou

S – konstrukční bezpečnostní součinitel

$R_L$  – přípustná nebo mezní hodnota

Rovnice pro vypočítané napětí:

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

U – využití

$\sigma_c$  – vypočítané napětí [N/mm<sup>2</sup>]

$S_1$  – bezpečnostní součinitel pro mez pružnosti nebo kluzu

R – smluvní mez kluzu materiálu [N/mm<sup>2</sup>]

Při hodnocení úrovní napětí v tažných materiálech není nutné, aby prvky vyvolávající místní koncentrace napětí splňovali výše uvedená kritéria. Jestliže analýza zahrnuje místní koncentrace napětí, je přípustné, aby teoretická napětí nepřekročila mez pružnosti materiálu nebo 0,2% smluvní meze kluzu. Oblasti s místními trvalými deformacemi vlivem koncentrací napětí musí být dostatečně malé, aby nevyvolávaly žádné významné trvalé deformace po zániku zatížení.

### 9.1.1. Podélné statické zatížení skříňe vozidla dle ČSN EN 12 663-1 [22]

#### 1) Tlaková síla v místech uchycení nárazníků a/nebo spřáhel

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
2 000	2 000	1 500	800	400	200	2 000 <sup>a</sup>	1 200 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Tlaková síla působící na dorazy táhlového ústrojí „c“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity (viz EN 12663-2). Jestliže tlaková síla působí na nárazníky, musí se pro každý nárazník použít v jeho ose poloviční hodnota.

Obr. 84.: Tabulka tlakových sil v prostoru spřáhel [22]

Na obrázku 84 lze vidět výňatek z normy, pro vozidla metra kategorie P-III platí zatížení 800 kN. Tahová síla v oblasti spřáhla (obr. 85).

#### 2) Tahová síla na uchycení spřáhla

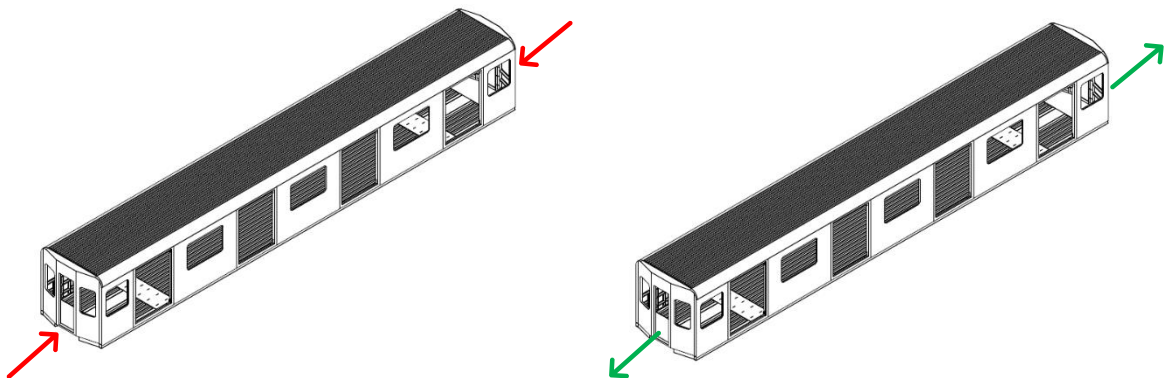
Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
1 000 <sup>a</sup>	1 000 <sup>a</sup>	1 000	600 <sup>b</sup>	300 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>	1 500 <sup>c</sup> 1 000 <sup>d</sup>	1 500 <sup>c</sup> 1 000 <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Pro určité typy spřáhel může být nutná vyšší síla (např. 1 500 kN).  
<sup>b</sup> Tyto hodnoty lze upravit, ale musí pokrývat maximální sílu dosažitelnou v běžném provozu nebo v nouzovém případě.  
<sup>c</sup> Tahová síla 1 500 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „a“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity (viz EN 12663-2).  
<sup>d</sup> Tahová síla 1 000 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „b“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity, a pro jiné typy uchycení spřáhla (viz EN 12663-2).

Obr. 85.: Tabulka tahových sil v prostoru spřáhel [22]

Působení tlakové a tahové síly na skříň je schématicky zobrazeno na obr. 86. Vozidla metra jsou na tlak zatížena silou 800 kN a na tah silou 600 kN.



Obr. 86.: Schéma zatížení skříňe

### 9.1.2. Svislé statické síly dle ČSN EN 12 663-1 [22]

#### 1) Maximální provozní zatížení

Zatížení v newtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$1,3 \times g \times m_1$	$1,3 \times g \times (m_1 + m_4)$					$1,3 \times g \times (m_1 + m_3)^a$	
<sup>a</sup> Jestliže při používání dochází k většímu mezímu zatížení (např. v důsledku dynamických vlivů nebo stavu ložení), musí se použít vyšší hodnota definovaná ve specifikaci.							

Obr. 87.: Maximální provozní zatížení [22]

Definice konstrukčních hmotností:

$m_1$  – Konstrukční hmotnost skříně vozidla v provozním stavu bez hmotnosti podvozků

$m_2$  – Hmotnost všech zařízení pod vypružením skříně, včetně hmotnosti tohoto vypružení. Hmotnost spojovacích prvků mezi skříní vozidla a podvozkem nebo pojezdem se rovnoměrně rozděluje do  $m_1$  a  $m_2$ .

$m_3$  – Hmotnost normálního konstrukčního užitečného zatížení podle EN 15 663.

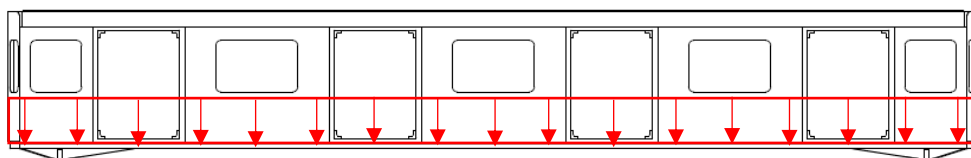
$m_4$  – Hmotnost výjimečného užitečného zatížení podle EN 15 663. Počet cestujících  $\times 80$  kg + zbytková plocha  $1 \text{ m}^2 \times 4 \times 80$  kg.

$m_5$  – Hmotnost normálního konstrukčního užitečného zatížení podle EN 15 663 mínus hmotnost cestujících nebo vlakového personálu.

Zatížení pro P-III:

$$1,3 \cdot g \cdot (m_1 + m_4)$$

Zobrazení svislé statické síly (obr. 88) – maximálního provozního zatížení působícího na skříně.



Obr. 88.: Schéma zatížení maximálním provozním zatížením

### 9.1.3. Kombinace zatížení [22]

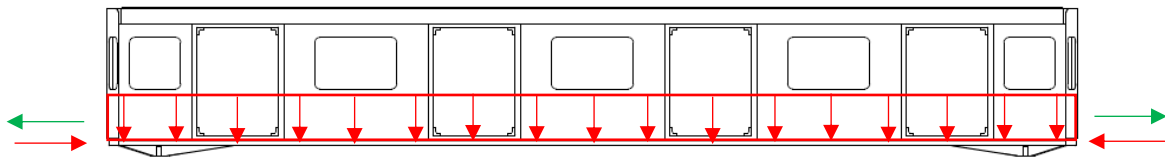
Pro prokázání dostatečné statické pevnosti se musí brát v úvahu kombinace statických zatížení podle obr. 89.

Zatížení v newtonech

Kombinace	Lokomotivy Kategorie L	Kolejová vozidla osobní dopravy Kategorie P-I, P-II, P-III, P-IV, P-V	Nákladní vozy Kategorie F-I, F-II
Tlaková síla a svislé zatížení	–	Tabulka 2 a $g \times (m_1 + m_4)$	Tabulka 2 a $g \times (m_1 + m_3)$ Tabulka 3 a $g \times (m_1 + m_3)$
Tahová síla a svislé zatížení	–	Tabulka 5 a $g \times (m_1 + m_4)$	Tabulka 5 a $g \times (m_1 + m_3)$

Obr. 89.: Kombinace druhů statických zatížení skříní vozidel [22]

Tlaková/tahová síla a svislé zatížení budou působit na skříně podle obr. 90.



Obr. 90.: Kombinace zatížení skříně

Požadavky na zkoušky: musí se vykonat na zkušebním zařízení (obr. 91), které umožňuje vyvinout síly v místech, kde se za provozu mohou vyskytovat. Skříně musí být vybavena prostředky pro měření deformací. Musí se ověřit napětí v kritických místech a průhyby mezi opěrnými body, zbytkové průhyby a deformace. [12]



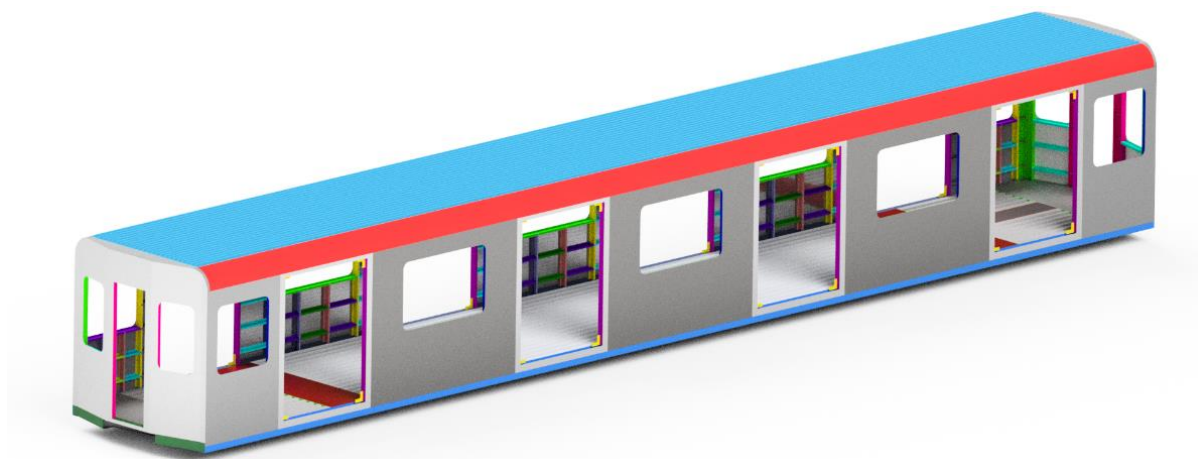
Obr. 91.: Ukázka statických zkoušek skříně kolejového vozidla [12]

## 9.2. Statická pevnostní kontrola – výpočtový model

Výpočtovou část jsem provedl v softwaru Autodesk Nastran. Nastran (NASA Structure Analysis) byl v šedesátých letech vyvinut speciálně pro potřeby NASA. Později byl kód zveřejněn jako opensource pro veřejnost a některé firmy ho přizpůsobili pro své zákazníky.

Pevnostní a tuhostní kontrola je provedena podle normy ČSN EN 12 663-1. Jak jsem model připravil na výpočtem zatížil a zavazbil je popsáno dále.

Sestava hrubé stavby skříně (obr. 92) je poměrně komplikovaná, je složena ze 102 unikátních dílů a 700 dílů celkem. Z tohoto důvodu jsem se po konzultaci rozhodl pro výpočet modelu pomocí prvků shell. Návrh a kontrola celé skříně je dlouhá a složitá procedura, kterou se zabývají velké skupiny odborníků.



*Obr. 92.: Model ocelové diferencíální stavby skříně*

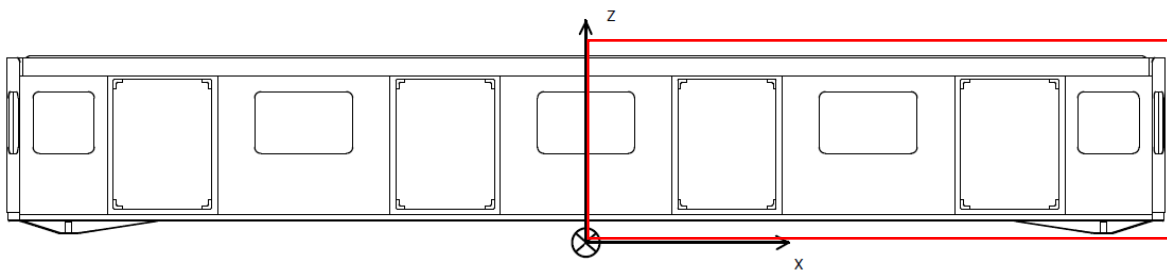
### 9.2.1. Příprava výpočtového modelu

Skříň je symetrická ve dvou rovinách, proto výpočtový model bude tvořit jen čtvrtina celku. Výpočet pouze čtvrtiny skříňe umožní získat síť s více elementy, než kdyby se síťoval celý model.

