

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017

Konstruování strojů a technických zařízení

Studijní specializace: Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Rám podvozku pro tramvajový otočný podvozek
s vedením dvojkolí kyvným ramenem a nápravou**

Autor: Bc. Jan Cajthaml

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Heller, CSc.

Konzultant: Ing. Jiří Říha

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan CAJTHAML**
Osobní číslo: **S20N0097P**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**
Téma práce: **Rám podvozku pro tramvajový otočný podvozek s vedením dvojkolí kyvným ramenem a nápravou.**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Návrh rámu podvozku, rozměry, materiály, svařování obrábění. Pevnostní výpočet rámu podvozku MKP, s respektováním příslušných norem.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání

Osnova práce

1. *Rešerše současného stavu*
2. *Specifikace požadavků*
3. *Návrh konstrukčního řešení*
4. *Pevnostní kontrola*
5. *Zhodnocení práce, závěr*

Konzultant Ing. Jiří Říha , Škoda Transportation, a.s., Plzeň

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

HELLER, Petr. *Kolejová vozidla I.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.
HELLER, Petr. *Kolejová vozidla II.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0773-6

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto odstavcem bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Hellerovi, CSc. za cenné rady, připomínky, ochotu a vedení mé diplomové práce.

Chtěl bych také poděkovat firmě Škoda Transportation za poskytnutí tohoto tématu diplomové práce.

A v neposlední řadě patří můj dík rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia na Západočeské univerzitě v Plzni podporovali.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Cajthaml	Jméno Jan	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Heller, CSc.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Rám podvozku pro tramvajový otočný podvozek s vedením dvojkolí kyvným ramenem a nápravou		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	65	TEXTOVÁ ČÁST	44	GRAFICKÁ ČÁST	21
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje rešerši v oblasti podvozků pro tramvajová vozidla. Následně byly vytvořeny tři koncepční návrhy podvozků, z nichž byl jeden vybrán a detailněji zpracován. Byl proveden výpočet sil zatěžující rám podvozku dle příslušných norem a s tím spojená pevnostní analýza metodou konečných prvků. Následně byl zpracován výrobní výkres rámu podvozku.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Podvozek tramvajového vozidla, rám podvozku tramvajového vozidla pevnostní analýza, MKP, NX, Solid Edge

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Cajthaml	Name Jan
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Heller, CSc.	Name Petr
INSTITUTION	ZČU – FST – KKS	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Bogie frame for tram bogie with wheel guide by swinging arm and axle.	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	65	TEXT PART	44	GRAPHICAL PART	21
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis contains a research in the field of boggies for tram vehicles. Three conceptual boggies designs were created, one of them was selected and detailed. The calculation of the forces loading the boggie frame was carried out according to the relevant standards and the associated strength analysis using the finite element method. The production drawing of the boggies frame was created.
KEY WORDS	Tram boggie with wheel guide by swinging arm and axle, boggie frame, finite element method, NX, Solid Edge

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů	3
1 Úvod	4
1.1 Historie kolejové dopravy ve městě	4
2 Městská tramvajová vozidla	5
3 Cíl diplomové práce	8
4 Podvozky tramvajových vozidel	8
4.1 Rámy podvozku kolejových vozidel	9
4.2 Vybrané tramvajové podvozky	10
4.2.1 Otočný podvozek KOMFORT	10
4.2.2 Otočný podvozek KOMFORT Plus	10
4.2.3 Otočný podvozek částečně nízkopodlažné tramvaje Avanto SF 70	11
4.2.4 Otočný podvozek tramvaje For City	12
4.2.5 Otočný podvozek Prose	14
4.2.6 Neotočný podvozek Flexx Urban 1000	15
4.2.7 Podvozek Alstom iXege	16
5 Vlastní návrhy podvozku	18
5.1 Koncepční varianta A	18
5.2 Koncepční varianta B	19
5.3 Koncepční varianta C	20
6 Výběr varianty	21
7 Konstrukční zpracování vybrané varianty	22
7.1 Vedení dvojkolí a primární vypružení	23
7.2 Sekundární vypružení, kolébka	24
7.2.1 Kolébka	25
7.3 Rám podvozku	27
7.4 Průjezdny průřez	30
7.5 Materiál rámu podvozku	31
8 Pevnostní kontrola rámu	32
8.1 Stanovení zatížení cestujících P_1 a P_2	33
8.2 Stanovení svislého zatížení podvozku	34
8.2.1 Výjimečné zatížení	35
8.2.2 Provozní zatížení	36
9 Pevnostní výpočet rámu metodou konečných prvků	38
9.1 Výpočetní model	39

9.2	Výjimečné zatížení – výhybka	44
9.3	Výjimečné zatížení – jízda v oblouku	47
9.4	Provozní zatížení – výhybka	48
9.5	Provozní zatížení – jízda v oblouku	49
9.6	Provozní zatížení – jízda po přímé trati.....	50
Závěr		52
Seznam použitých zdrojů		53
Seznam obrázků		55
Seznam tabulek.....		57

Přehled použitých zkratk a symbolů

ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
KKS	Katedra konstruování strojů
FST	Fakulta strojní
UITP	United Association of Public Transport (Mezinárodní svaz veřejné dopravy)
CTBU	Compact tapered bearing units (kompaktní kuželíkové ložiskové jednotky)
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
m_1	Hmotnost skříně vozidla
M_v	Hmotnost vozidla v provozním stavu
P_1, P_2	Hmotnosti cestujících v souladu s ČSN EN 15663
c	Poměrná zatížení kol příslušného podvozku vyjádřená v procentech
a_{xc}	Zrychlení ve směru osy x (podélné)
a_{yc}	Zrychlení ve směru osy y (příčné)
a_{ycc}	Zrychlení kolem osy y (odstředivé)
a_{zc}	Zrychlení ve směru osy z (svislé)
g	Tíhové zrychlení
n_{sed}	Počet sedících cestujících
n_{stoj}	Počet stojících cestujících
$m_{cestmax}$	Maximální hmotnost jednoho cestujícího
m_{cest}	Průměrná hmotnost jednoho cestujícího
$F_{zb_{výj}}$	Zatížení ve směru osy z (svislé) – výjimečné
$F_{zb_{pro}}$	Zatížení ve směru osy z (svislé) – provozní

Další symboly jsou vysvětleny přímo v textu, případně jsou veřejně známé.

1 Úvod

Kolejové vozidla městské hromadné dopravy se v dnešní době využívají zejména ve městech, které mají nad 100 000 obyvatel. Za jeden z jejich hlavních významů by se dalo označit ulehčení městům od přeplněných ulic zejména, co se týká dopravních špiček. Toto je umožněno tím, že se kolejová vozidla v městském provozu pohybují na vlastním tělese, což jim zajišťuje snadnější a rychlejší průjezd. Druhá nesporná výhoda je v oblasti přepravované kapacity osob, která závisí na velikosti a typu kolejového vozidla, ale je rozhodně efektivnější než u běžných osobních automobilů. Na obrázku 1 lze vidět studie záboru uličního prostoru v ulicích Štrasburku, kde je porovnané stejné množství populace v různých dopravních prostředcích, a to na stejné ulici.



Obrázek 1 Zábor uličního prostoru [3]

1.1 Historie kolejové dopravy ve městě

Při pohledu do historie kolejové dopravy ve městech lze nalézt již prvotní zmínku již v polovině 19. století – konkrétně kolem roku 1835 (New York), ale s dnešní tramvají mělo toto vozidlo jen málo společného. V té době se pro pohon tramvají využívalo koní, zatímco dálkové železniční dráhy využívaly již víceméně trakci parní. V Evropě se první tramvaje začaly objevovat také v roce 1835 v Paříži. V České republice byly první koněspřežné tramvaje v Brně roku 1869, ale již o 15 let později byli koně nahrazeny parní trakcí. V Praze vyjela první koněspřežná tramvaj až o pár let později, a to v roce 1875. V roce 1891 zrealizoval František Křižík první pražskou elektrickou tramvajovou dráhu. Trať v té době měřila pouhých 766 metrů s nejvyšší povolenou rychlostí 10 km/h. O pár let později však byla prodloužena na délku 1,4 km. [4] Rozchod kolejí zde byl stejný, jako je v dnešní době ve většině českých měst – normálních



Elektrická dráha inženýra Frant. Křižíka s Letné do Královské obory.
Přívodní křesla Ferd. Herčíka.

Obrázek 2 První elektrická tramvaj v Praze [4]

1435 mm. V Plzni díky rozvoji průmyslu bylo zapotřebí řešit dopravní situaci, a proto byly vypracovány první plány na elektrickou trať Františkem Křižíkem. Tyto plány byly ve spolupráci s tehdejší plzeňskou Škodovkou realizovány a roku 1899 byl provoz na trati zahájen.

První koněspřežné tramvaje s těmi dnešními neměly téměř nic společného. V dřívější době se na komfort a bezpečnost jízdy příliš nehledělo. Vozy byly bez oken s dřevěnými lavicemi a nastupování a vystupování většinou nebránili žádné zavírací dveře. Při pohledu na jednu z posledních koněspřežných tramvají v Praze (Obrázek 3) je patrný jeden rys, který v dnešní době řeší stále více výrobců moderních vozů. Tato tramvaj by se dala označit za nízkopodlažní. I když nejsou dostupné přesné rozměry této tramvaje, tak dle proporcí fotografie lze odhadnout, že kdyby v té době byly ve městech dnešní nástupní ostrůvky, tak by podlaha této tramvaje byla téměř zároveň.



Obrázek 3 Konešpřežná tramvaj – Praha r. 1905 [10]

2 Městská tramvajová vozidla

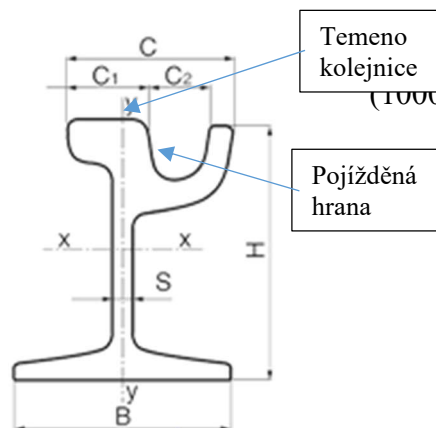
Městská tramvajová vozidla (dále jen tramvaj) prošla od těchto koněspřežných pohonů dnešní podoby dlouholetým vývojem. Dle UITP lze tramvajové vozidlo charakterizovat přepravní kapacitou do 15 000 míst/hod, maximální rychlostí obvykle okolo 60÷70 km/h a pohybují se po kolejové trati, která je obvykle v úrovni vozovky. [3] Řízení takového vozidla je v dnešní době stále ještě prováděno řidičem a uliční světelnou signalizací, současně však probíhá vývoj autonomního řízení. Nicméně toto zatím vyhláška v České republice nedovoluje.

Z dalších hledisek můžeme tramvajová vozidla dělit dle jejich koncepce na:

- dvounápravová – skříň tramvaje nesena na dvou nápravách uložených v rámech – tzv. rámová
- čtyřnápravová – skříň tramvaje nesena na dvou podvozcích, z nichž každý má 2 nápravy – tzv. podvozková
- kloubová – jednotlivé vozy jsou spojeny pomocí kloubu
- vlečené vozy

Tramvajové vozidlo se pohybuje po žlábkových kolejnicích, které mají tři nejčastější rozchody – úzký mm); normální (1435 mm) a široký (1520 mm), přičemž v České republice se nejčastěji vyskytuje rozchod normální. Nicméně se lze setkat i jiné s dalšími netradičními rozchody.