#### Symetrie v rovině YZ

Zamezení posuvu: x

Nulové momenty:  $M_y$ ,  $M_z$



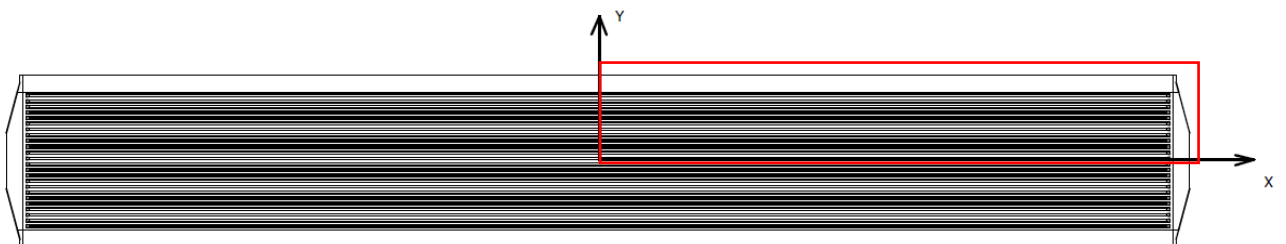
Obr. 93.: Řez skříňí v rovině YZ, červené ohraničení zvýrazňuje zbývající část modelu pro výpočet

Řez skříňí v rovině YZ skříň rozdělí na poloviny v příčném směru (obr. 93).

#### Symetrie v rovině XZ

Zamezení posuvu: y

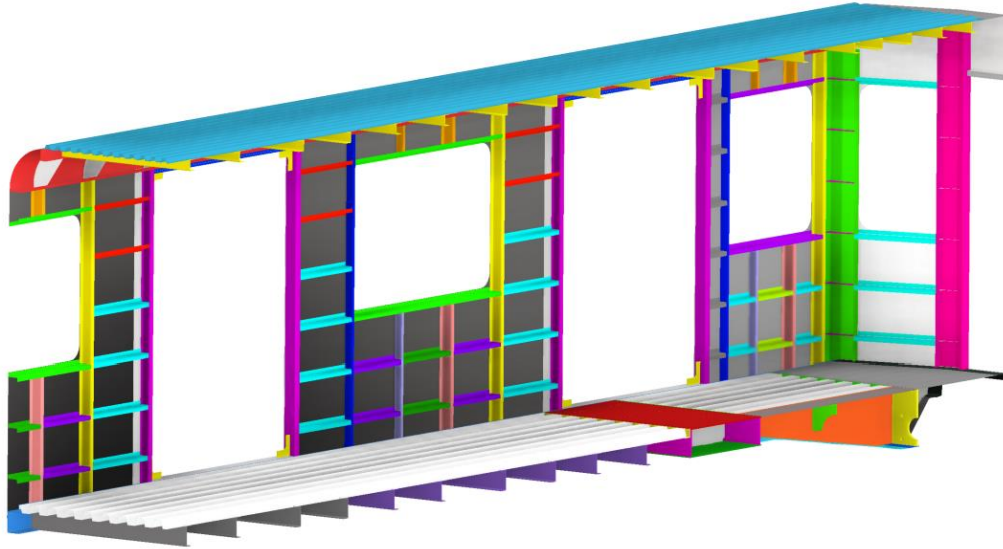
Nulové momenty:  $M_x$ ,  $M_z$



Obr. 94.: Řez skříňí v rovině XZ, červené ohraničení zvýrazňuje zbývající část modelu pro výpočet

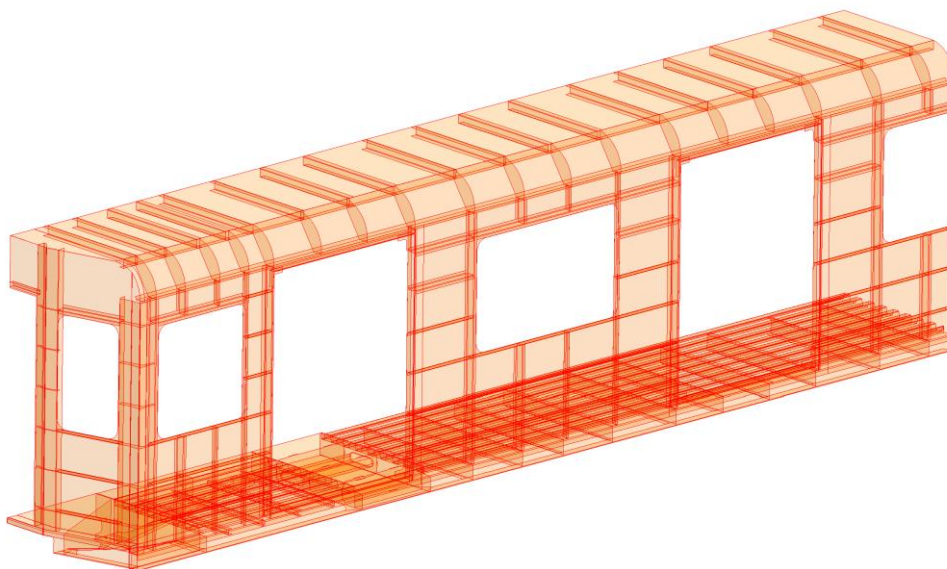
Řez v rovině XZ skříň rozdělí v podélném směru (obr 94).

Upravil jsem model odebráním veškerých dílů ze sestavy, které se nenacházeli ve vymezené výpočtové čtvrtině vozidla. Čtvrtinu skříně (obr. 95), kterou lze vidět na obrázku jsem importoval do prostředí Nastran.



*Obr. 95.: Čtvrtina modelu skříně metra použitá pro výpočet MKP*

Většina dílů modelu jsou plechy, proto je výhodnější provést kontrolu sestavy jako shell. Jednotlivé díly jsem nahradil středními rovinami (obr. 96). Toto nahrazení vytvoří mezery mezi díly, které původně byly v kontaktu. Mezi rovinami jsem definoval kontakty, tam kde by se vyskytovaly svary nebo jiné kontakty.



*Obr. 96.: Převod celé sestavy na plochy*

### 9.2.2. Materiál skříně

Materiál pro celou hrubou stavbu jsem zvolil nelegovanou konstrukční ocel S355J2. Používá se ke konstrukci kolejových vozidel, díky své svařitelnosti. Mechanické vlastnosti této oceli jsem získal z Bolzano (obr. 97).

Nelegované konstrukční oceli podle normy ČSN EN 10025-2 - přehled mechanických vlastností pro dlouhé výrobky. Značky vytištěné tučně jsou zařazeny do skladového programu Bohdan Bolzano.																							
Označení		Minimální mez kluzu ReH MPa								Pevnost v tahu Rm MPa				Minimální tažnost % Lo = 5,65 √ So				Teplota stupně C	Minimální nárazová práce KV (J)				
Značka oceli	Číselné označení	Jmenovitá tloušťka mm								Jmenovitá tloušťka mm				Jmenovitá tloušťka mm				C	Jmenovitá tloušťka mm				
		≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250	>250 ≤400	<3	≥3	>100	>150	>250	>3	>40		>63	>100	>150	≤150	>150 ≤250
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	510- 680	470- 630	450- 600	450- 600	450- 600	22	21	20	18	17	20	27		
S355JO	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	510- 680	470- 630	450- 600	450- 600	22	21	20	18	17	0	27			
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	510- 680	470- 630	450- 600	450- 600	22	21	20	18	17	-20	27			
S355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	510- 680	470- 630	450- 600	450- 600	20	19	18	18	17	-20	40	40	4)	

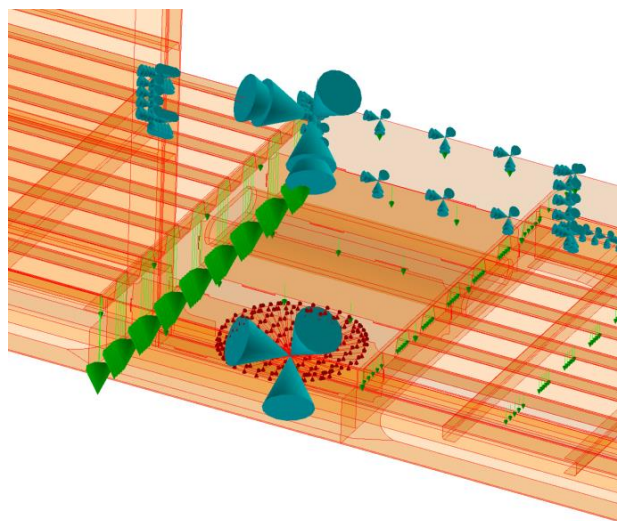
  

Nelegované konstrukční oceli podle normy ČSN EN 10025-2 vyd. 2005-09 - přehled chemického složení. Značky vytištěné tučně jsou zařazeny do skladového programu Bohdan Bolzano.																		
Označení oceli		Způsob desoxidace 1)	Chemické složení tavby ( hmotnostní podíl v % )							Chemické složení hotového výrobku								
Značka oceli	Číselné označení		C v % pro výrobek jmenovitě tloušťky v mm			Mn max.	Si max.	P max. 3)	S max. 3),4)	N max. 5)	C v % max. pro výrobek jmenovitě tloušťky v mm			Mn max.	Si max.	P max. 3)	S max. 3),4)	N max. 5)
			≤16	>16≤40	>40 2)						≤16	>16≤40	>40 2)					
S355JR	1.0045	FN	0,24	0,24	0,24	1,60	0,55	0,035	0,035	0,012	0,27	0,27	0,27	1,70	0,60	0,045	0,045	0,014
S355JO	1.0553	FN	0,20 7)	0,20 8)	0,22	1,60	0,55	0,030	0,030	0,012	0,23 7)	0,23 9)	0,24	1,70	0,60	0,040	0,040	0,014
S355J2	1.0577	FF	0,20 7)	0,20 8)	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-	0,23 7)	0,23 9)	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-
S355K2	1.0596	FF	0,20 7)	0,20 8)	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-	0,23 7)	0,23 9)	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-

Obr. 97.: Mechanické vlastnosti oceli S355 a její chemické složení [23]

### 9.2.3. Okrajové podmínky – vazby

Jak je popsáno v kapitole 7.2.1. skříně má dvě roviny symetrie. V každé této rovině jsem odebral posuv ve směru kolmém k rovině a dvě natočení. Po konzultaci ve firmě jsem uložení hlavního příčnicku v místě doteku vzduchového vypružení (obr. 98) provedl pomocí spoje pevného konektoru do jednoho uzlu, aby byla zajištěna výška v bodě dotyku skříně s podvozkem, ale příčník se mohl volně natočit a deformovat.

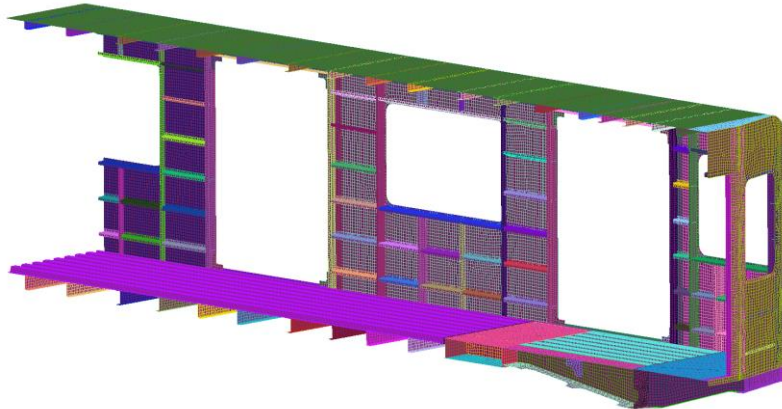


Obr. 98.: Ukázka vazby skříně a podvozku



#### 9.2.4. Síť

Model je složen z 184 dílů, je síťován plošnými elementy (obr. 99). Bylo použito 158 249 elementů většinou Quad4 a Tri3. Na velké plošné díly jako jsou plechy obložení bočnic a střechy jsem použil elementy většího rozměru, pro snížení doby výpočtu a hardwarové náročnosti.

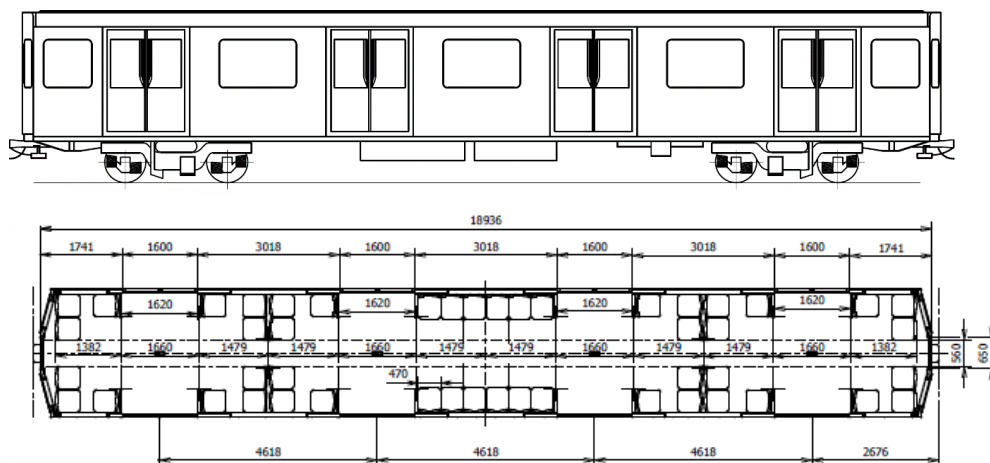


Obr. 99.: Síť modelu

#### 9.2.5. Zatížení a hmotnostní rozbor

Hmotnost návrhu hrubé skříně vychází na 11,23 tun. Jedná se o přibližný údaj, skříně kolejových vozidel mají řadu různých úchyťů pro montáž interiéru (sedačky, obložení) a dalšího vybavení vozidla jako elektrorozvody, osvětlení, větrání apod. Dále by skříň byla vyztužena v oblasti dveří a oken (obr. 100).

Pro zatížení skříně jsem zvolil nejméně příznivé podmínky. Zatížení je aplikované podle normy ČSN EN 12 663-1.



Obr. 100.: Vnitřní prostor pro cestující

### Tlaková síla v místě uchycení spřáhla:

Zatížení silou 800 kN na desku spřáhla, jelikož je model podélně rozdělen osou symetrie, síla zatížení je také poloviční tedy 400 kN.

### Svislé statické zatížení:

Prostor pro stojící cestující se je určen z typového výkresu, beru v úvahu veškerý vnitřní prostor, do kterého nezasahuje vnitřní obložení, sedadla, nebo nohy sedících cestujících. Plocha pro stání vychází zhruba o 4 m<sup>2</sup> menší než u integrální stavby metra M1. Tento rozdíl je zapříčiněn větší tloušťkou stěn diferenciální stavby, kterou bych mohl zpětně po analýze zeštíhlit. Před sedadlem je uvažován prostor pro nohy sedících. Na 1 m<sup>2</sup> volné plochy interiéru norma předpokládá 4 cestující o hmotnosti 80 kg.

Sedící cestující by zatěžovali bočnice, protože sedadla a jejich konstrukce jsou upevněny do bočnic, pro zjednodušení výpočtového modelu budu uvažovat působení do podlahy, jako kdyby cestující stál před sedadlem.

### Užitečné statické zatížení $m_4$ :

- Plocha pro stání je 27,8 m<sup>2</sup> (obr. 77)
- Počet sedadel vloženého vozu 48

$$m_4 = (48 \cdot 80) + (27,8 \cdot 4 \cdot 80) = 12736 \text{ kg} \quad (17)$$

$$F_1 = \frac{m \cdot g}{4} = \frac{12736 \cdot 9,81}{4} = 31235,04 \text{ N} \quad (18)$$

Svislé zatížení působící na podlahu od cestujících je 31,235 kN při plně obsazeném voze.

### Konstrukční hmotnost skříně vozidla v provozním stavu bez hmotnosti podvozků $m_1$ :

Konstrukční hmotnost skříně, lze určit velmi obtížně. Pro mé použití modelu k vybraní profilů vhodných k odlehčování je tento výpočet dostačující. Výsledky budou věrně reprezentovat, jakým způsobem se skříň deformuje a její tuhostní vlastnosti.

V tabulce 7 lze vidět hmotnosti jednotlivých dílů hrubé stavby.

<b>Celková hmotnost návrhu hrubé skříně:</b>	11,228 [t]
Hlavní rám (spodek)	3,124 [t]
Bočnice	7,909 [t]
Čelnice	2x 0,474 [t]
Střecha	1,847 [t]

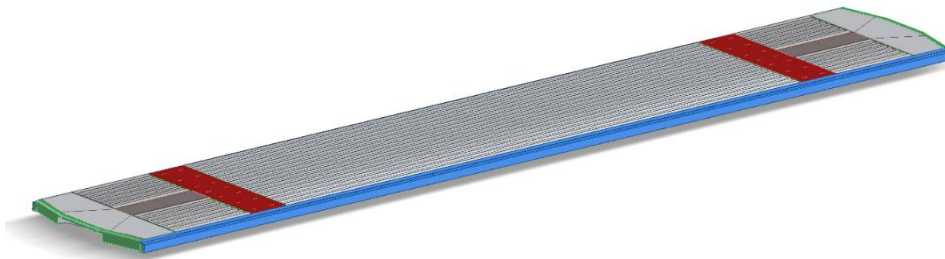
Tab. 7.: Hmotnosti jednotlivých konstrukčních celků

Zatížení skříně je zjednodušeno, výsledky MKP výpočtu budou reprezentovat, jakým způsobem by se skříň doopravdy deformovala. Hmotnosti jednotlivých prvků vozidla v provozním stavu a kompenzaci jejich zatížení při výpočtu jsem konzultoval a nahradil následovně:

Spodek vozidla metra (obr. 101) je nejvýrazněji zatěžovanou částí skříně, u vozidla jiného typu například u některých regionálních jednotek by nejvíce mohla být zatížena střecha.

Spodek přenáší většinu síly od spřáhla a také tíhové síly zbytku skříně. Dále by spodek vozidla nesl spřáhla a pod podlahové závěsné vybavení. Toto vybavení je instalováno do ocelových kontejnerů a uchyceno na příčníky. V případě zvedání vozidla by nesl také tíhu podvozků.

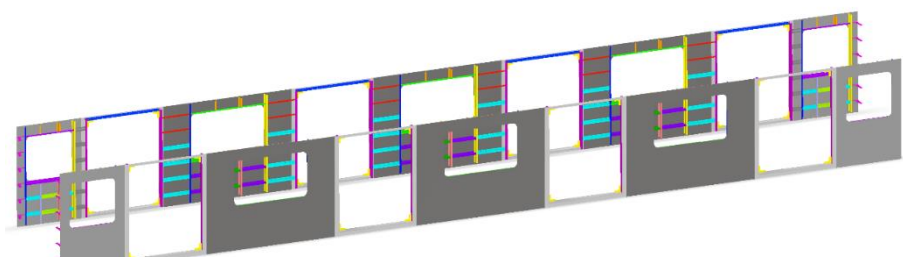
- Hmotnost podlahových desek jsem na čtvrtinu vozidla určil 200 kg
- Působení závěsného vybavení jsem kompenzoval zvýšením hustoty centrální části vozidla na dvojnásobek, váha vybavení se často pohybuje v rozmezí 1-3 tun, odvíjí se podle konfigurace vozidla



Obr. 101.: Spodek vozu

Váha bočnic (obr. 102) a čelnic se může po kompletní montáži vozidla zvednout až třikrát. Prvky, které navyšují hmotnost těchto celků jsou: sedadla a jejich konzole, izolace, obložení, dveře a jejich mechanismus, okna, nátěr a povrchové úpravy exteriéru, veškeré rozvody a kabeláž.

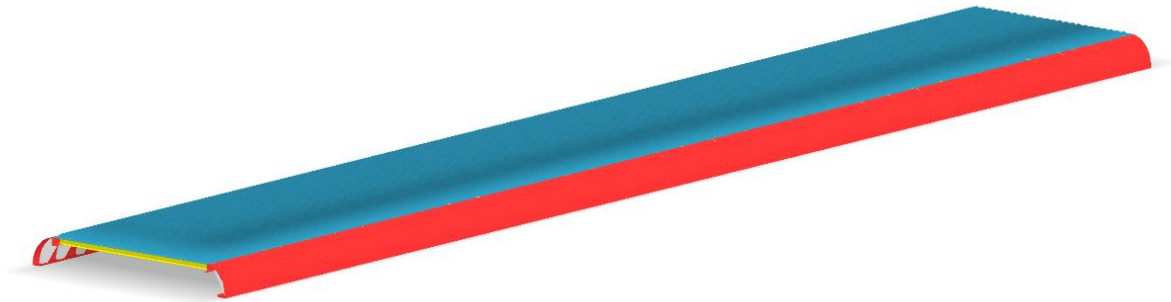
- Pro přiblížení hmotnosti bočnice v provozním stavu jsem zvýšil její hustotu 2,5krát



Obr. 102.: Sestava bočnic

Střecha (obr. 103) vozidel metra kromě ventilace zpravidla nenese žádné další exteriérové vybavení. Vnitřní vybavení, které je montováno na střechu jsou madla, světla, obložení stropu, infopanely.

- Kompenzaci těchto prvků, aby se hmotnost vozidla přiblížila provoznímu stavu jsem provedl zvýšením hustoty materiálu střechy na dvojnásobek.



Obr. 103.: Sestava střechy

#### 9.2.6. Výsledky statické pevnosti-kombinované zatížení

Získané výsledky dostatečně ukazují tuhostní a pevnostní charakteristiku návrhu hrubé stavby skříně metra. Pro přesnou kontrolu by model musel být zpracován do detailu včetně návrhu veškerých komponent vozidla. Pro určení vlivu odlehčovacích otvorů na vlastnosti hrubé stavby skříně bude tento zjednodušený model dostatečný.

#### Ocel S355 J2G3

Mez kluzu:  $355 \text{ Nmm}^{-2}$

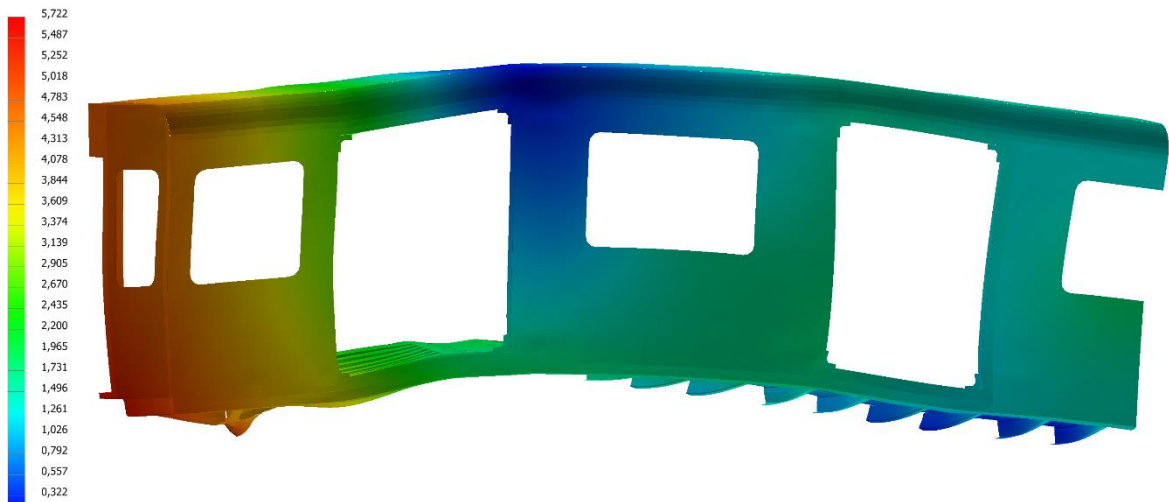
Mez pevnosti:  $500 \text{ Nmm}^{-2}$

Koeficient bezpečnosti při ověření výpočtem: 1,15

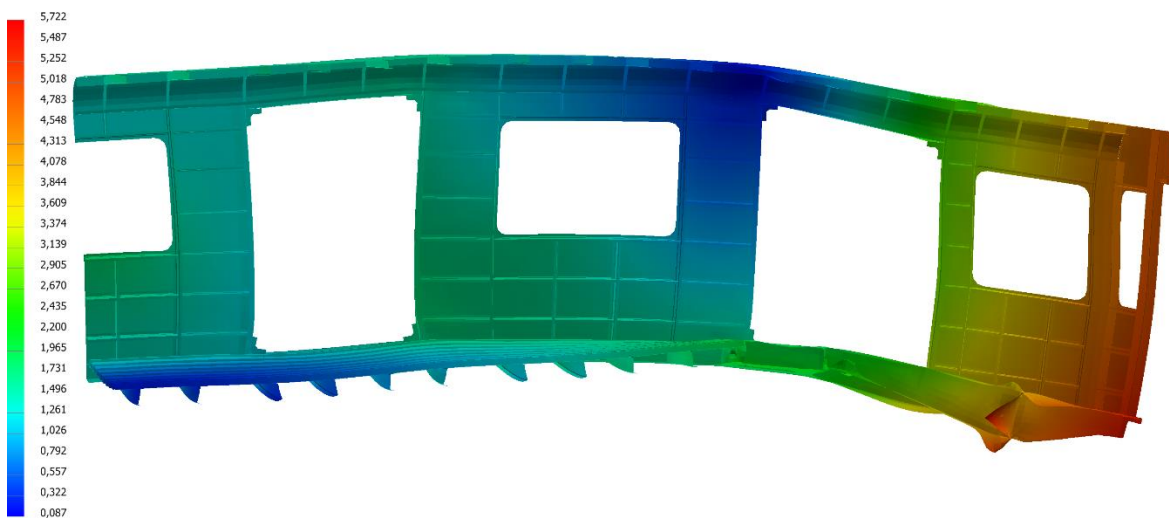
Mez kluzu snižená o koeficient bezpečnosti:  $308 \text{ Nmm}^{-2}$