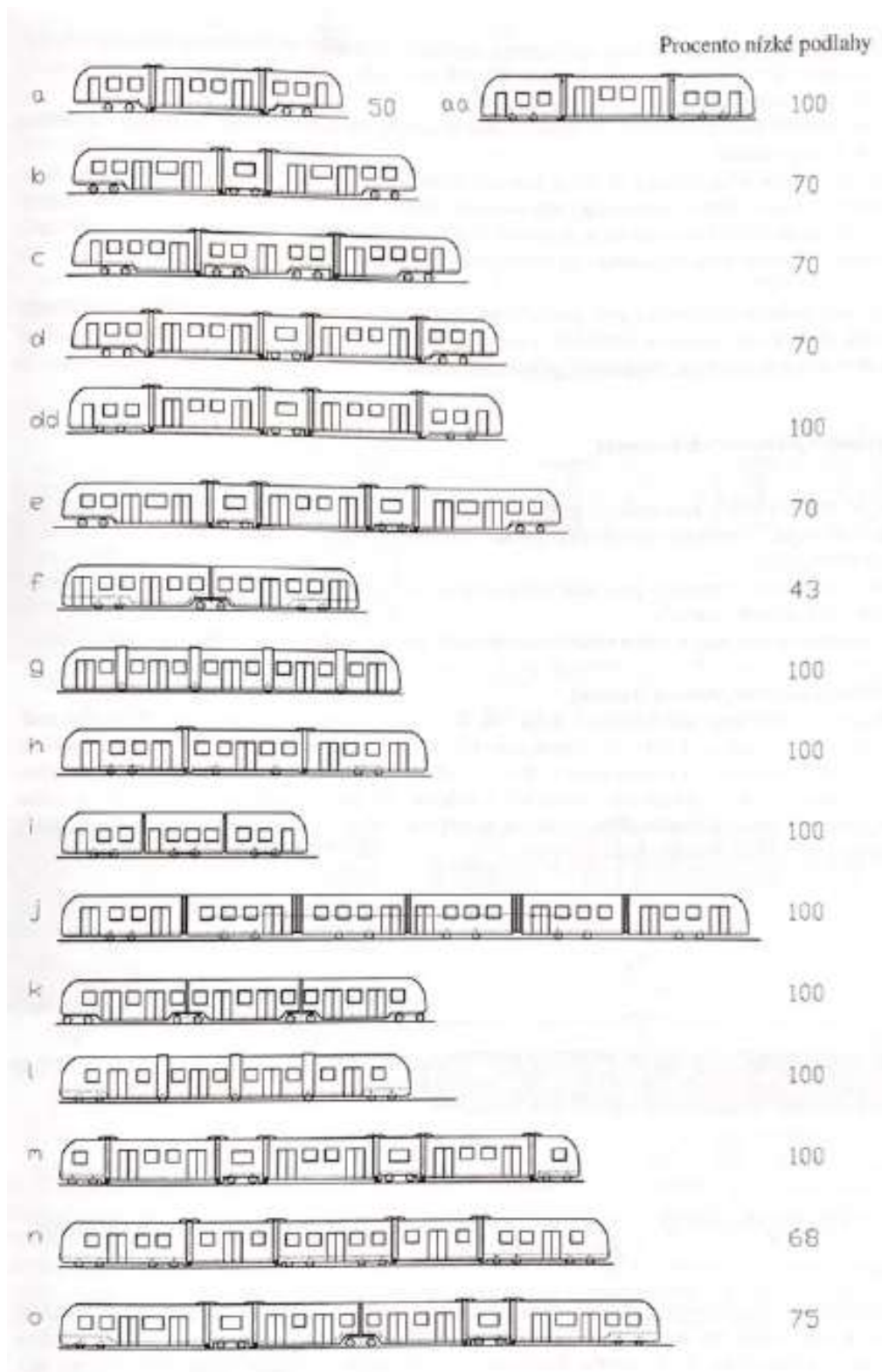
Pojem rozchod koleje vyjadřuje vzdálenost mezi pojížděnými hranami kolejnice, měřenou 14 mm pod temenem kolejnice.



Obrázek 4 Žlábková kolejnice [11]

Jak již bylo nastíněno, jednou z podstatných vlastností, které výrobci tramvajových vozidel v poslední době věnují značnou pozornost, je výška podlahy vozidla nad temenem kolejnice. Toto kritérium je důležité zejména z důvodu rychlé výměny cestujících v tramvaji. Kdy při nízké podlaze není třeba překonávat vstupní schody a tím prodlužovat nastupování a vystupování. Další výhodou této vlastnosti pocítí zejména lidé se sníženou pohyblivostí, často pro ně může být problémem překonat vstupní schody do vozidla.

Výška podlahy lze rozdělit na vysokou (nad 800 mm); střední (500 mm); nízkou (350 mm) a velmi nízkou (150 mm). Často však není výška podlahy po celé délce vozidla stejná, a to zejména kvůli podvozkům, které jsou často při konstrukci nízkopodlažního vozidla problematické. Z tohoto důvodu se přichází s hodnotou – **procento nízké podlahy**.^[3] Jak název napovídá, tato hodnota charakterizuje, v jakém procentu z celkové délky vozidla se nachází nízká podlaha. Koncepce výrobců vozidel z hlediska co největšího procenta nízké podlahy lze vidět na obrázku 5.



Obrázek 5 Procento nízké podlahy [3]

Koncepce s označením *a* je tříčlánkové tramvajové vozidlo s neotočnými podvozky obvyklé koncepce a jedním neseným článkem. [3] Označení *h* je tříčlánková tramvaj se dvěma krajními články na otočných podvozcích, střední článek na dvou jednonápravových podvozcích. [3] Označení *k* je tříčlánková tramvaj se dvěma otočnými podvozky pod čelem a dvěma otočnými podvozky pod kloubovým spojením článků. [3]

3 Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh rámu podvozku pro tramvajový otočný podvozek s vedením dvojkolí kyvným ramenem a nápravou. V rámci práce je řešen rám podvozku z hlediska rozměrového, materiálového, svařování a obrábění. Dále je proveden pevnostní výpočet rámu podvozku metodou MKP, a to vše s respektováním příslušných norem. Následně je tento výpočet zhodnocen.

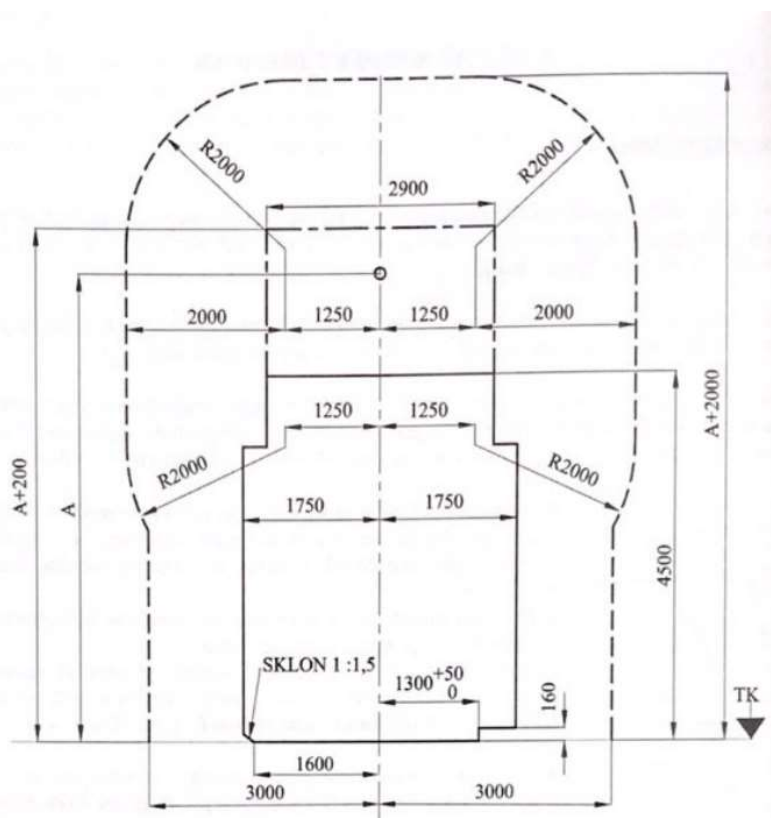
Práce je vytvořena ve spolupráci s firmou Škoda Transportation a. s.

4 Podvozky tramvajových vozidel

Podvozek kolejového vozidla je konstrukční sestava, která slouží k vedení a nesení skříně vozidla v kolejové trati. Podvozek se vyznačuje samostatným rámem, který má jistou pohyblivost vzhledem ke spodku vozidlové skříně. Podvozky, které jsou bez trakčního zařízení se nazývají podvozky běžné. Pokud na podvozku je trakční zařízení sloužící k pohonu dvojkolí, pak se jedná o podvozek trakční.

Na podvozky tramvajových vozidel jsou obvykle kladeny ještě přísnější požadavky než na podvozky běžných železničních vozidel. Tramvajové vozidla se pohybují po kolejových obloucích menších poloměrů (20 m a menší) a větších traťových sklonech. Obecně lze tedy říct, že tramvajové podvozky jsou menších rozměrů – rozvor u nich bývá obvykle 1800 ÷ 1900 mm. Průměr dvojkolí nepřesahuje 700 mm u běžných tramvají. Pokud jde o nízkopodlažní, pak jsou i dvojkolí menší. [3]

Při navrhování tramvajových podvozků je důležité dbát norem pro obrys tramvajového vozidla – ČSN 28 0337, ze kterého nesmí žádná část obrysu tramvajového vozidla vyčnívat (viz obrázek 5). Další důležitou normou je ČSN 28 1300 pro Tramvajová vozidla – technické požadavky a zkoušky.



Obrázek 6 Průjezdný průřez pro jednokolejnou tramvajovou trať [3]

Podvozky lze dále dělit dle stupňů volnosti pod skříní v horizontálním směru na otočný (pod skříní vozidla zcela volně otočný) nebo na neotočný, který se může vychylovat o maximálně $1^{\circ} \div 2^{\circ}$.

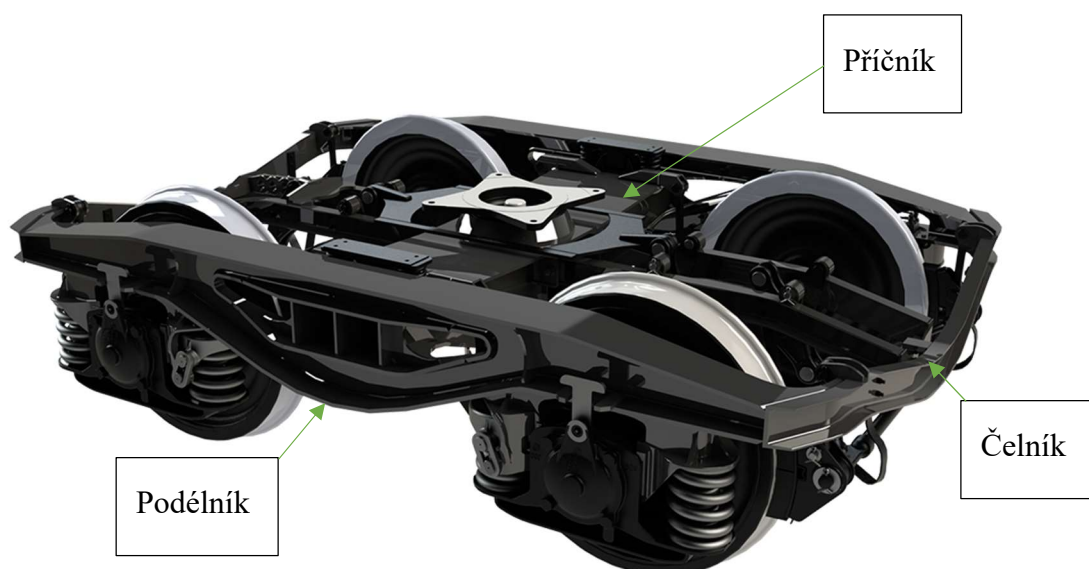
4.1 Rámy podvozku kolejových vozidel

Rám podvozku je jednou ze základních částí podvozku kolejového vozidla. Jedná se obvykle o tuhou nosníkovou konstrukci, která je uložena přes primární vypružení a nápravová ložiska na dvojkolí. Na rámu je poté uložena skříně kolejového vozidla, a to buď přímo nebo přes sekundární vypružení podvozku. Další prvky, které obvykle rám podvozku nese, jsou trakční motor, brzdy, kolejnicové brzdy, zařízení pro mazání okolků atd.

Rám musí zajistit přenos tažných sil. Obvykle se skládá z podélníků, příčníků a čelníků, které však nemusí být součástí rámu.

Rámy lze rozdělit z mnoha hledisek například:

dle konstrukčního uspořádání	- Rám tuhý - Rám poddajný
dle vnějšího tvaru	- uzavřený - otevřený - polouzavřený
dle technologie výroby	- svařovaný - odlévaný - kombinovaný



Obrázek 7 Podvozek Y25 [7]

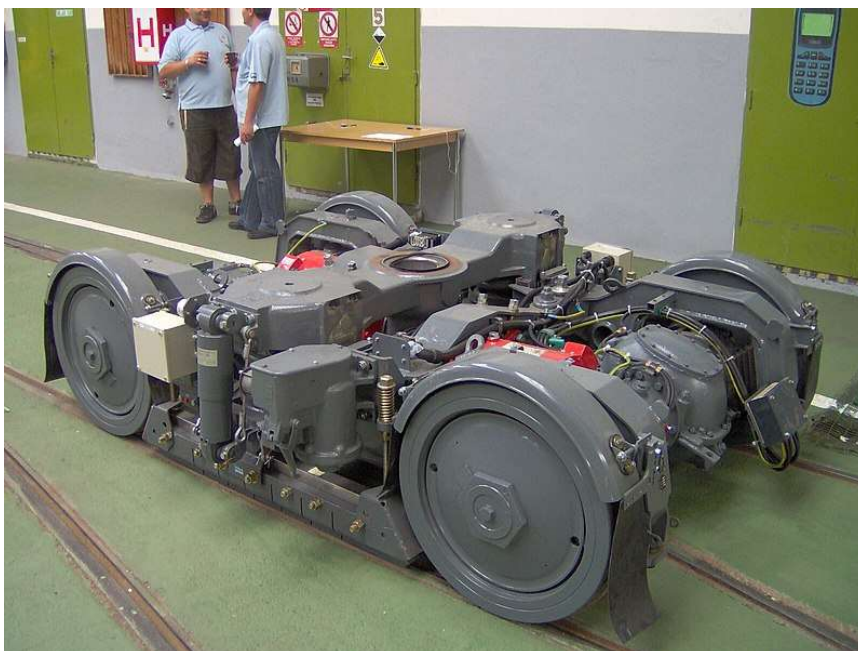
Na obrázku 7 lze vidět podvozek nákladního kolejového vozidla s označením **Y25 Ls(s)d1**. [7] Tento podvozek má tuhý, uzavřený a svařovaný rám s primárním vypružením vinutými pružinami a rozsochovým vedením.