Mez pevnosti snižená o koeficient bezpečnosti:  $434 \text{ Nmm}^{-2}$

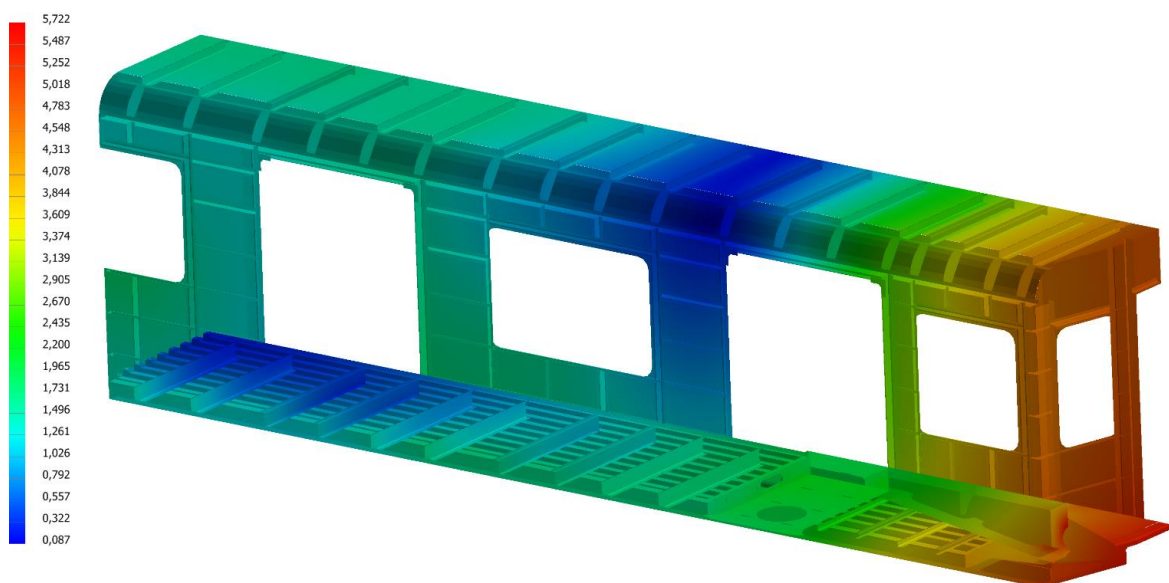
Deformaci skříně zatíženou maximální provozním zatížením lze vidět na obr. 104, 105, 106. Vyobrazená deformace neodpovídá výsledkům a je zvětšena pro zřetelnost. Je patné ohnutí podlahy na každé straně hlavního příčnicku u podvozku. Největší deformace je způsobena tlakovou silou na desku spřáhla.



Obr. 106.: Deformace skříně při maximálním provozním zatížení

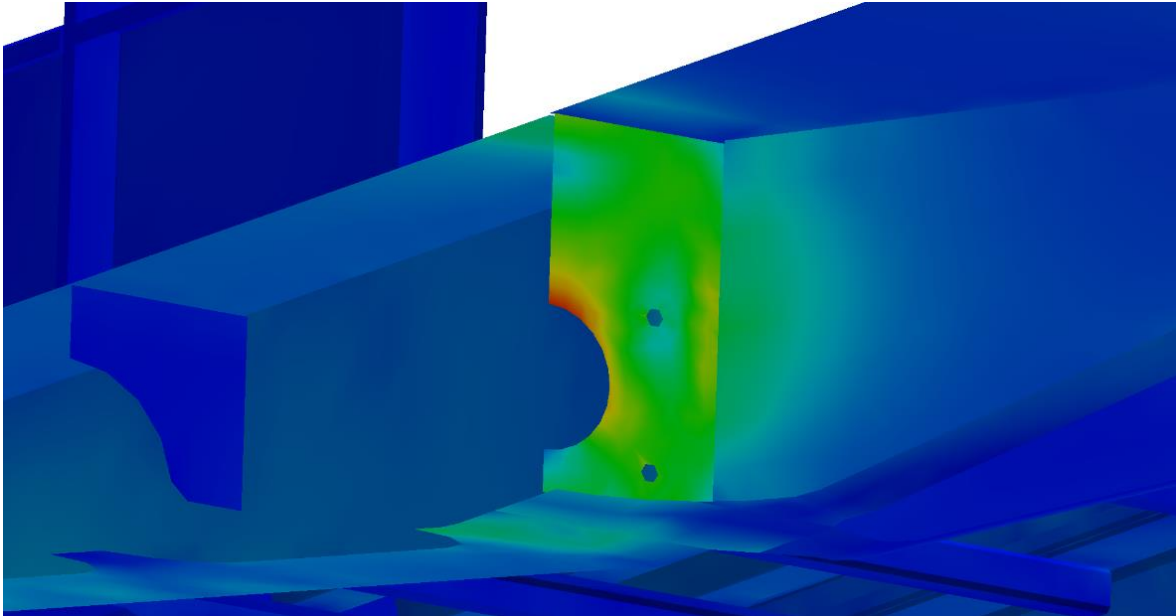


Obr. 105.: Deformace skříně při maximálním provozním zatížení



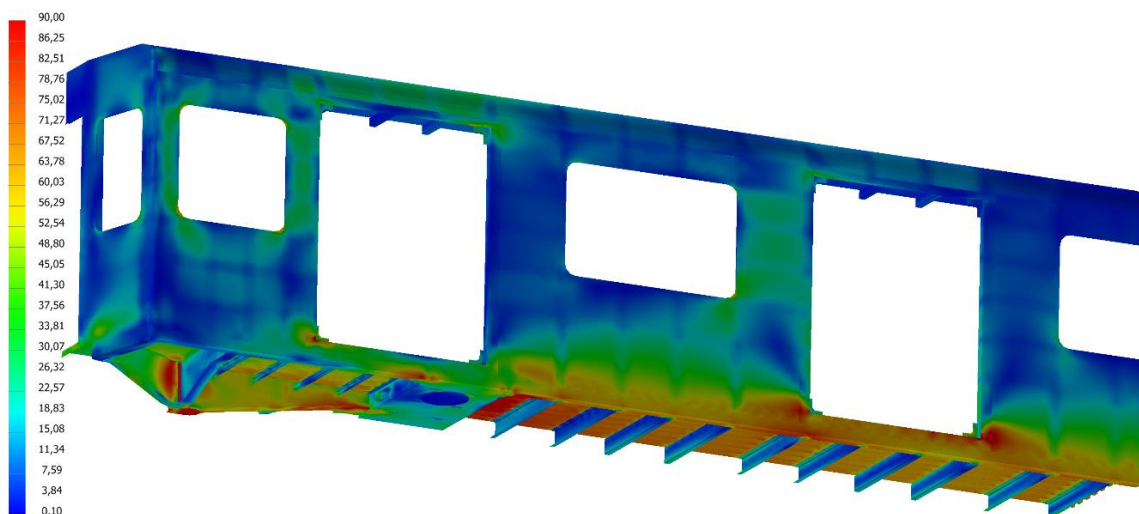
Obr. 104.: Průhyb skříně při maximálním provozním zatížení

Mez kluzu byla překročena v blízkosti upevnění spřáhla (obr. 107). Toto kritické místo by se dostalo do povolených hodnot napětí po zvýšení tloušťky spřáhla. Dále jsou špičky napětí v rozích dveří a ve spojení mezi hlavním příčným a podélníky, ty by se řešili při detailním zpracování hrubé stavby v mém případě je mohu zanedbat.

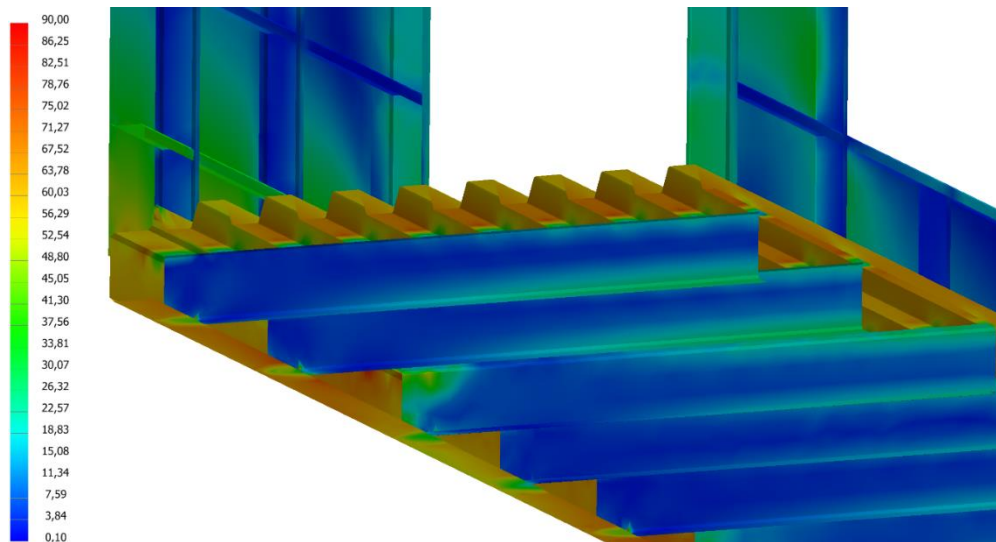


Obr. 107.: Kritické místo desky spřáhla

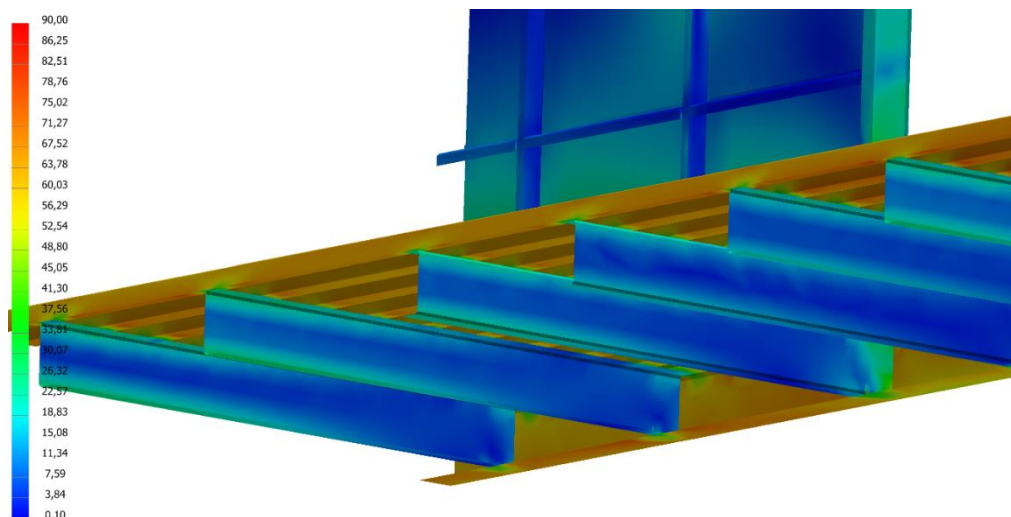
Bočnice skříňe a střecha nejsou výrazně namáhané (obr 108). Mezi nejvíce namáhané části patří spodek vozidla a rohy dveří. Příčnický podlahy jsou namáhané na ohyb a je patné, že mají velkou rezervu do meze kluzu materiálu.



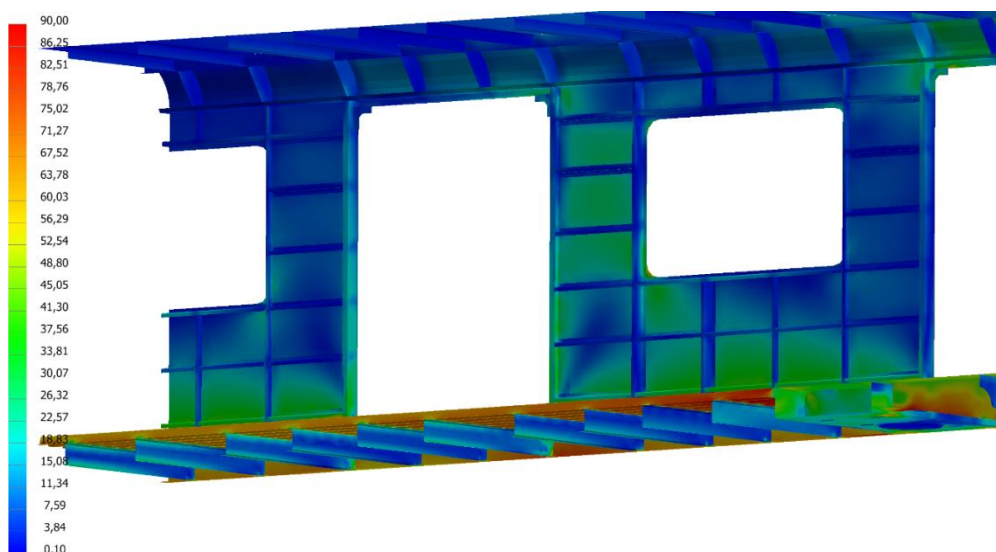
Obr. 108.: Rozložení napětí



Obr. 109.: Rozložení napětí v sestavě skříně, příčnice jsou výrazně namáhané na ohyb



Obr. 110.: Napětí ve spodku skříně, příčnice lze odlehčit v jejich středu



Obr. 111.: Bočnice a střecha jsou namáhané minimálně

## 10. Aplikace odlehčovacích otvorů na ocelové hrubé stavbě vozidla metra

Vhodné profily k odlehčování se mohou určit podle následujících kritérií:

- 1) Největší možná redukce hmotnosti – maximální snížení hmotnosti, lze dosáhnout odlehčením všech profilů a plechů
- 2) Ekonomicky výhodná redukce hmotnosti – odlehčení se provede pouze na profilech a plechách větší tloušťky

U vozidel metra jsou bočnice a střecha z dílů malé tloušťky, kromě sedadel a interiéru nenesou další vybavení. Odlehčováním těchto částí se ušetří minimální hmotnost, ale výrazně vzrostou náklady každého dílu. Největší potenciál pro ušetření hmotnosti mají příčníky spodku vozidla, přenáší velká zatížení a jsou vyrobeny z plechů větší tloušťky (obr. 112).