4.2 Vybrané tramvajové podvozky

V následující kapitole je výběr několika druhů tramvajových podvozků vyráběných v dnešní době. U každého z podvozků jsou zmíněny klíčové parametry. Dost často je však problém získat detailnější informace protože každý z výrobců si pečlivě hlídá své „know-how“.

4.2.1 Otočný podvozek KOMFORT

Tento tramvajový podvozek je nástupcem dřívějšího tramvajového podvozku ČKD Tatra, jehož koncepce byla využita při vývoji. Primární vypružení mezi rámem podvozku a ložiskovou skříní zde tvoří pryžokovové Meggi pružiny. Sekundární vypružení je tvořeno šroubovitými pružinami, které jsou osazeny kolébkou s kulovou tornou. Vertikální pohyby kolébky jsou po stranách podvozku tlumeny tlumiči. Přenos tažných sil mezi kolébkou a rámem podvozku je pomocí kluzátek. Samotný rám podvozku je tvořen dvěma půlramy, které jsou spojeny pomocí dvou silentbloků. Průměr kola je 700 mm, což zajišťuje jejich menší opotřebení. Kolo je dále vypruženo pryží. Rozchod tohoto podvozku je normální – 1435 mm a rozvor – 1900 mm. [3]



Obrázek 8 Podvozek KOMFORT [5]

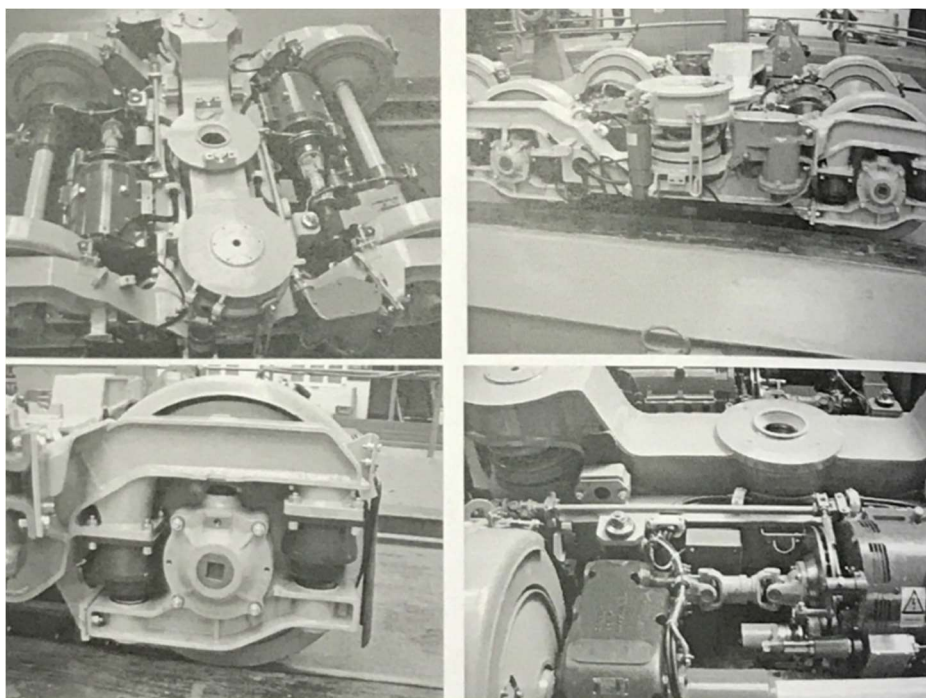
4.2.2 Otočný podvozek KOMFORT Plus

Jedná se o částečně nízkopodlažný tramvajový podvozek. To znamená, že v oblasti podvozku je nutno zvýšit podlahu o přibližně jeden schod vysoký cca 180 mm. Kola jsou zde shodná, co do průměru, tak i jejich vlastního vypružení s koly podvozku KOMFORT. Svařovaný otevřený rám tohoto podvozku se skládá ze dvou podélníků, které jsou na středu snížené. Ve snížené části je připojen příčník. [3]

Primární vypružení tvoří pryžokovové válcové silentbloky. Sekundární vypružení tvoří duplexní šroubové pružiny s paralelními tlumiči. Na sekundárním vypružení je zde také kolébka, ve které je uloženo pouzdro pro otočný čep. [3]

Trakční motor je zde umístěn rovnoběžně s osou dvojkolí a je upevněn na příčníku podvozku. Hřídel trakčního motoru je osazen brzdovým kotoučem a dále pokračuje kloubový hřídel do dvoustupňové převodovky umístěné na závěsce k příčníku. Na podélníku podvozku je umístěna také kolejnicová brzda. [3]

Přenos tažných sil je zabezpečen pomocí pružných narážek, které lze vidět na obrázku 11 vpravo dole. Rozchod a rozvor podvozku je zde stejný jako u podvozku KOMFORT.



Obrázek 9 Podvozek KOMFORT Plus [3]

4.2.3 Otočný podvozek částečně nízkopodlažné tramvaje Avanto SF 70

Tento podvozek je součástí nízkopodlažních tramvají (70 %). Jedná se o otočný konvenční podvozek, který má možnost natočení o 12°. Průměr kola je 660 mm. [3]

Primární vypružení tohoto podvozku tvoří pryžokovové pružiny Meggi. Sekundární vypružení je tvořeno dvěma páry šroubových pružin. Na sekundárním vypružení se nachází kolébka s otvorem pro otočný čep. Podélné síly mezi kolébkou a rámem podvozku jsou přenášeny za pomoci táhel. Skříň vozidla je spojena s podvozkem pomocí otočného čepu a dále leží na kluznicích. Tyto kluznice slouží ke zvýšení stability ve vyšších rychlostech, protože tento podvozek je konstruován až na rychlost 106 km/h. [3]

Rám tohoto podvozku je svařovaný z plechů a odlitků. Na tento rám jsou připevněny čelníky přes pryžové elementy. Tyto čelníky slouží především jako dodatečná podpora pro trakční jednotku. [3]



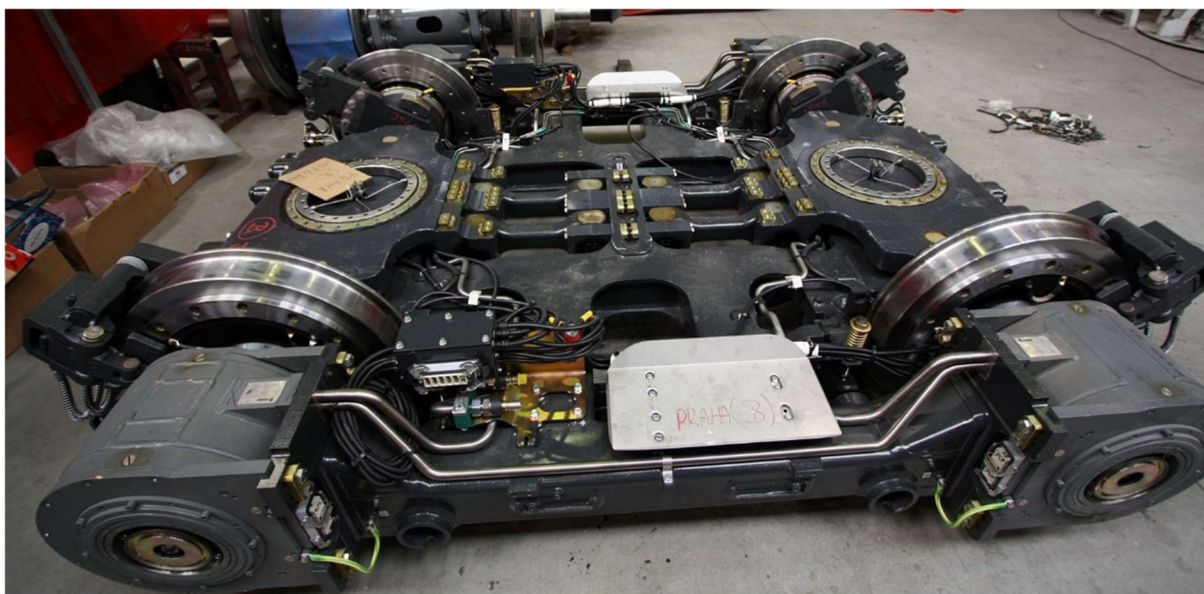
Obrázek 10 Podvozek tramvaje Avanto SF 70 [3]

Pohon z trakčního motoru je zabezpečen pomocí duté kloubové hřídele s čelní převodovkou a klínové pružné spojky. Toto konstrukční zpracování má za následek plné vypružení trakčního motoru. Na kloubové hřídeli jsou umístěny až dva brzdové kotouče a společně s kolejnicovou brzdou tvoří brzdou soustavu podvozku. [3]

4.2.4 Otočný podvozek tramvaje For City

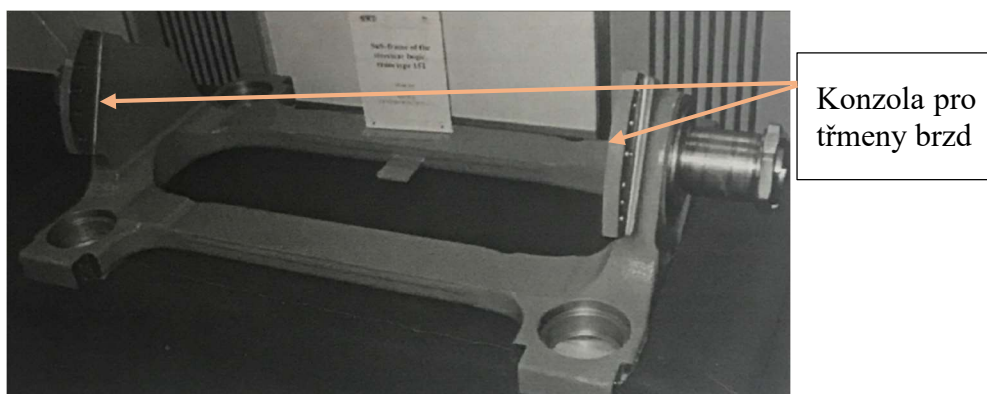
Tramvajové vozidlo For City od firmy Škoda Transportation je koncipováno jako tramvaj na schématickém obrázku 5 – k. V této koncepci je využit jeden podvozek mezi dvěma články. Tento podvozek má tudíž charakter Jakobsova podvozku. [3]

Tento typ podvozku je určen pro 100% nízkopodlažní tramvaj. Jelikož se jedná o otočný podvozek, tak kola při jízdě obloukem vykonávají příčně otáčivý pohyb. Na tento pohyb je třeba brát ohled při konstrukci skříně, zejména co se týče šířky uličky nad podvozky. [3]



Obrázek 11 Podvozek tramvaje For City [6]

Tento podvozek je svou koncepcí zcela netradiční. Jak lze vidět z obrázku 13, na podvozku se nenachází náprava, nýbrž nápravnice s válcovými částmi pro nasazení kol. Přímo na kolech jsou umístěny kotouče brzd, jejichž třmeny jsou umístěny na konzolách. Na nápravnici se dále nachází vybrání pro primární vypružení, které je tvořeno pryžokovovými silentbloky. Sekundární vypružení s kolébkou je osazeno ložiskem pro upevnění skříně. Pro přenos podélných sil mezi kolébkou a rámem podvozku slouží pár ojnicek, který zároveň zvyšuje i torzní stabilitu tramvaje.[3]



Obrázek 12 Nápravnice podvozku For City [3]

Trakční motory jsou synchronní s permanentními magnety a jsou umístěny na každém kole. Tyto motory jsou vodou chlazené a z toho důvodu mají malé rozměry. Jsou přišroubované na rám podvozku, tudíž jsou plně odpružené. [3]

Pro krajní články této tramvaje se využívá obdobných podvozků jen s tím rozdílem, že u krajních článků nejsou potřeba dvě ložiska, ale pouze jedno. Takový podvozek lze vidět na obrázku 15.