Obr. 112.: Zvýraznění nejvýhodnějších míst pro vytvoření odlehčovacích otvorů



## 10.1. Volba kritérií odlehčení

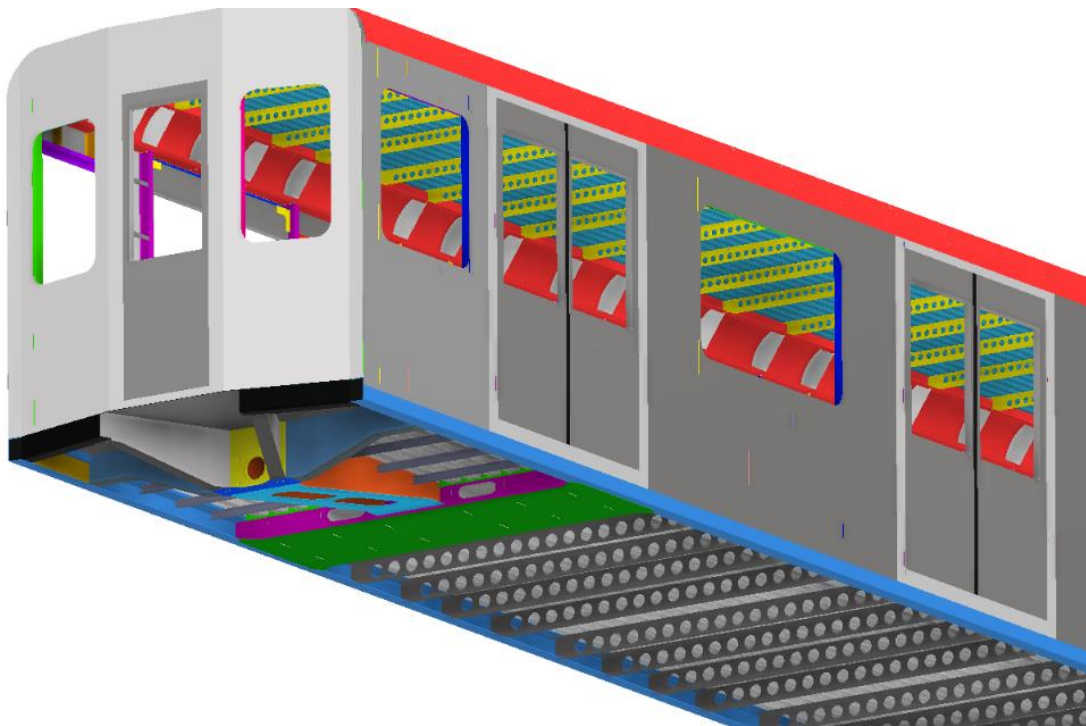
Odlehčování jsem provedl podle výsledků ze 7. kapitoly. Vyzkoušel jsem vliv kruhových odlehčovacích děr při odebrané ploše 34 % a trojúhelníkové otvory při odebrání 38 %. Odlehčení jsem provedl na U profilech spodku vozidla a střechy.

Odlehčení se může provést se zaměřením na hmotnost, deformaci skříně a maximální napětí.

- Pokud chceme dosáhnout určitého hmotnostního limitu, lze z profilů odebrat více materiálu i za případu zhoršení únosnosti.
- Dalším kritériem, které se musí sledovat je tuhost skříně a její deformace.
- Poslední kritérium je bezpečnost předepsaná normou, nebo kupujícím kolejového vozidla. Napětí nesmí přesáhnout upravenou mez kluzu bezpečnostním koeficientem.

## 10.2. Aplikace odlehčování profilů na návrh hrubé stavby skříně

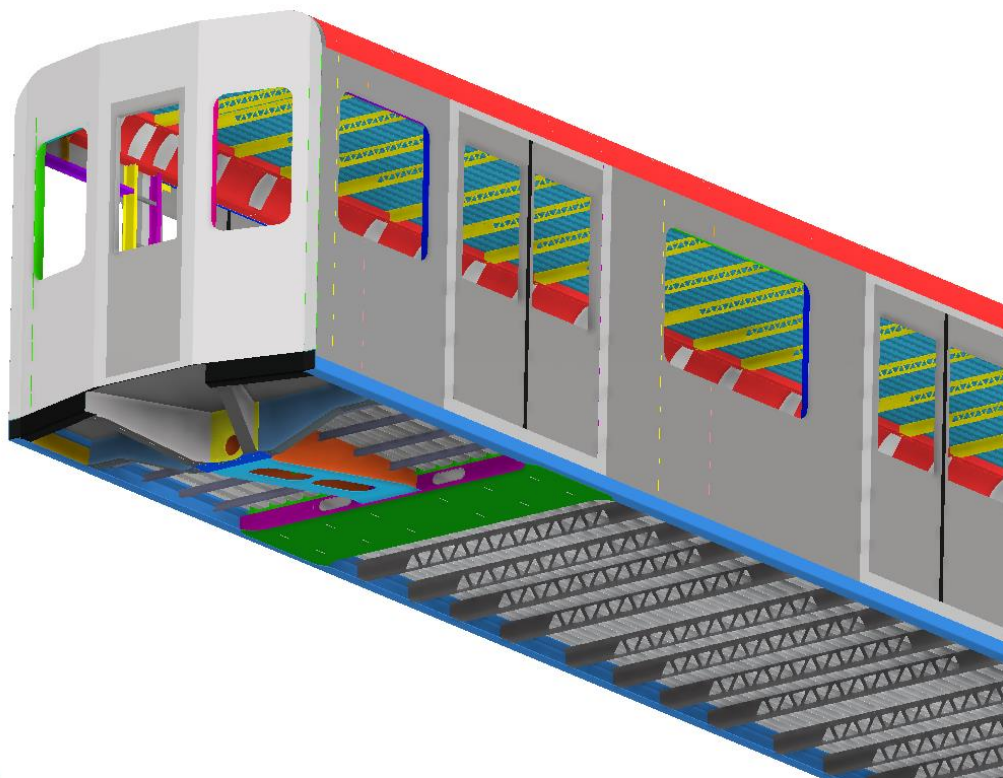
### 1) Hmotnost



Obr. 113.: Aplikace kruhových odlehčovacích otvorů

#### Odlehčení pomocí kruhových otvorů (odebraná plocha 34 %)

neodlehčený příčník podlahy:	18,999 kg
odlehčený příčník podlahy:	15,443 kg
ušetřená hmotnost	$3,556 \text{ kg} \times 20 = 71,12 \text{ kg}$
neodlehčený příčník střechy:	9,316 kg
odlehčený:	8,252 kg
ušetřená hmotnost:	$1,064 \text{ kg} \times 36 = 38,304 \text{ kg}$
<b>Celkově ušetřená hmotnost:</b>	<b>109,4 kg</b>



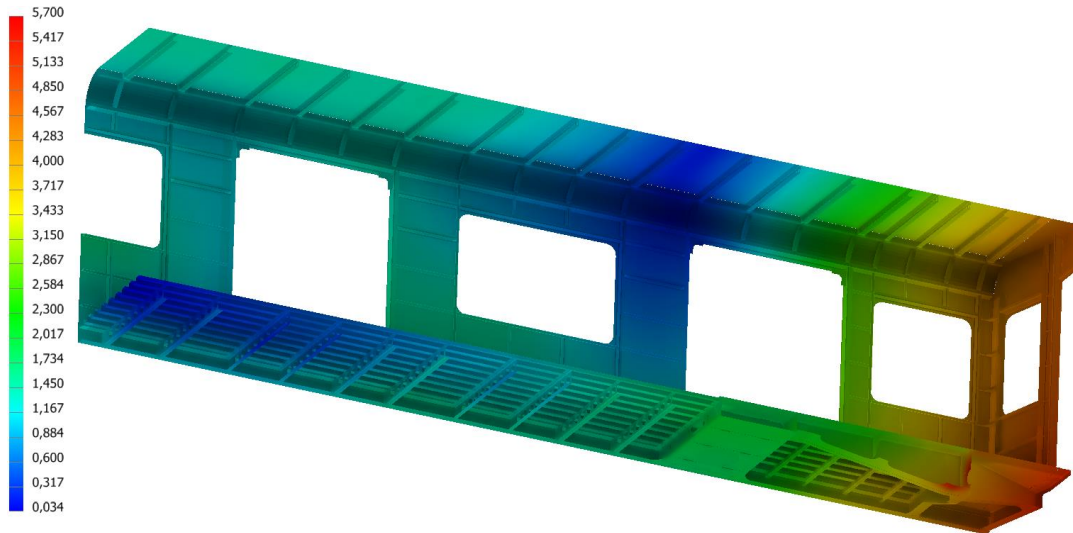
Obr. 114.: Aplikace trojúhelníkových odlehčovacích otvorů

#### **Odlehčení pomocí trojúhelníkových otvorů (odebraná plocha 38 %)**

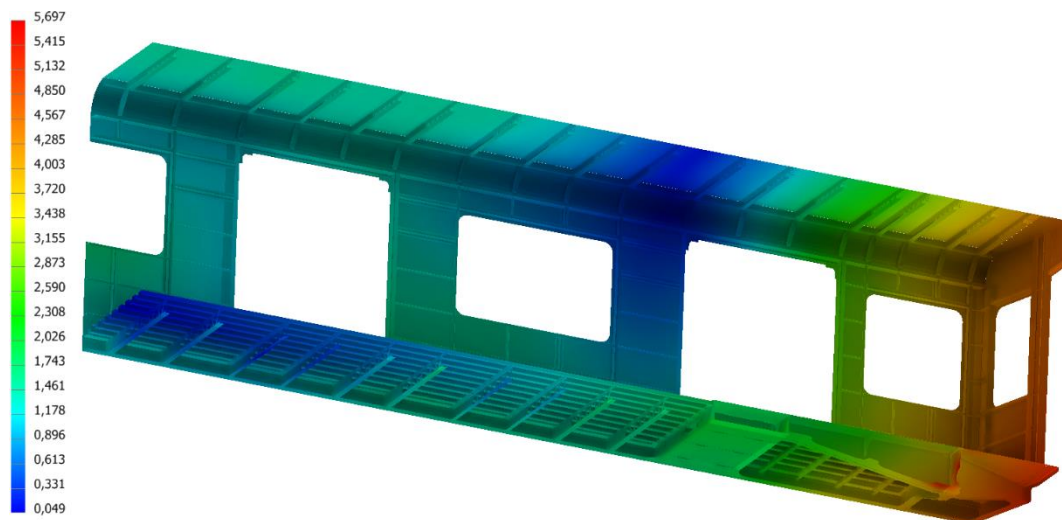
neodlehčený příčník podlahy:	18,999 kg
odlehčený příčník podlahy:	15,03 kg (79,11 % původní hm.)
ušetřená hmotnost:	$3,97 \text{ kg} \times 20 = 79,4 \text{ kg}$
neodlehčený příčník střechy:	9,316 kg
odlehčený:	8,127 kg (87,24 % původní hm.)
ušetřená hmotnost:	$1,189 \text{ kg} \times 36 = 42,804 \text{ kg}$
<b>Celkově ušetřená hmotnost:</b>	<b>122,2 kg</b>

## 2) Deformace – maximální provozní zatížení

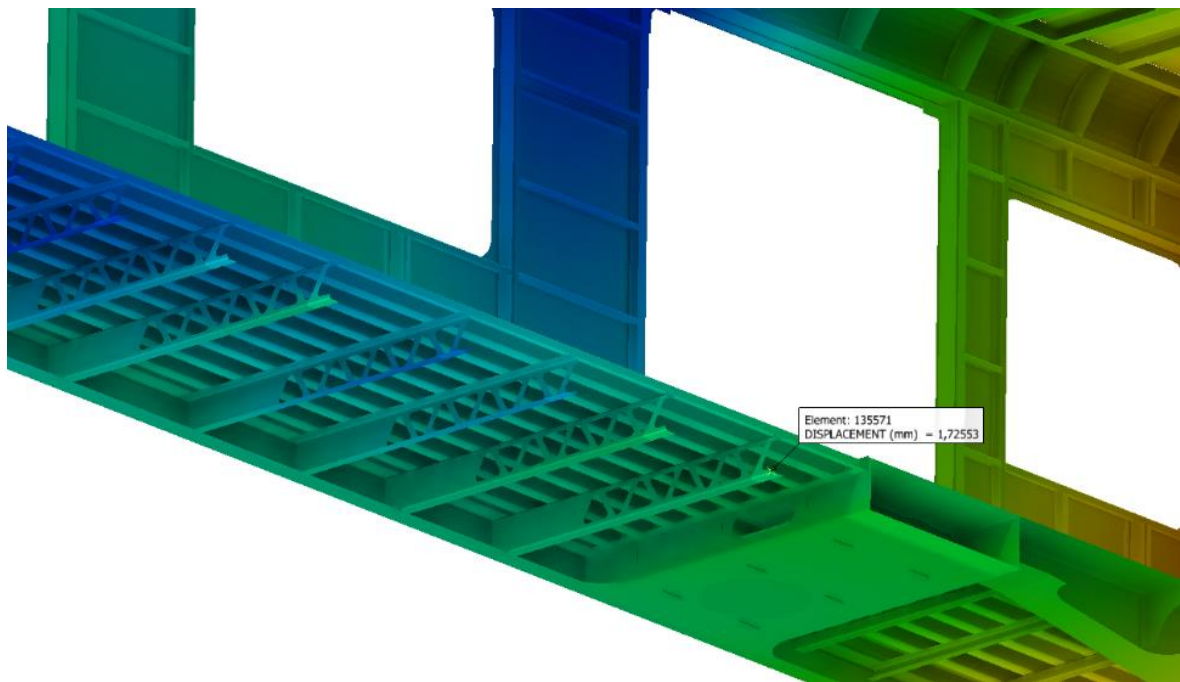
Deformace skříně při použití kruhových odlehčovacích otvorů (obr. 115) a trojúhelníkových otvorů (obr. 116) se v místě představku neodlišuje. Rozdílné jsou deformace odlehčovaných příčniců. Průhyb profilů u hlavního příčnicku vychází 1,68 mm pro kruhové otvory a 1,73 mm pro trojúhelníkové, rozdíl 3 %.



Obr. 115.: Deformace skříně – kruhové otvory



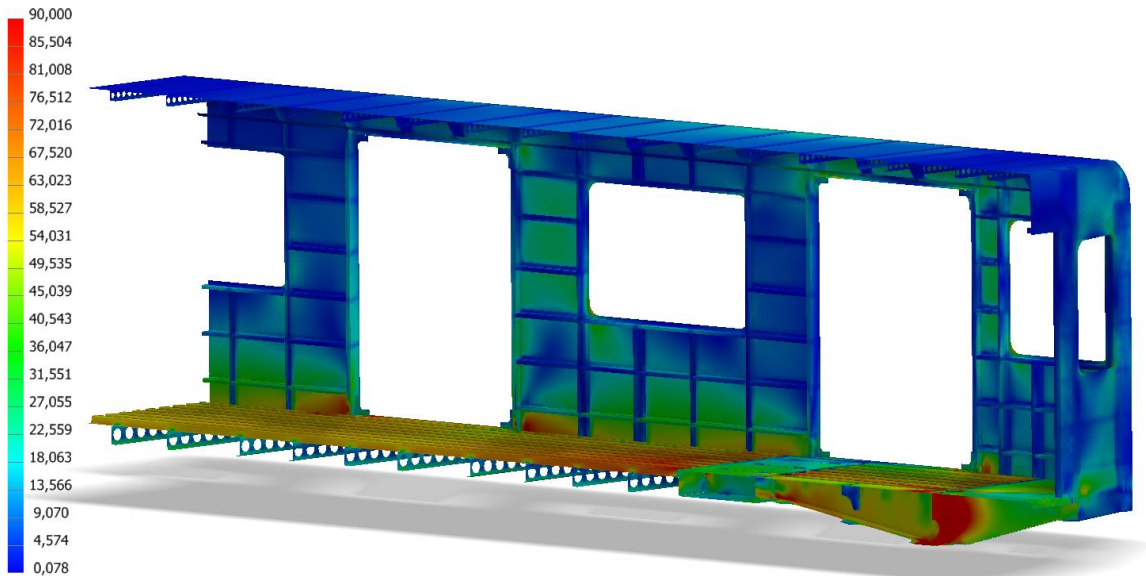
Obr. 116.: Deformace skříně – trojúhelníkové otvory



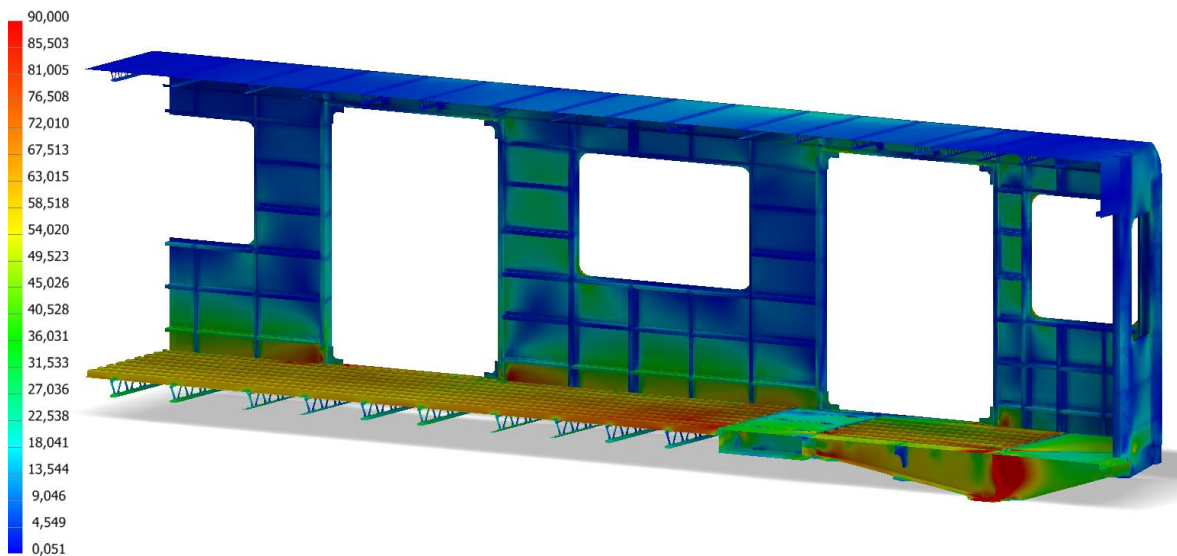
*Obr. 117.: Průhyb odlehčeného příčnicku podlahy*

### 3) Napětí – maximální provozní zatížení

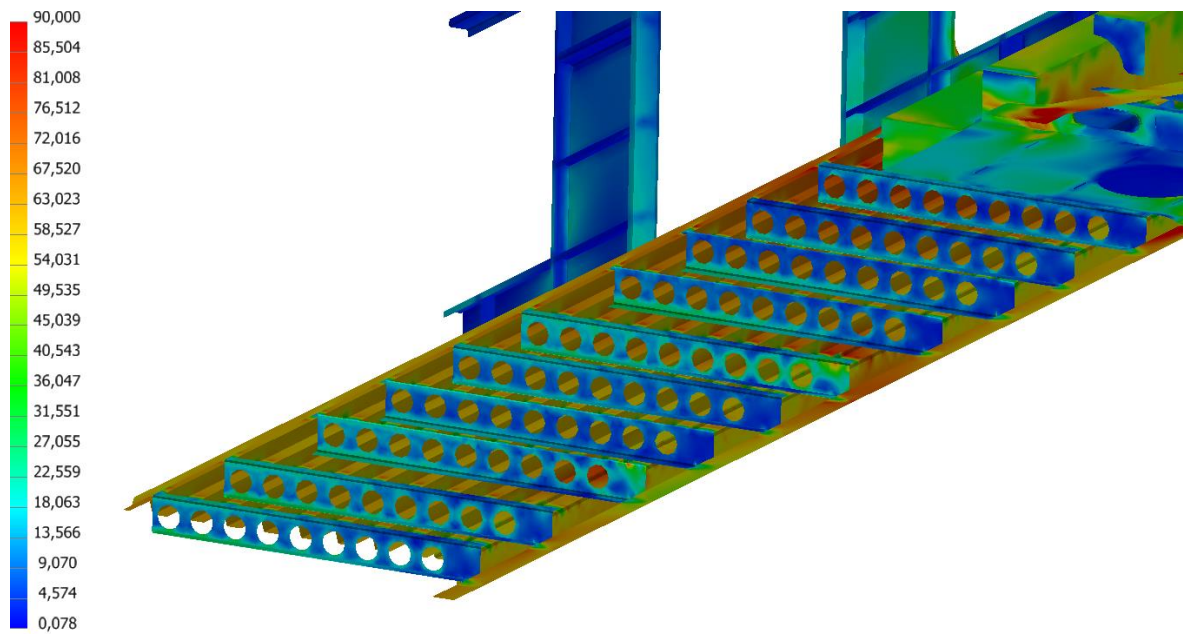
Obrázky 118 a 119 zobrazují rozložení napětí ve skříni. Maximální napětí je stále jako u neodlehčené skříně v oblasti spřáhla a rozích dveří. V odlehčených profilech spodku vozidla se zvětšilo napětí. Je zřetelná výhoda trojúhelníkových otvorů, odebírají více materiálu a napětí se zvedla jen o 2 %.



Obr. 118.: Rozložení napětí – kruhové otvory

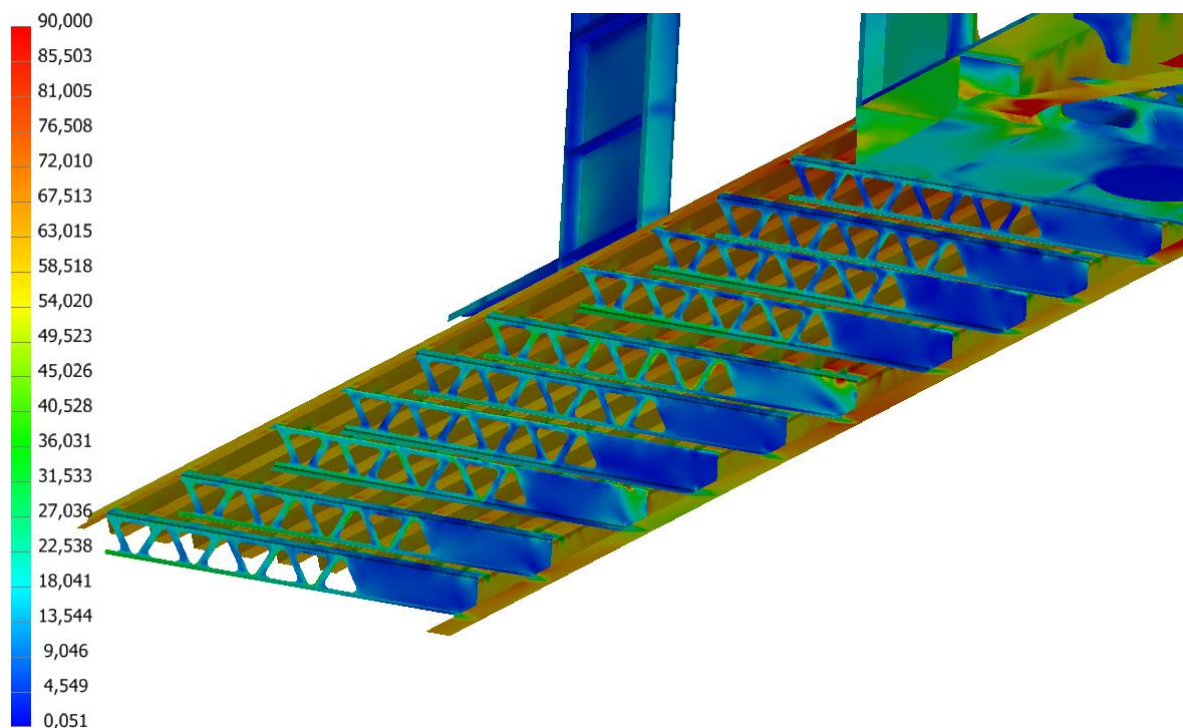


Obr. 119.: Rozložení napětí – trojúhelníkové otvory



*Obr. 120.: Napětí v odlehčených profilech spodku vozidla*

Obrázky 120 a 121 zobrazují napětí v odlehčených profilech podlahy. Rozdíl nejvíce namáhaného profilu odlehčeného kruhovými otvory je oproti neodlehčenému  $4,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Rozdíl napětí profilu s trojúhelníkovými otvory a neodlehčeného je  $5,08 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ .