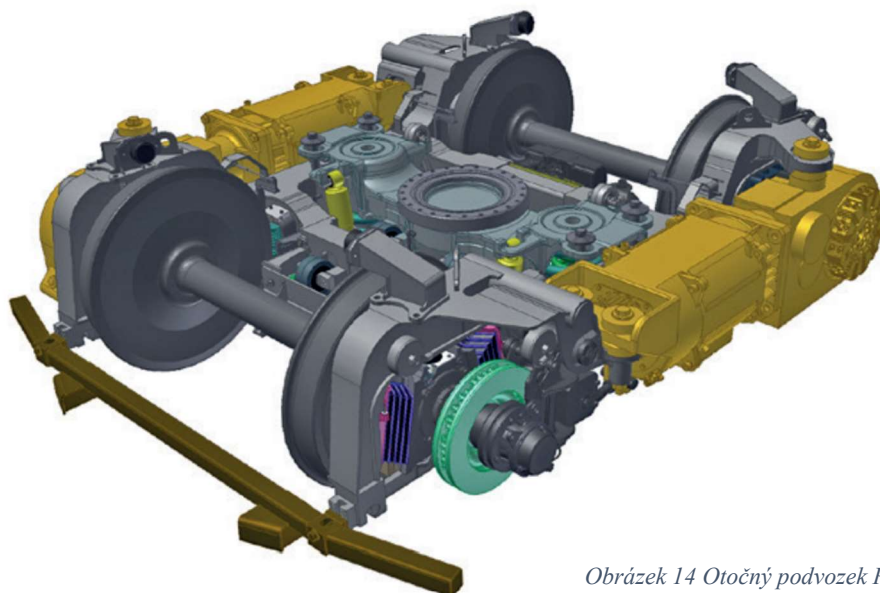
Obrázek 13 Podvozek tramvaje For City pro krajní článek [6]

Na tomto obrázku lze lépe vidět rám podvozku. Tento rám je vnitřní svařovaný z plechů a jsou na něm umístěny zmiňované trakční motory. Na krajním podvozku lze nalézt jen jednu kolébku.

4.2.5 Otočný podvozek Prose

Tento podvozek vyvinula finská firma Prose. Firma dostala požadavek na vytvoření nízkopodlažního podvozku pro finské hlavní město Helsinky. Vzhledem k této severské zemi bylo třeba brát ohledy na klimatické podmínky, protože se zde teplota často pohybuje hluboko pod bodem mrazu. Dle informací, které bylo možno nalézt na stránkách firmy [15], bylo při konstruování podvozku počítáno až s -35°C .

Firma Prose tedy vytvořila úzkorozchodný podvozek – rozchod kolejí 1000 mm. Na následujícím obrázku lze tento podvozek vidět.



Obrázek 14 Otočný podvozek Prose [15]

Základem tohoto tramvajového podvozku je svařovaný rám dvou podélníků a dvou příčníků, mezi kterými je umístěna kolébka s ložiskem, které umožňuje otáčení tohoto podvozku vůči skříni vozidla. Vedení dvojkolí a primární vypružení podvozku je zde díky vhodnému tvaru podélníků řešeno Meggi pryžokovovou pružinou.

Na vnější straně podélníků jsou umístěny trakční motory s převodovkou a brzdou. Další dostupné informace lze přehledně vidět v následující tabulce:

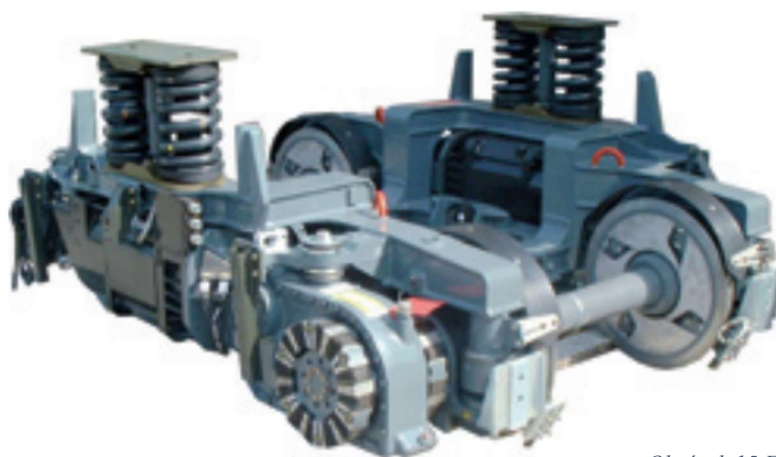
Počet vyrobených podvozků	80 kusů
V provozu od roku	2014
Rozchod koleje	1000 mm
Maximální rychlost	80 km/h
Zatížení nápravy	9 t
Výkon motoru	2 x 65 kW

Tabulka 1 Podvozek Prose [15]

4.2.6 Neotočný podvozek Flexx Urban 1000

Tento podvozek byl navržen s ohledem na nízkou podlahu tramvajového vozidla. Firmou Bombardier došlo k vytvoření podvozku, který je navržen pro 100% nízkopodlažné tramvajové vozidlo. Výška podvozku činí pouhých 310 mm.

Na tomto podvozku se nachází klasická náprava s průměrem dvojkolí 570 mm. Samotná kola jsou vyrobena jako skládaná, takže mají v sobě integrované tlumiče hluku. Primární vypružení a vedení dvojkolí je zde provedeno pryžovými bloky. Pro sekundární vypružení byly zvoleny flexicoil pružiny, která jsou doplněna o tlumiče.



Obrázek 15 Flexx Urban 1000 [16]

Rám podvozku je vytvořen jako svařenec z plechů. Jedná se o vnější rám, který má příčníky i podélníky skříňového typu. Trakční motory s převodovkou a brzdou jsou na vnější straně podélníku podvozku. Další důležité a dostupné technické parametry lze vidět v následující tabulce.

Rozchod koleje	900 / 1000 / 1435 mm
Nízkopodlažnost	100%
Rozvor podvozku	1850 mm
Průměr kola	570 mm
Maximální rychlost	70 km/h
Hmotnost	4,7 t
Zatížení nápravy	10 t
Výška podvozku v místě příčníku	310 mm
Výkon motoru	2 x 100 kW

Tabulka 2 Technické parametry podvozku Flexx Urban 1000[16]

Z tohoto typu podvozku výrobce Bombardier následně vytvořil i nástupce Flexx Urban 2000 a Flexx Urban 2500. Na následujícím obrázku je možné vidět klíčové parametry těchto podvozků i samotné podvozky.

FLEXX Urban 2000

FLEXX Urban 2500



	FLEXX Urban 2000	FLEXX Urban 2500
Rozchod koleje	1,000 / 1,435 mm	1,435 mm
Nízkopodlažnost	70% low-floor	70% low-floor
Rozvor podvozku	1,800 mm	1,800 mm
Průměr dvojkolí	600 mm	630 - 700 mm
Max. rychlost	70 km/h	100 km/h
Hmotnost (netrakční)	4.5 (3.0) t	4.8 (3.2) t
Zatížení nápravy	9.25 t	11 t
Výška podvozku	350 mm	580 mm
Výkon motoru	95-125 kW	2x 120-140 kW

Obrázek 16 Podvozky Flexx Urban 2000 a 2500 [16]

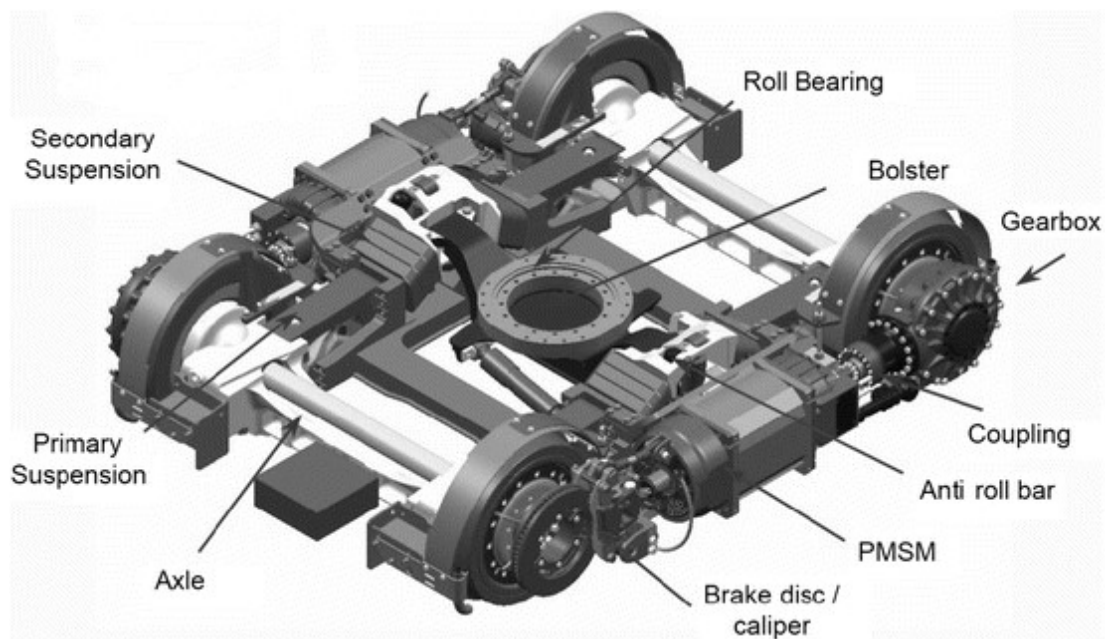
Oba tyto nástupci jsou již konstruovány jako otočné podvozky, které jsou osazeny kolébkou vybavenou otvorem pro otočný čep.

4.2.7 Podvozek Alstom iXege

Tento podvozek byl vytvořen firmou Alstom pro své modulární tramvaje Citadis. Jedná se o 100% nízkopodlažnou tramvaj, kde je možnost vytvoření tří až devíti článkového vozu.

Samotný podvozek má vnitřní svařovaný rám, který je poměrně kompaktních rozměrů a skládá se ze dvou podélníků a dvou příčníků. Na primární vypružení tohoto podvozku byly využity pryžokovové pružiny, které byly využity i v sekundárním vypružení. Kolébka je zde vytvořena také malých rozměrů a je prohnuta směrem k temenu kolejnice, tak aby byl podvozek co nejvíce nízký. Na kolébce je umístěno ložisko pro uložení skříně, takže se jedná o podvozek otočný. Trakční motor s převodovkou a brzdou je umístěn na vnější straně podvozku.

Nápravy na tomto podvozku jsou vedeny v kyvných ramenech, které jsou díky vnitřnímu rámu umístěny mezi koly.



Obrázek 17 Podvozek iXege Alstom[17]

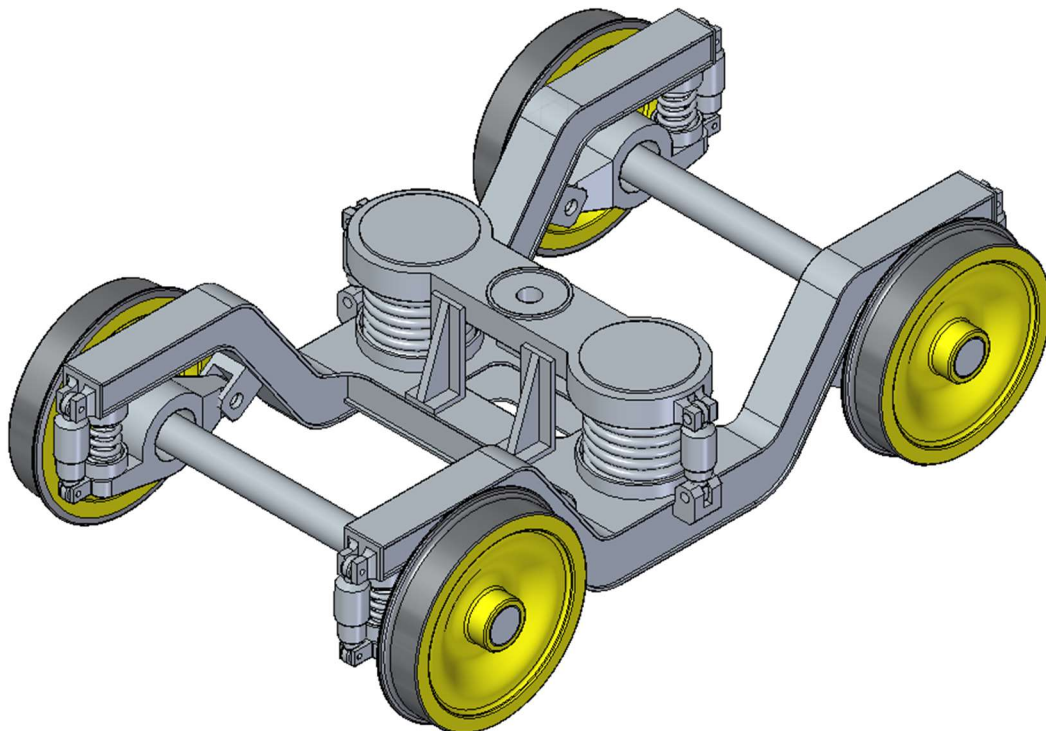
5 Vlastní návrhy podvozku

Na základě rešerše různých typů podvozků byly navrženy tři koncepce tramvajového podvozku. Tyto koncepce byly navrženy s ohledem na zadání této diplomové práce, což znamená, že je nutno mít v rámci podvozku řešeno vedení dvojkolí s nápravou za pomoci kyvného ramene. Ostatní parametry podvozku již zadány nebyly, tudíž bylo možno je volit. Pozornost při jednotlivých návrzích byla věnována hlavně tvaru rámu a kolébky, následně i návrhu primárního a sekundárního vypružení.