*Obr. 121.: Napětí v odlehčených profilech spodku vozidla*

### 10.3. Zhodnocení vlivu a aplikace odlehčování profilů hrubé stavby

Aplikací odlehčovacích otvorů, lze výrazně snížit hmotnost dílů skříň kolejevého vozidla. Jak se bude skříň chovat po odlehčení závisí na tvaru, velikosti, počtu a rozmístění odlehčovacích otvorů.

Po vyzkoušení různých kombinací vyšly doporučené hodnoty rozměrů a optimální bod odebrané plochy pro nejvíce používané tvary. Pokud není známé zatížení při návrhu, lze se při tvorbě otvorů držet pod hranicí 30 % odebrané plochy a u dílu nenastane výrazné zvýšení deformace a napětí.

Obecně lze doporučit výškou odlehčovacího otvoru nepřesáhnout 80 % výšky odlehčovaného profilu.

Kruhové otvory vytvářet v poměru Rozteč/Průměr - 1,5, pokud se pohybujeme pod touto hodnotou vznikají špičky napětí okolo otvorů. Při velkém překročení tohoto poměru se odebere méně materiálu, než je ideální. Optimum odebraného materiálu je pro kruhové otvory 34 %.

Elipsovité a drážkové otvory mají efekt podobný jako kruhové otvory, jejich výhodou oproti kruhovým je možnost odebrání více materiálu při dodržení poměru Rozteč/Šířka otvoru - 1,5. U elipsových otvorů je nutné věnovat pozornost velikosti vnitřního zaoblení.

Nejvýhodnější je použití trojúhelníkových odlehčovacích otvorů. Optimální bod max. zatížení/hmotnosti vyšel na 38 % odebraného materiálu. Oproti kruhovým otvorům se sníží únosnost minimálně, ale umožní odebrat o 4 % více materiálu. Nejeefektivnější rozmístění se mi potvrdilo v poměru rozteč/délka strany v rozmezí 0,8 - 1.

Trojúhelníkové otvory nezanechají prostor pro upevňování dalších komponent, proto jsou vhodné ve spodku, ale ne na bočnice, do bočnic se hodí drážky a kruhové otvory.

Dalším možným směrem, jakým se lze při aplikaci odlehčovacích otvorů ubírat by bylo rozdělení vzdálenosti a velikosti otvorů proměnlivě podle působení vnějšího zatížení.



## 11. Závěr

V první části diplomové práce jsem se zaměřil na konstrukci hrubé stavby skříně kolejového vozidla. Tato část obsahuje popis všech částí, které do skříně vstupují nebo přímo ovlivňují a utvářejí její podobu.

Dále jsem provedl rozbor vlivu odlehčovacích otvorů na válcované a ohraňované profily. Válcované profily potvrdily předpoklad, že jsou svou technologií výroby a geometrií dobře optimalizované na namáhání ohybem. Horní a dolní pásnice se válcují větší tloušťky než stojina, takže odebrat materiál ze stojiny pomocí odlehčovacích otvorů nepřinese žádné výrazné zlepšení vlastností. Ohraňované profily mají tloušťku po celém průřezu stálou, proto u nich lze určit ideální poměr maximálního zatížení které přenesou a jejich hmotnosti. Zpracoval jsem přehled pro různé tvary a rozmístění otvorů a velikosti nejčastěji používaných profilů v konstrukci kolejového vozidla. Nalezl jsem optimální bod odlehčení pro kruhové otvory. Tuto hodnotu odlehčení jsem aplikoval pro jiné tvary odlehčovacích otvorů pro srovnání s kruhovými. Nejvýhodnější tvar pro ušetření hmotnosti na hrubé stavbě jsou trojúhelníkové otvory. Při stejné deformaci a napětí umožní větší hmotnostní redukci než ostatní tvary otvorů.

Stanovenými hodnotami a doporučeními, se lze při návrhu odlehčovacích otvorů inspirovat. Pokud není známé zatížení při návrhu, lze se při tvorbě otvorů držet pod hranicí 30 % odebrané plochy a u dílu nenastane výrazné zvýšení deformace a napětí, ale pokles hmotnosti dílu bude značný. Při aplikaci odlehčovacích otvorů se musí brát v úvahu vhodnost použitého tvaru, trojúhelníkové otvory nezanechají prostor pro montáž dalších prvků, proto nejsou vhodné na bočnice skříně.

Ve třetí části jsem navrhl zjednodušenou hrubou stavbu skříně vozidla metra. Skříň je diferenciální ocelové konstrukce, vnější rozměry jsou shodné s metrem M1. Návrh skříně jsem zkontroloval pomocí příslušné normy pro maximální provozní zatížení. Dále jsem podle vyšetřených vlivů otvorů na nosníky aplikoval odlehčovací otvory. Potvrdilo se chování odlehčených profilů i v rámci celku skříně.

## Seznam použité literatury

- [1] LINERT, Stanislav, Pavel FOJTÍK a Ivo MAHEL. Kolejová vozidla pražské městské hromadné dopravy. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2005. ISBN 80-239-5463-6.
- [2] Siemens builds new metro for Vienna [online]. Munich/Vienna, 2019 [cit. 2020-07-01]. Dostupné z: <https://press.siemens.com/global/en/feature/siemens-builds-new-metro-vienna>
- [3] *List of metro systems* [online]. 2020 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_metro\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_metro_systems)
- [4] Přednášky Teorie vozidel, Ing. Jan Kalivoda Ph.D. – školní výukové materiály
- [5] METROWEB.CZ [online]. Praha: Ing. Tomáš Rejda [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://metroweb.cz/metro/M1/M1.htm>
- [6] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. Kolejová vozidla III. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN 978-80-261-0028-7.
- [7] Kuba.petriny.net [online]. Praha [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://kuba.petriny.net/M1.htm>
- [8] Přednášky Pohony kolejových vozidel, Doc. Ing. Josef Kolář CSc. – školní výukové materiály
- [9] SIEMENS [online]. Praha, 2006 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/press/prazske-metro-zajizdi-do-venezuely>
- [10] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. Kolejová vozidla II. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [11] KOLÁŘ, Josef. Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04262-5.
- [12] Přednášky Konstrukce kolejových vozidel, Doc. Ing. Josef Kolář CSc. – školní výukové materiály
- [13] DOUDA, Pavel, Tomáš HEPTNER a Josef KOLÁŘ. *Pozemní dopravní prostředky*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01475-4.

- [14] KUBÁT, Bohumil a Miroslav PENC. *Městská kolejová doprava*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02117-3.
- [15] SIEMENS [online]. Praha, 12. 09. 2013n. l. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/press/>
- [16] Přednášky z Pružnost pevnost I, doc. Ing. Jan Řezníček, CSc. – školní výukové materiály
- [17] MICHALEC, Jiří a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. Pružnost a pevnost I. 3. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 8001042243;9788001042243;.
- [18] Nosníky s kruhovými otvory - [online]. Prof. Ing. Josef Macháček, DrSc. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/pomucky/Nosniky-s-kruhovymi-otvory.pdf>
- [19] Boronex mercedes car body [online]. 2020 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://www.boronextrication.com/2019/04/22/2019-mercedes-g-class-body-structure/>
- [20] Vanscentre - Chevrolet [online]. 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.vanscentre.com/magazin/chevrolet-se-s-novymi-modely-silverado-vraci-na-po/>
- [21] Airbus A380: Superjumbo of the 21st Century [online]. 2020 [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=KcaYjPhRnWUC&pg=PA78&lpg=PA78&dq=airbus+weight+saving&source=bl&ots=rmya\\_--0a5&sig=ACfU3U37DWrlBJqwVpUh8Bmu9z82Ow0n6w&hl=cs&sa=X&ved](https://books.google.cz/books?id=KcaYjPhRnWUC&pg=PA78&lpg=PA78&dq=airbus+weight+saving&source=bl&ots=rmya_--0a5&sig=ACfU3U37DWrlBJqwVpUh8Bmu9z82Ow0n6w&hl=cs&sa=X&ved)
- [22] Český normalizační institut. ČSN EN 12663 Železniční aplikace: konstrukční požadavky na skříně kolejových vozidel = Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies.
- [23] Bolzano Technická příručka [online]. Kladno, 2020 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025>

**Seznam obrázků**

OBR. 1.: NOVÉ AUTONOMNÍ METRO PRO VÍDEŇ [2] .....	2
OBR. 2.: SCHÉMA SÍTĚ METRA V ŠANGHAJI, 17 LINEK A 413 STANIC [3] .....	5
OBR. 3.: NEKONVENČNÍ PROVEDENÍ METRA [4] .....	5
OBR. 4.: KONVENČNÍ PROVEDENÍ METRA [4] .....	5
OBR. 5.: PROTOTYPOVÝ VŮZ R1 LINKY C [5] .....	6
OBR. 6.: SCHÉMA PRAŽSKÉHO METRA, LINKY A, B, C SE SVÝMI DEPY [5] .....	7
OBR. 7.: SOUPRAVA 81-71M LINKY A, B [5] .....	8
OBR. 8.: SOUPRAVA M1 LINKY C [5] .....	8
OBR. 9.: SCHÉMA ČELNÍCH VOZŮ METRA .....	11
OBR. 10.: SCHÉMA VLOŽENÝCH VOZŮ METRA .....	11
OBR. 11.: SCHÉMA VLOŽENÉHO VOZU METRA .....	11
OBR. 12.: HRUBÁ STAVBA METRA M1 Z PROTlačOVANÝCH PROFILŮ [6] .....	12
OBR. 13.: SVAŘOVACÍ PŘÍPRAVEK PRO HLINÍKOVÝ PROFIL [6] .....	12
OBR. 14.: PROFIL STŘECHY METRA M1 S VIDITELNÝMI DRÁŽKAMI A ZÁMKY [6] .....	12
OBR. 15.: C DRÁŽKY NA SPODKU SKŘÍNĚ [7] .....	13
OBR. 16.: PODVOZEK METRA M1 [8] .....	14
OBR. 17.: NAPÁJENÍ TŘETÍ KOLEJNICÍ PRAŽSKÉHO METRA [7] .....	15
OBR. 18.: METRO SE STŘEŠNÍM SBĚRAČEM V MARACAIBO [9] .....	15
OBR. 19.: SPŘÁHLO DELLNER ČELNÍCH VOZŮ METRA [6] .....	16
OBR. 20.: DETAIL ČELA SPŘÁHLA [5] .....	16
OBR. 21.: SEMIPERMANENTNÍ SPŘÁHLO VLOŽENÝCH VOZŮ [6] .....	16
OBR. 22.: POHLED NA BOK HRUBÉ SKŘÍNĚ MÉHO NÁVRHU, DVEŘNATOST SE SHODUJE DVEŘNATOSTÍ .....	18
OBR. 23.: ŘEZ PODLAHOU VOZIDLA METRA DIFERENCIÁLNÍ KONSTRUKCE [6] .....	19
OBR. 24.: ŘEZ PODLAHOU METRA INTEGRÁLNÍ KONSTRUKCE SE SENDVIČOVOU DESKOU A PRYZŽOVOU IZOLACÍ [6] .....	20
OBR. 25.: INTERIÉR METRA PRO ŘÍM S NEREZOVÝMI MADLY A PLASTOVÝMI SEDAČKAMI, PRAŽSKÉ METRO ČALOUNĚNÉ SEDAČKY A POVRCHOVĚ UPRAVENÁ MADLA [6] .....	21
OBR. 26.: ROZMÍSTĚNÍ SEDAČEK METRA M1 .....	21
OBR. 27.: PRŮŘEZ TUNELEM PRAŽSKÉHO METRA [14] .....	22
OBR. 28.: PRŮŘEZ KOLEJNICE S49 [4] .....	22
OBR. 29.: VÝVOJ KONSTRUKCE SKŘÍNĚ KOLEJOVÝCH VOZIDEL S POSTUPEM ČASU [12] .....	23
OBR. 30.: UKÁZKA DIFERENCIÁLNÍ STAVBY HRUBÉ SKŘÍNĚ [8] .....	25
OBR. 31.: VYSOKORYCHLOSTNÍ VLAK SIEMENS VIAGGIO COMFORT [15] .....	26
OBR. 32.: DIFERENCIÁLNÍ STAVBA HRUBÉ SKŘÍNĚ [15] .....	26
OBR. 33.: UKÁZKA SKŘÍNĚ Z HLINÍKOVÝCH PROTlačOVANÝCH PROFILŮ [8] .....	27
OBR. 34.: SPOJOVÁNÍ PROFILŮ POMOCÍ SVARŮ [10] .....	27
OBR. 35.: HYBRIDNÍ STAVBA HRUBÉ SKŘÍNĚ [8] .....	28
OBR. 36.: POHLED NA SAMONOSNOU KAROSÉRII VOZU MERCEDES G, ODLEHČOVACÍ OTVORY JSOU PATRNĚ NA VÝZTUHÁCH DVEŘÍ [19] .....	30
OBR. 37.: RÁM UŽITKOVÉHO VOZU CHEVROLET SILVERADO [20] .....	31
OBR. 38.: OTVORY VYTVOŘENÉ V U PROFILECH RÁMU VOZIDLA CHEVROLET SILVERADO [20] .....	31
OBR. 39.: ŘEZ TRUPEM LETADLA A300, PŘÍČNÍKY PODLAHY MAJÍ PATNÉ ODLEHČENÍ PODOBNĚ JAKO RÁM AUTOMOBILU A KOLEJOVÝCH VOZIDEL [21] .....	32
OBR. 40.: ČÁST OCELOVÉ KONSTRUKCE AIRBUSU A380 ZVYŠUJÍCÍ TUHOST KONSTRUKCE [21] .....	32
OBR. 41.: HRUBÁ STAVBA TRAMVAJE AVENIO [15] .....	33
OBR. 42.: ODLEHČOVACÍ OTVORY VE SKŘÍNI VOZIDLA RAILJET [15] .....	34
OBR. 43.: ROZLOŽENÍ OHYBOVÝCH NAPĚTÍ PO PRŮŘEZU [17] .....	35
OBR. 44.: DUTÝ VÁLCOVÝ PROFIL .....	36
OBR. 45.: ROZLOŽENÍ SMYKOVÉHO NAPĚTÍ V TENKOSTĚNNÉM I PROFILU .....	37
OBR. 46.: ROZLOŽENÍ SMYKOVÉHO NAPĚTÍ V U PROFILU .....	38
OBR. 47.: REAKCE VE STŘEDISKU OHYBU .....	38
OBR. 48.: ZKROUČENÍ NOSNÍKU .....	38
OBR. 49.: UKÁZKA ZÁVISLOSTI GEOMETRIE NA PRŮBĚHU OHYBOVÉHO MOMENTU [16] .....	39
OBR. 50.: PROLAMOVANÝ NOSNÍK Z VÁLCOVANÉHO PROFILU [16] .....	40
OBR. 51.: PROLAMOVANÝ NOSNÍK SVAŘEN Z PÁSŮ [18] .....	40
OBR. 52.: PROVEDENÍ KRUHOVÝCH OTVORŮ V I PROFILU [18] .....	41
OBR. 53.: TESTOVANÝ PROFIL A JEHO ULOŽENÍ [23] [16] .....	42
OBR. 54.: U PROFILY POUŽITÉ V KONSTRUKCI KOLEJOVÝCH VOZIDEL .....	46
OBR. 55.: OHRAŇOVANÝ PROFIL .....	46
OBR. 56.: VÁLCOVANÝ PROFIL .....	46
OBR. 57.: OHRAŇOVANÝ PROFIL S OTVORY .....	46
OBR. 58.: UKÁZKA ODLEHČENÉHO PROFILU (34 %) .....	49
OBR. 59.: TEST DALŠÍCH POUŽÍVANÝCH TVARŮ .....	50
OBR. 60.: ZVÝŠENÉ NAPĚTÍ V ROHU OTVORŮ .....	52
OBR. 61.: ROZTEČ/DĚLKA STRANY .....	52
OBR. 62.: UKÁZKA ODLEHČENÉHO PROFILU (38 %) .....	53
OBR. 63.: CAD VIZUALIZACE VYTVOŘENÉHO MODELU DIFERENCIÁLNÍ STAVBY METRA .....	54