5.1 Koncepční varianta A

Při tvorbě této koncepční varianty se vycházelo z klasické koncepce podvozku kolejového vozidla, při které je použito vedení dvojkolí za pomoci kyvného ramene. Je zde použit vnitřní rám skříňového typu. Tento rám je otevřený a svařovaný z plechů. Dva svařené podélníky jsou spojeny za pomoci příčnicku, na kterém je umístěno sekundární vypružení za pomoci vinutých šroubových pružin. Na sekundárním vypružení je umístěna kolébka, která je ještě opatřena tlumiči. Přenos tažných sil mezi kolébkou a rámem podvozku je zde řešen za pomoci narážek. V kolébce je vytvořen otvor pro otočný čep, který by byl součástí skříně kolejového vozidla.

Kyvná ramena (s ložiskovým domkem) jsou díky vnitřnímu rámu umístěny mezi koly. Primární vypružení je řešeno také za pomoci vinutých šroubových pružin doplněných o tlumiče pohybů.



Obrázek 18 Koncepční varianta A

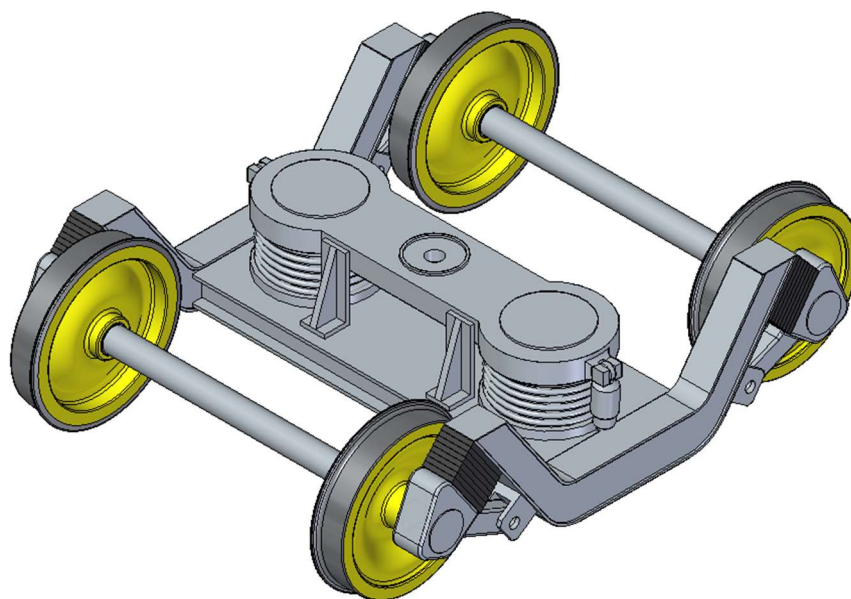
Na tomto podvozku jsou použita kola o průměru 700 mm. Rozchod dvojkolí je zde normální 1435 mm. Rozvor tohoto podvozku je 1900 mm. Tato koncepce podvozku však nerespektuje již dříve zmiňovaný trend ve vývoji tramvajových vozidel, tím trendem je

nízkopodlažnost. V oblasti podvozku by bylo nutné ve skříni vozidla vytvořit schody, aby bylo možné, uvnitř tramvajového vozidla, tento podvozek překonat.

Podvozek by bylo nutné ještě osadit motorem, který by mohl být vně rámu na případně do vytvořených konzolách.

5.2 Koncepční varianta B

Druhá koncepční varianta pracovala v počátku s předchozí variantou. A to na základě myšlenky, že v dnešní době je jeden z důrazů také kladen na snižování hmotnosti v oblasti kolejových vozidel, tudíž i v oblasti podvozků. Jako důsledek tohoto byl ve variantě B podvozek zkrácen a vinuté pružiny s tlumiči byly nahrazeny pryžovými bloky.



Obrázek 19 Koncepční varianta B

Rozměrové parametry zůstaly stejné jako u předchozí koncepční varianty, tedy průměr kola 700 mm, rozchod dvojkolí 1435 mm a rozvor 1900 mm. Rám podvozku zde byl zkrácen o konce a tím byla snížena jeho hmotnost.

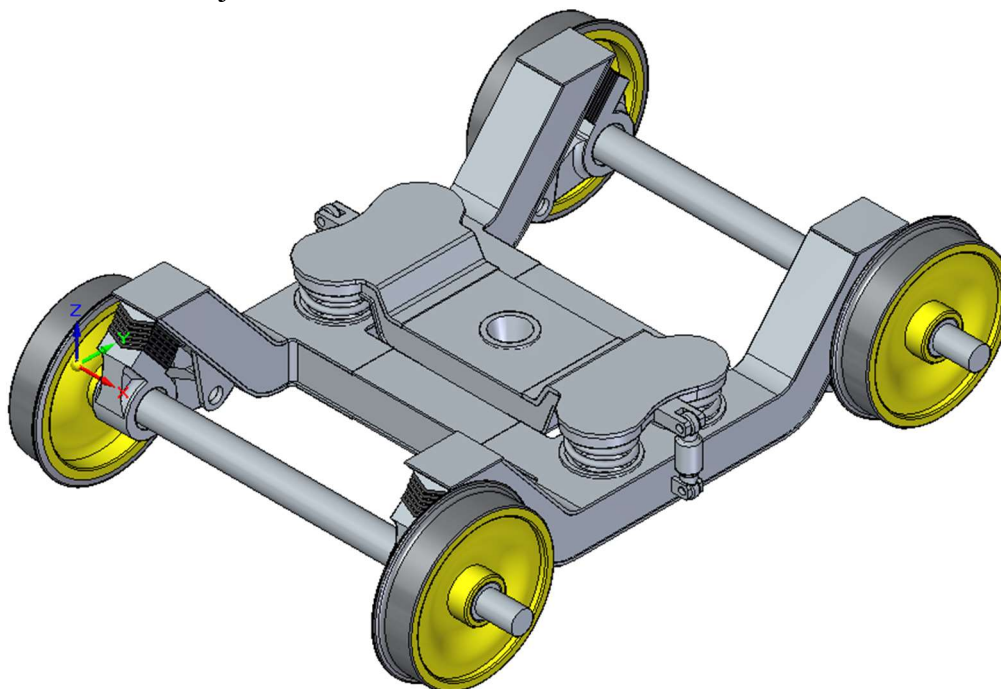
Primární vypružení je zde tedy pryžovými bloky, které zároveň plní i tlumící funkci. Rám podvozku je vnější a je to svařovaná skříňová konstrukce z plechů. Na příčnicku podvozku je umístěna taktéž kolébka, která je vypružena vinutými pružinami a její pohyby jsou po stranách tlumeny tlumiči. Přenos tažných sil mezi kolébkou a rámem podvozku je zde za pomoci narážek. V kolébce je umístěn otvor pro otočný čep, který je součástí skříně vozidla.

Na tomto podvozku došlo k úspoře hmoty; nicméně zde není vyřešena ona nízkopodlažnost kolejového vozidla. Z důvodu kolébky umístěné na příčnicku by bylo nutné opět ve vozidle vytvořit schody k překonání podvozku.

5.3 Koncepční varianta C

Poslední z variant je zaměřena zejména na nízkopodlažnost podvozku a následně tedy i celého tramvajového vozidla. V této variantě bylo vzato pár klíčových vlastností z obou již dříve zmíněných variant.

Vzhledem k tomu, že podvozek musí mít vedení dvojkolí a nápravy za pomoci kyvného ramene, tak není možno vytvořit podvozek, který by následně splňoval požadavky na 100 % nízkopodlažnost, tak jako poslední podvozek zmiňovaný v rešerši. Nicméně, v tomto koncepčním návrhu je rám podvozku vnitřní, otevřený, svařovaný z plechů. V příčniku rámu podvozku byl vytvořen otvor, do kterého byla zapuštěna kolébka, čímž se následně sníží i podlaha ve skříni tramvajového vozidla.

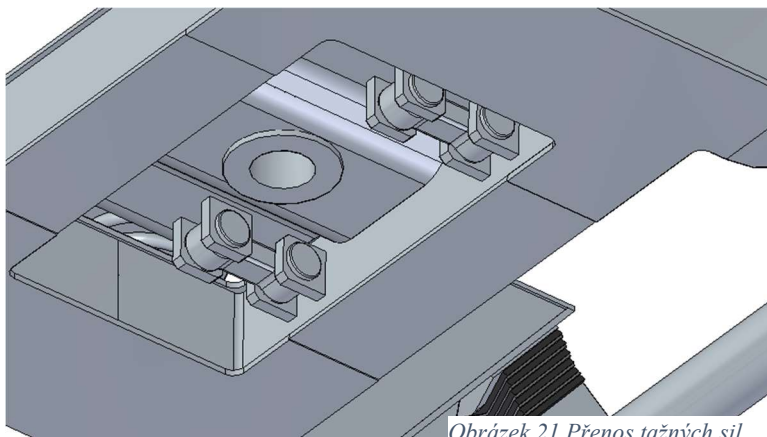


Obrázek 20 Koncepční varianta C

Celý tvar kolébky byl nakonstruován jako prohnutý směrem dolů, čímž se kolébka dostala na úroveň nápravy. Tudiž byla vytvořena maximální dosažitelná úroveň nízkopodlažnosti při daném zadání. V kolébce je otvor pro otočný čep.

Sekundární vypružení podvozku je tvořeno vinutými pružinami a pohyby kolébky jsou po straně tlumeny tlumiči. Primární vypružení je tvořeno šípovými meggi pružinami. Přenos tažných sil mezi kolébkou a rámem podvozku je za pomoci ojníček ze spodní strany kolébky.

Aby byl podvozek co možná nejvíce nízký, byly v této variantě zmenšeny i průměry kol na 600 mm. Podvozek je navržen pro rozchod koleje – normální - 1435 mm a rozvor podvozku je 1900 mm.



Obrázek 21 Přenos tažných sil

6 Výběr varianty

Varianta, která bude dále detailněji zpracovávána, bude vybrána na základě porovnávací analýzy. V porovnávací analýze jsou zmíněny klíčové vlastnosti podvozku a následně jsou pro jednotlivé varianty obodovány na škále od 0 do 5, přičemž 0 bodů je nejhorší a 5 bodů je nejlepší možné hodnocení. Ideální podvozek poté má u každé z vlastností vždy nejlepší hodnocení – 5. Zároveň jednotlivá kritéria mají stanovenou svoji váhu, která odráží jejich důležitost. Tyto váhy jsou opět stanoveny na škále od 1 do 5, přičemž váha 5 je nejvíce důležitá vlastnost a váha 1 je naopak méně důležitá. Hodnocení jednotlivých variant bude následně vyhodnoceno za pomoci váženého průměru a porovnáno s výsledkem ideálního podvozku. Ta z variant, která se bude nejvíce blížit optimu, bude dále detailněji zpracovávána.

Klíčové vlastnosti a jejich váhy, bodování lze vidět v následující tabulce:

Vlastnost	Váha	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Ideální podvozek
Nízkopodlažnost	5	2	2	5	5
Technologičnost konstrukce	3	3	4	3	5
Hmotnost	5	1	3	5	5
Cena za materiál	5	2	3	4	5
Průjezd obloukem	3	2	2	3	5
Jízdní komfort	4	4	2	3	5
Hodnocení	$\Sigma=25$	2,24	2,64	4,00	5,00
Pořadí		3	2	1	Ideál

Tabulka 3 Rozhodovací analýza

Mezi vlastnosti byla v první řadě vybrána nízkopodlažnost, která je jedním z důležitých kritérií mezi tramvajovými vozidly (viz kapitola 2) a ve velké míře je ovlivněna podvozkem vozidla. Dalším z hledisek byla zvolena technologičnost konstrukce, pod níž lze rozumět hlavně náročnost na výrobu. Hmotnost a cena za materiál byla taktéž ohodnocena váhou 5 – důležitá vlastnost. Další dvě hlediska jsou jízdní komfort a průjezd obloukem, kdy podvozek který má menší rozvor projede obloukem lépe než podvozek s větším rozvorem.

Na základě porovnávací analýzy vyšla jako nejlepší koncepční varianta C. To zejména díky hodnocení při vlastnosti nízkopodlažnosti. U této jediné koncepční varianty je tato problematika více řešena. Další z výjimečných hodnoceních lze vidět u vlastnosti hmotnosti, neboť tento podvozek je krátký, a zároveň je tvořen dvěma úzkými příčnicí. Z hlediska jízdního komfortu však lépe vyšel podvozek koncepční varianty A, kde je primární vypružení tvořeno šroubovitými pružinami, což je pro jízdní komfort příjemnější než pryžokovové bloky, které nedokážou tak dobře tlumit nerovnosti.

Na základě této rozhodovací analýzy bude dále zpracováván podvozek, respektive rám podvozku, z koncepční varianty C.

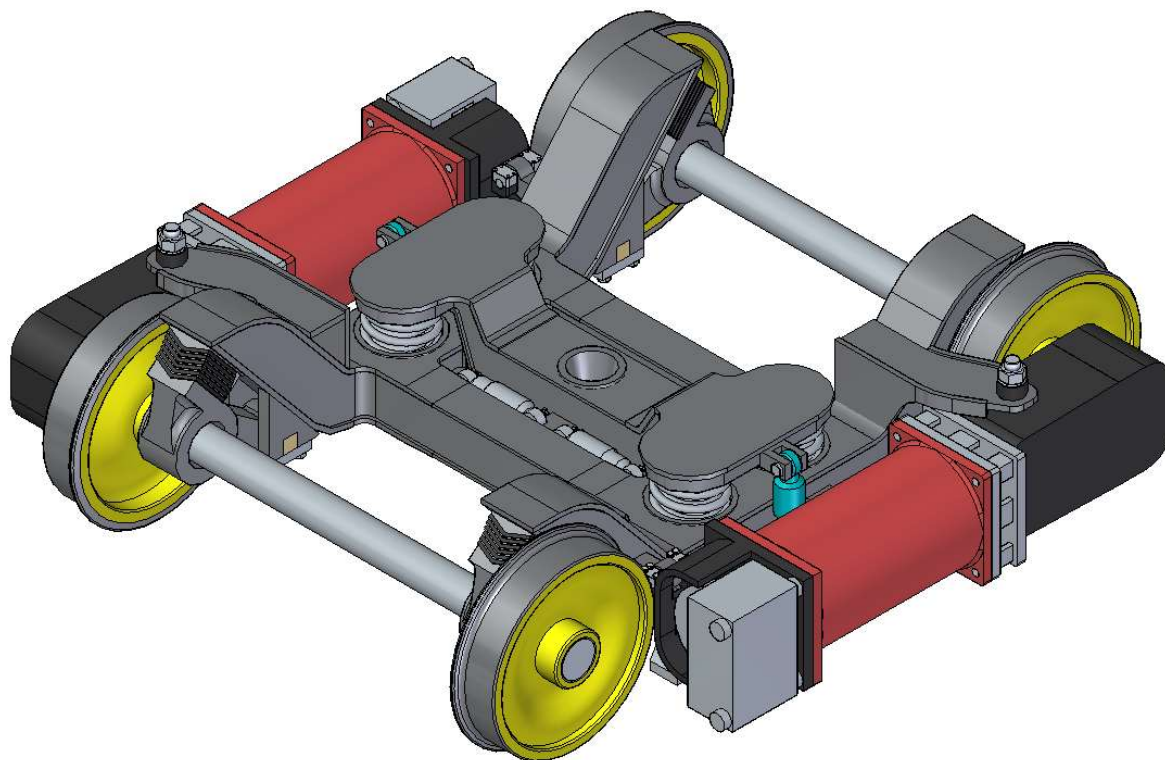
7 Konstrukční zpracování vybrané varianty

Pro bližší a důkladnější konstrukční zpracování byla, na základě porovnávací analýzy, zvolena koncepční varianta C. Z této koncepční varianty tudíž byla přebrána většina rozměrů, které lze přehledně vidět v tabulce 2

<i>Rozchod koleje</i>	1435 mm
<i>Rozvor podvozku</i>	1800 mm
<i>Výška podvozku od temena kolejnice</i>	645 mm
<i>Průměr dvojkolí</i>	600 mm
<i>Hmotnost podvozku</i>	3 650 kg

Tabulka 4 Základní rozměry navrženého podvozku

Na následujícím obrázku lze vidět pohled na detailněji zpracovaný tramvajový podvozek v CAD softwaru SolidEdge.



Obrázek 22 Vlastní návrh podvozku

Cílem této diplomové práce bylo primárně navrhnout rám podvozku, tudíž některé ze součástí samotného podvozku nejsou do detailu navrženy. Prvky, které nejsou do detailu řešeny, mají však navrženo alespoň uchycení jednotlivých částí k rámu podvozku.

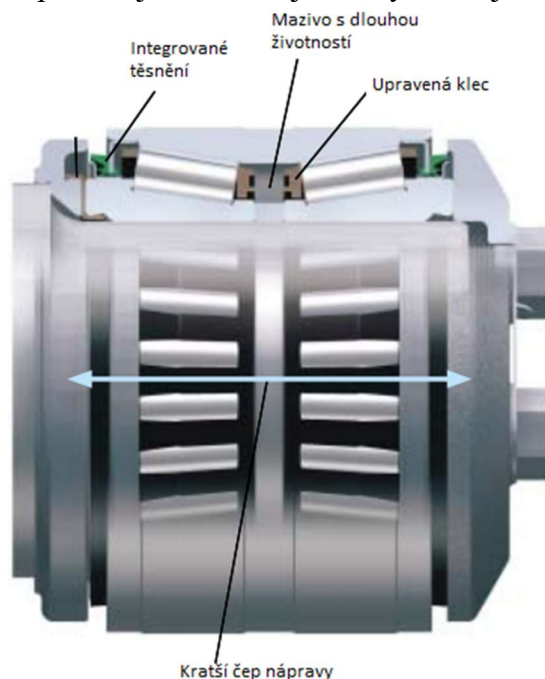
V následujících kapitolách dojde k seznámení s danými vlastnostmi podvozku.

7.1 Vedení dvojkolí a primární vypružení

Na podvozku je dle zadání vytvořeno vedení dvojkolí za pomoci kyvného ramene. V tomto případě by se jednalo o odlitek kyvného ramene, ve kterém by bylo umístěno uložení nápravy v ložiskách. Nejčastěji se na uložení náprav používají ložiskové jednotky a to zejména kvůli spolehlivosti a téměř bezúdržbovosti.

Ložiskové jednotky vyrábí například firma SKF pod označením CTBU. Takové ložiskové jednotky mají kuželíkové valivé členy a nabízejí možnost úspory místa, díky zjednodušené konstrukci pouzdra. Kuželíky jsou drženy v polyamidové kleci, která má za následek snížení tření, opotřebení a nižší provozní teploty. Dále mají integrované labyrintové těsnění, což zabezpečuje vynikající ochranu proti vniknutí nečistot. Výrobce dodává tyto ložiskové jednotky již naplněné mazivem, které má dlouhou životnost. [12] Tento typ ložiskové jednotky lze vidět na obrázku vpravo.

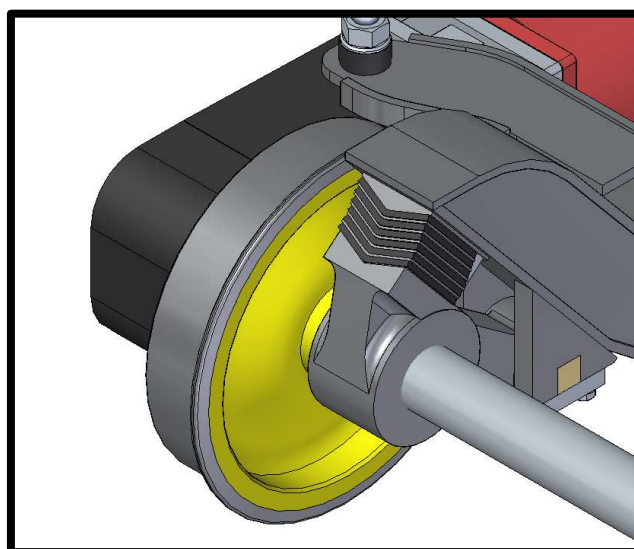
Dále pod dalšími označeními vyrábí ložiskové jednotky s různými valivými tělesy, například válečky.



Obrázek 23 Ložisková jednotka CTBU[13]

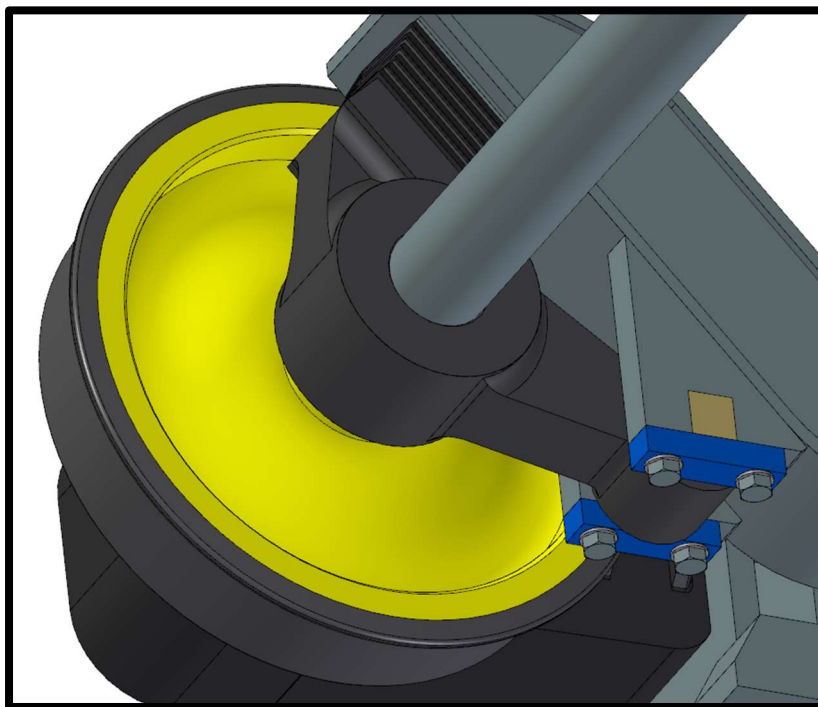
Primární vypružení na tomto podvozku je tvořeno Meggi pružinami. Jedná se o pryžokovové pružiny šípového tvaru. Tato pružina byla zvolena z důvodu příznivé tlumící vlastnosti pryže, kdy při použití tohoto typu není třeba připojovat další tlumící prvky a tím dojde k úspoře hmotnosti. Vypružení tímto stylem je však poměrně tuhé a častěji se používá pro podvozky, které jsou určeny pro nižší rychlosti, což v případě tramvaje je splněno. [14]

Na následujícím obrázku lze již vidět, jak jsou pryžokovové pružiny Meggi zakomponovány na kyvné rameno a rám podvozku.



Obrázek 24 Kyvné rameno

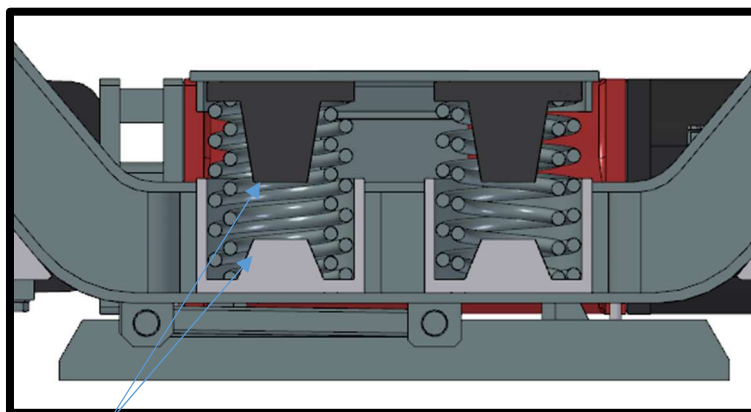
Uchycení ramena k podvozku je za pomoci čepu se silentblokem (hnědá barva na obrázku 26), který se vsadí do připravené vyfrézované drážky v navařeném držáku. Ze spodní strany bude čep zajištěn pomocí příložky přimontované šrouby. Jedná se o snadný a výrobně nenáročný konstrukční prvek.



Obrázek 25 Uchycení kyvného ramene k rámu

7.2 Sekundární vypružení, kolébka

V tomto konstrukčním návrhu bylo jako sekundární vypružení zvoleno pružení tlačnou vinutou pružinou. V rámci sekundárního vypružení jde o čtyři dvojice pružin, které jsou vzájemně paralelně řazeny (viz obrázek 28 – pružiny jsou vloženy do sebe). Díky tomu lze získat vyšší tuhost než jen s jednou pružinou.



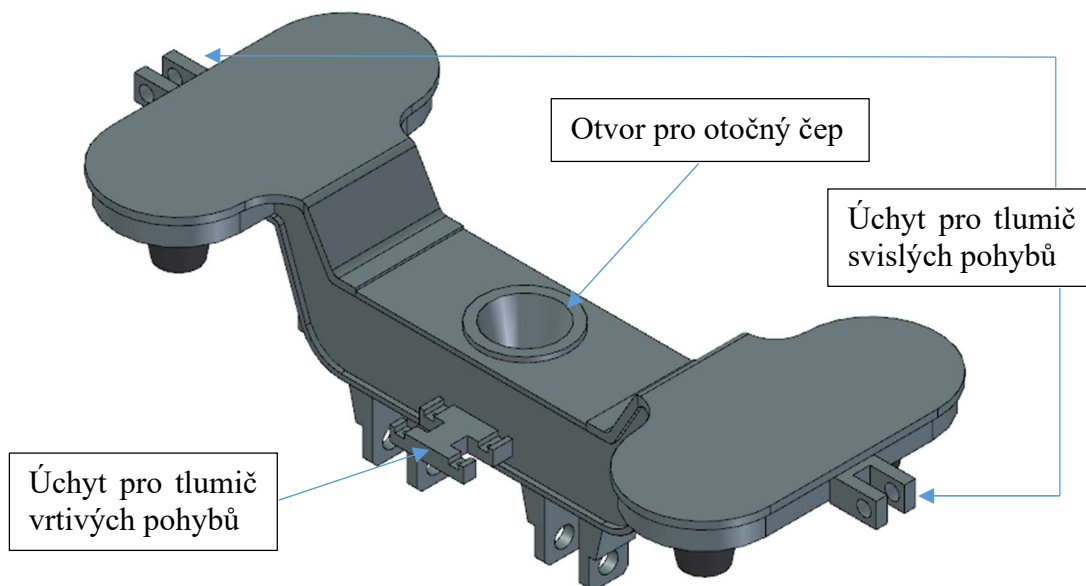
Kónusy pro nouzové dojetí

Obrázek 26 Sekundární vypružení – Řez podvozkiem

Pokud by došlo k porušení sekundárního vypružení podvozku, jsou zde vytvořeny kónusy, na které by kolébka dosedla a tramvajové vozidlo by mohlo v nouzovém režimu dojet do bezpečného místa.