OBR. 64.: SOUPRAVA SLOŽENÁ Z PĚTI VOZŮ .....	54
OBR. 65.: MODEL SKŘÍNĚ VČETNĚ INTERIÉRU A DVEŘÍ .....	55
OBR. 66.: KONSTRUKCE DIFERENCIÁLNÍ HRUBÉ STAVBY SKŘÍNĚ .....	55
OBR. 67.: HLAVNÍ RÁM SKŘÍNĚ .....	56
OBR. 68.: POPIS KOMPONENTŮ RÁMU VOZIDLA .....	56
OBR. 69.: PROFIL VÁLCOVANÝCH PODÉLNÍKŮ RÁMU .....	56
OBR. 70.: SVAŘENEC HLAVNÍHO PŘÍČNÍKU S KANÁLY PRO ROZVODY .....	57
OBR. 71.: ŘEZ HLAVNÍM PŘÍČNÍKEM S VIDITELNÝMI ŽEBRY .....	57
OBR. 72.: UKÁZKA ZAROVNÁNÍ PŘÍČNÍKŮ HLAVNÍHO RÁMU A SLOUPKŮ BOČNICE .....	58
OBR. 73.: SPOJENÍ VLNITÉHO PLECHU PODLAHY S PODÉLNÍKEM A BOČNICÍ .....	58
OBR. 74.: PŘEDSTAVEK ZE SPODNÍ ČÁSTI VOZIDLA .....	59
OBR. 75.: PŘEDSTAVEK A VIDITELNÁ KONSTRUKCE SMĚREM ZE STŘEDU VOZU .....	59
OBR. 76.: SESTAVA BOČNIC VOZU .....	60
OBR. 77.: JEDNOTLIVÉ ČÁSTI BOČNICE S VIDITELNOU VNITŘNÍ STRANOU .....	60
OBR. 78.: POHLED NA ČELNICI Z OBOU STRAN .....	61
OBR. 79.: POHLED NA PŘECHOD ZAKONČENÍ STŘECHY .....	61
OBR. 80.: ŘEZ STŘECHOU A POHLED NA JEJÍ KONSTRUKCI .....	62
OBR. 81.: ŘEZ STŘEDEM VOZIDLA .....	62
OBR. 82.: PŘÍČNÝ ŘEZ VOZIDLEM S VYOBRAZENÝM INTERIÉREM A OBLOŽENÍM .....	63
OBR. 83.: SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM KOLEJOVÉHO VOZIDLA [22] .....	63
OBR. 84.: TABULKA TLAKOVÝCH SIL V PROSTORU SPŘÁHEL [22] .....	67
OBR. 85.: TABULKA TAHOVÝCH SIL V PROSTORU SPŘÁHEL [22] .....	67
OBR. 86.: SCHÉMA ZATÍŽENÍ SKŘÍNĚ .....	67
OBR. 87.: MAXIMÁLNÍ PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ [22] .....	68
OBR. 88.: SCHÉMA ZATÍŽENÍ MAXIMÁLNÍM PROVOZNÍM ZATÍŽENÍM .....	68
OBR. 89.: KOMBINACE DRUHŮ STATICKÝCH ZATÍŽENÍ SKŘÍNÍ VOZIDEL [22] .....	69
OBR. 90.: KOMBINACE ZATÍŽENÍ SKŘÍNĚ .....	69
OBR. 91.: UKÁZKA STATICKÝCH ZKOUŠEK SKŘÍNĚ KOLEJOVÉHO VOZIDLA [12] .....	69
OBR. 92.: MODEL OCELOVÉ DIFERENCIÁLNÍ STAVBY SKŘÍNĚ .....	70
OBR. 93.: ŘEZ SKŘÍNÍ V ROVINĚ YZ, ČERVENÉ OHRANIČENÍ ZVÝRAZŇUJE ZBÝVAJÍCÍ ČÁST MODELU PRO VÝPOČET .....	71
OBR. 94.: ŘEZ SKŘÍNÍ V ROVINĚ XZ, ČERVENÉ OHRANIČENÍ ZVÝRAZŇUJE ZBÝVAJÍCÍ ČÁST MODELU PRO VÝPOČET .....	71
OBR. 95.: ČTVRTINA MODELU SKŘÍNĚ METRA POUŽITÁ PRO VÝPOČET MKP .....	72
OBR. 96.: PŘEVOD CELÉ SESTAVY NA PLOCHY .....	72
OBR. 97.: MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELI S355 A JEJÍ CHEMICKÉ SLOŽENÍ [23] .....	73
OBR. 98.: UKÁZKA VAZBY SKŘÍNĚ A PODVOZKU .....	73
OBR. 99.: SÍŤ MODELU .....	74
OBR. 100.: VNITŘNÍ PROSTOR PRO CESTUJÍCÍ .....	74
OBR. 101.: SPODEK VOZU .....	76
OBR. 102.: SESTAVA BOČNIC .....	76
OBR. 103.: SESTAVA STŘECHY .....	77
OBR. 105.: DEFORMACE SKŘÍNĚ PŘI MAXIMÁLNÍM PROVOZNÍM ZATÍŽENÍ .....	78
OBR. 106.: DEFORMACE SKŘÍNĚ PŘI MAXIMÁLNÍM PROVOZNÍM ZATÍŽENÍ .....	78
OBR. 104.: PRŮHYB SKŘÍNĚ PŘI MAXIMÁLNÍM PROVOZNÍM ZATÍŽENÍ .....	78
OBR. 107.: KRITICKÉ MÍSTO DESKY SPŘÁHLA .....	79
OBR. 108.: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ .....	79
OBR. 109.: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V SESTAVĚ SKŘÍNĚ, PŘÍČNÍKY JSOU VÝRAZNĚ NAMÁHANÉ NA OHYB .....	80
OBR. 110.: NAPĚTÍ VE SPODKU SKŘÍNĚ, PŘÍČNÍKY LZE ODLEHČIT V JEJICH STŘEDU .....	80
OBR. 111.: BOČNICE A STŘECHA JSOU NAMÁHANÉ MINIMÁLNĚ .....	80
OBR. 112.: ZVÝRAZNĚNÍ NEVÝHODNĚJŠÍCH MÍST PRO VYTVOŘENÍ ODLEHČOVACÍCH OTVORŮ .....	81
OBR. 113.: APLIKACE KRUHOVÝCH ODLEHČOVACÍCH OTVORŮ .....	83
OBR. 114.: APLIKACE TROJÚHELNÍKOVÝCH ODLEHČOVACÍCH OTVORŮ .....	84
OBR. 115.: DEFORMACE SKŘÍNĚ – KRUHOVÉ OTVORY .....	85
OBR. 116.: DEFORMACE SKŘÍNĚ – TROJÚHELNÍKOVÉ OTVORY .....	85
OBR. 117.: PRŮHYB ODLEHČENÉHO PŘÍČNÍKU PODLAHY .....	86
OBR. 118.: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ – KRUHOVÉ OTVORY .....	87
OBR. 119.: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ – TROJÚHELNÍKOVÉ OTVORY .....	87
OBR. 120.: NAPĚTÍ V ODLEHČENÝCH PROFILECH SPODKU VOZIDLA .....	88
OBR. 121.: NAPĚTÍ V ODLEHČENÝCH PROFILECH SPODKU VOZIDLA .....	88

## Seznam grafů

GRAF 1.: POKLES MAXIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ NOSNÍKU A HMOTNOSTI .....	45
GRAF 2.: POMĚR ZATÍŽENÍ A HMOTNOSTI .....	45
GRAF 3.: URČENÍ NEJVÝHODNĚJŠÍHO ROZMÍSTĚNÍ OTVORŮ PO DÉLCE NOSNÍKU .....	47
GRAF 4.: POKLES MAXIMÁLNÍHO ZATÍŽENÍ, KTERÉ NOSNÍK PŘENESE V ZÁVISLOSTI NA JEHO KLESAJÍCÍ HMOTNOSTI.....	48
GRAF 5.: URČENÍ OPTIMÁLNÍHO BODU ODLEHČENÍ V ZÁVISLOSTI NA VLASTNOSTECH NOSNÍKU .....	49
GRAF 6.: URČENÍ OPTIMÁLNÍHO BODU ODLEHČENÍ V ZÁVISLOSTI NA VLASTNOSTECH NOSNÍKU A ROZLOŽENÍ OTVORŮ .....	53

## Seznam tabulek

TAB. 1.: DEFORMACE A NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU ROZTEČE A PRŮMĚRU OTVORŮ .....	43
TAB. 2.: HODNOTY K VELIKOSTEM ODLEHČOVACÍCH OTVORŮ .....	44
TAB. 3.: ŽKOUŠKA DISTRIBUCE DĚR PO DÉLCE PROFILU .....	47
TAB. 4.: ZMĚNY HMOTNOSTI, DEFORMACE A NAPĚTÍ.....	48
TAB. 5.: TABULKA VÝSLEDKŮ PRO DALŠÍ ROZMĚRY .....	50
TAB. 6.: HODNOTY PRO RŮZNÉ ROZMÍSTĚNÍ OTVORŮ A ZAOBLNĚNÍ ROHŮ .....	51
TAB. 7.: HMOTNOSTI JEDNOTLIVÝCH KONSTRUKČNÍCH CELKŮ .....	75

## Seznam příloh

CAD návrh skříně metra

Typový výkres