7.2.1 Kolébka

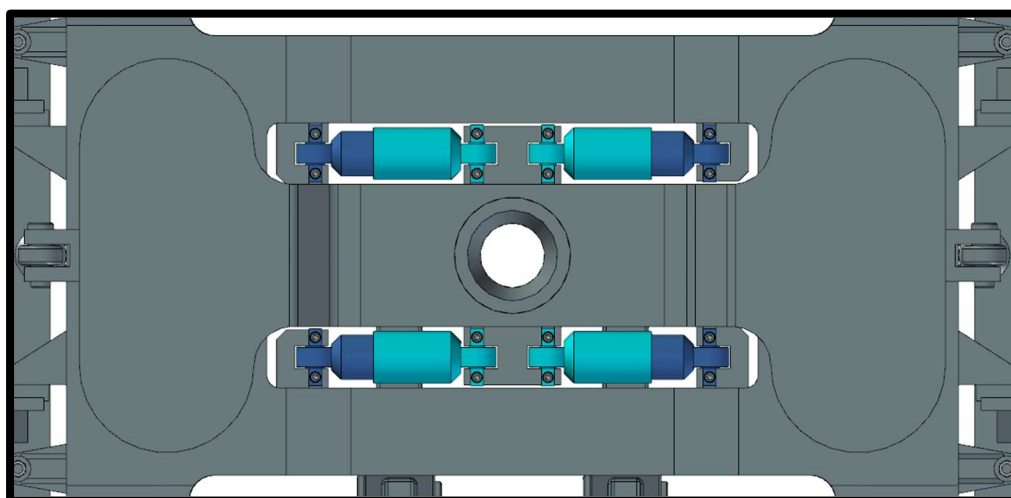
Kolébka je vytvořena jako svařenec z plechů různých tloušťek a uprostřed je vytvořen otvor pro otočný čep, který by byl součástí skříně tramvajového vozidla a sloužil by ke vzájemnému spojení podvozku a skříně vozidla.



Obrázek 27 Kolébka

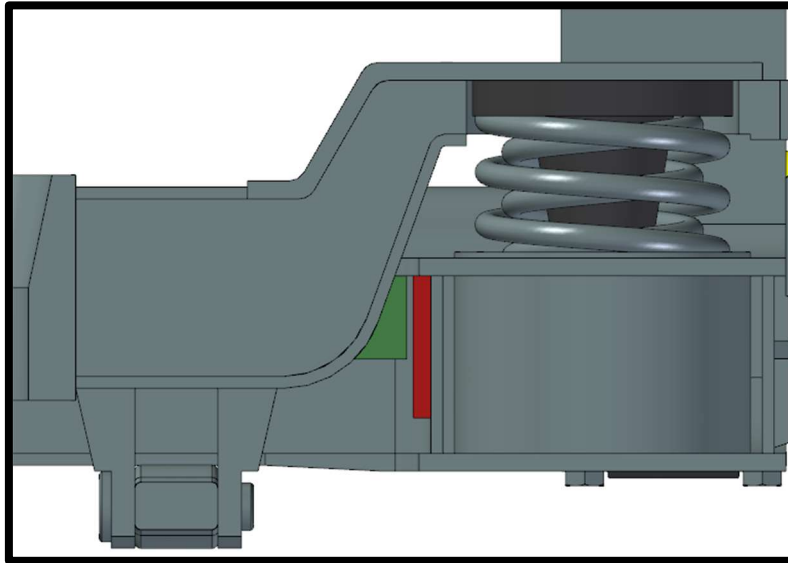
Na první pohled zaujme takto konstruovaná kolébka svým prohnutím směrem k temenu kolejnice. Toto prohnutí je zde z důvodu dříve zmíněné nízkopodlažnosti celého vozidla. Uvnitř tramvajového vozidla, v místě nad podvozkem, by byla zúžena ulička a lidé uvnitř vozidla by procházeli nad sníženou částí kolébky. Tím by nebylo třeba ve vozidle konstruovat schody k překonání podvozků.

Kromě již dříve zmíněných vlastností je kolébka vybavena dalšími prvky. Po stranách podvozku je kolébka spojena s podélníkem pomocí tlumičů pohybu ve svislém směru. Z toho důvodu jsou zde navařeny úchyty, do kterých by se umístil následně tlumič. Obdobný případ je pro tlumení pohybů v příčném směru - takzvané vrtivé pohyby – po stranách kolébky jsou navařeny úchyty, do kterých by následně byly přišroubovány tlumiče. Systém tlumičů lze vidět na obrázku 28.



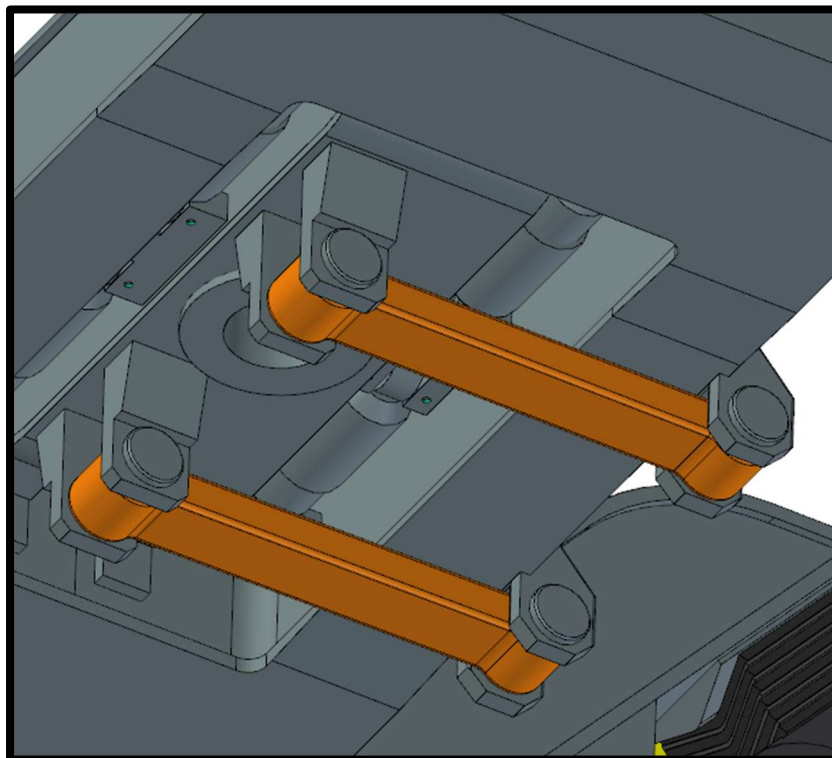
Obrázek 28 Půdorysný pohled na kolébku - umístění tlumičů příčných pohybů

V neposlední řadě bylo třeba zabezpečit přenos sil mezi kolébkou a rámem podvozku, a to ve všech směrech. Pohyby v příčném směru jsou zachycovány pomocí nárážek, které jsou navařeny jak na kolébce, tak na rámu podvozku. Tyto nárážky lze vidět na následujícím obrázku, jsou vyznačeny červenou a zelenou barvou.



Obrázek 29 Přenos sil v příčném směru - řez kolébkou

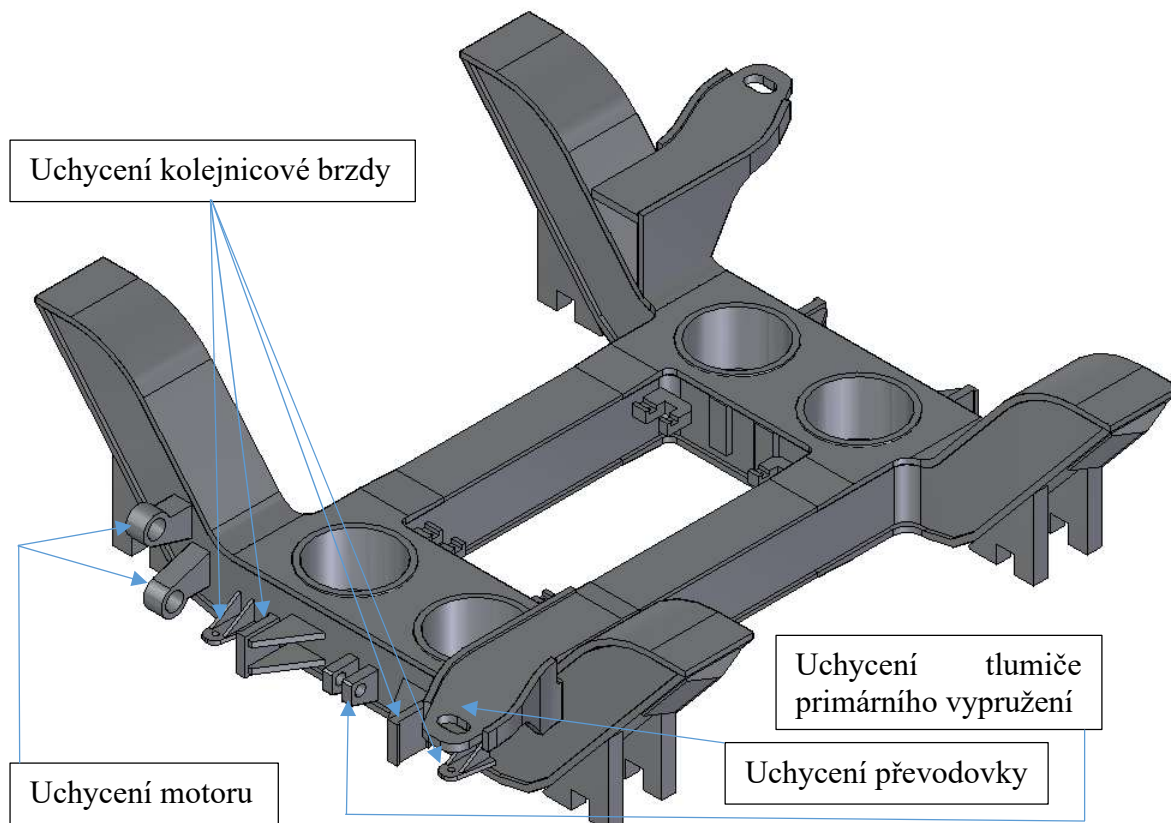
V podélném směru byly pro přenos tažných sil zvoleny ojníčky. Ze spodní strany kolébky jsou navařeny oka, do kterých je následně vložen čep k zajištění. Stejně tak jsou navařeny oka i na jednom z příčníků. Ojníčky byly konstruovány s co největší možnou délkou. Systém přenosu tažných sil lze vidět na následujícím obrázku, ojníčky označeny oranžovou barvou.



Obrázek 30 Přenos tažných sil

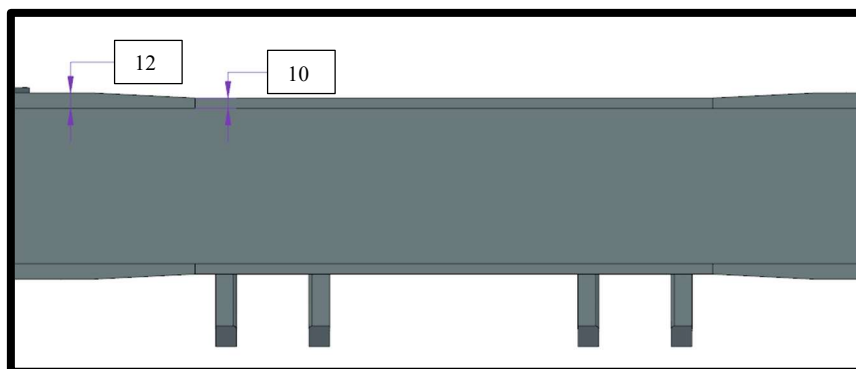
7.3 Rám podvozku

Hlavní částí podvozku je jeho rám. V této diplomové práci byl rám konstruován jako vnitřní, svařovaný převážně z plechů různých tloušťek. Na následujícím obrázku lze vidět samotný rám.



Obrázek 31 Rám podvozku

Rám tohoto podvozku tvoří dva svařované podélníky skříňového typu. Tyto dva podélníky jsou spojeny za pomoci dvou příčníků, které mají menší tloušťku plechu, než jsou použity na podélníky. Tyto rozdílné tloušťky plechů vedou k další úspoře hmotnosti. Přechody mezi jednotlivými tloušťkami jsou díky odfrézování materiálu postupné.

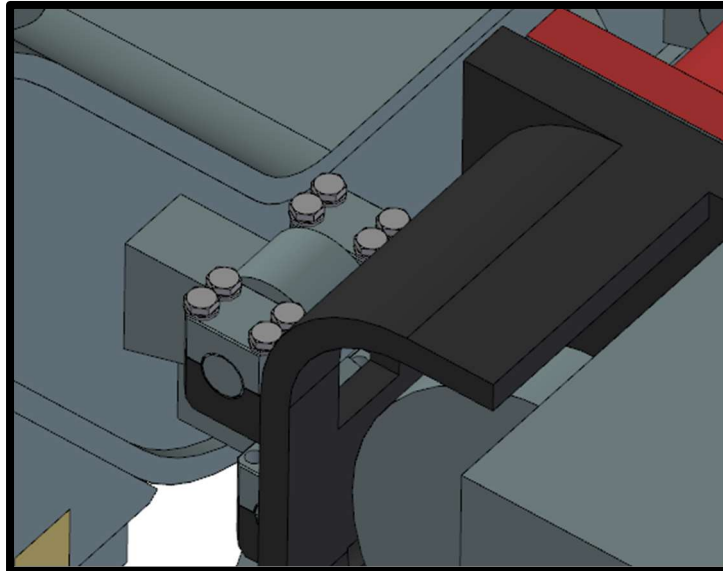


Obrázek 32 Postupný přechod mezi tloušťkami plechů příčnicku

Další úspora hmotnosti byla vytvořena díky rádiům na koncích podélníku, kdy došlo k odstranění přebytečného materiálu.

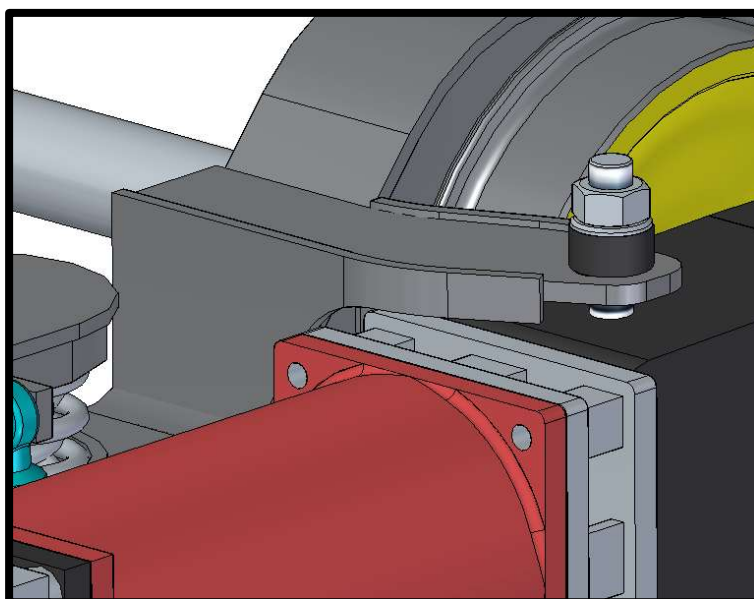
V podélníkách byly vytvořeny otvory, do kterých je přivařena trubka, ve které je následně umístěno sekundární vypružení tohoto podvozku (viz. Kapitola 7.2).

Vzhledem k tomu, že je motor umístěn po vnější straně podélníku podvozku, tak jsou na něm přivařeny úchyty motoru. Do těchto dvou úchytů je následně vložen čep se silentblockem, který je poté spojen se svařovanou přírubou na motoru pomocí šroubů. Systém tohoto uchycení je pro lepší představu zobrazen na následujícím obrázku.



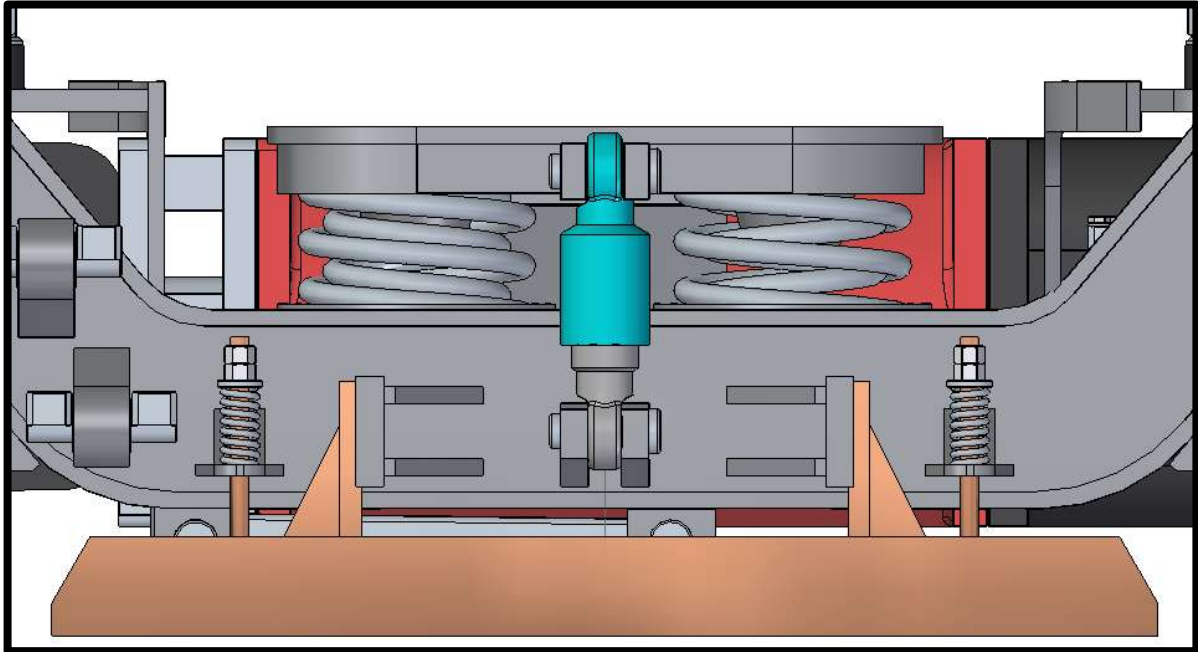
Obrázek 33 Uchycení motoru k rámu podvozku

Motor s převodovkou je spojen za pomoci příruby do jedné samostatné sestavy, takže je možno na jedné straně vytvořit spojení s rámem za pomoci zmíněných čepů, ale na druhé straně je třeba celou sestavu motoru s převodovkou a brzdou ještě v jednom místě uložit. Z toho důvodu je počítáno s vloženým závrtným šroubem do skříně převodovky, který je následně přes silentblock spojen s konzolou přivařenou na podélník podvozku. V konzole je vytvořena drážka na místo díry, a to z důvodu eliminování výrobních nepřesností, které by mohli způsobit problémy při montáži.



Obrázek 34 Uchycení převodovky

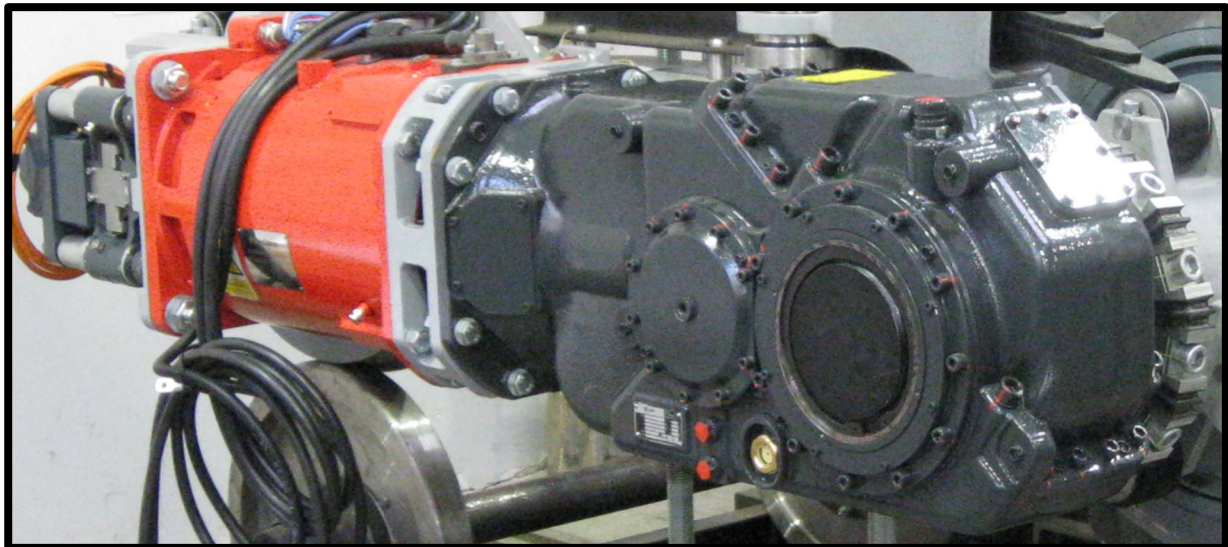
V rámci konstrukce rámu podvozku je dále počítáno i s vybavením kolejnicovou brzdou. Opět jsou pro ni na vnější straně podélníku navařeny držáky, do kterých by byl osazen tento typ brzdy. Tato brzda nemůže být uložena na podvozek napevno, ale je třeba umožnit její svislý pohyb. V podélném směru je však brzdě pohyb zamezen narážkami. Tento systém lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 35 Kolejnicová brzda – uložení

Na předchozím obrázku lze vidět i uložení tlumiče svislých pohybů od sekundárního vypružení.

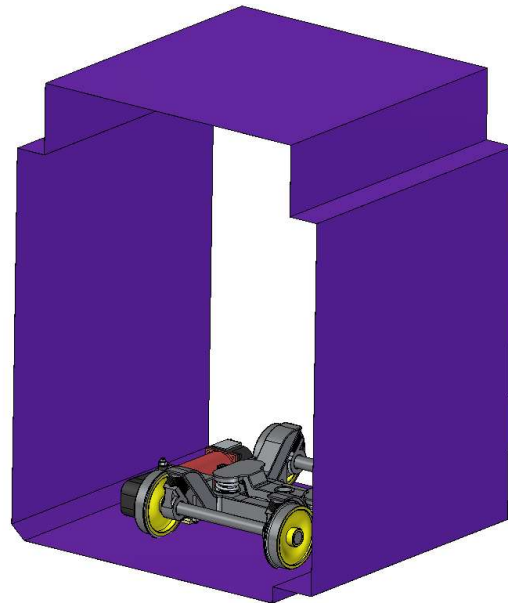
Návrh motoru a převodovky nebyl detailněji prováděn; nicméně je zde počítáno s reálnými rozměry motoru a převodovky, které se v praxi vyskytují. Příklad tohoto stylu uložení motoru lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 36 Trakční motor s převodovkou a brzdou

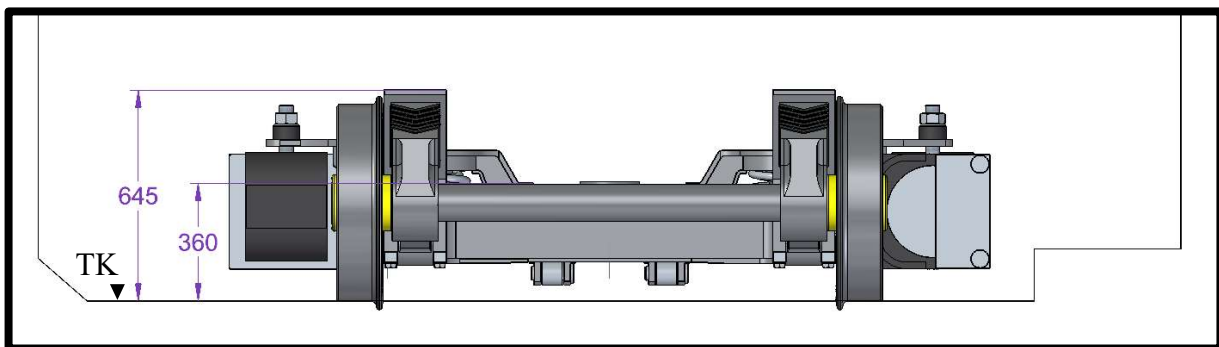
7.4 Průjezdny průřez

Vzhledem k tomu, že byl trakční motor a převodovka umístěna na vnější straně podvozku, je třeba přezkontrolovat, zda se tento navržený podvozek vejde do průřezného průjezdu daného normou ČSN 28 0337. V rámci sestavy podvozku v softwaru SolidEdge byl nakreslen daný průřez ve formě ploch.



Obrázek 37 Průjezdny průřez

Na následujícím nárysu průjezdny průřezu lze vidět, že tento navržený tramvajový podvozek se do průjezdny obrysu dle normy ČSN 28 0337 vejde. Dále jsou zde zakótovány výška podvozku a výška kolébky nad temenem kolejnice (TK).



Obrázek 38 Průjezdny průřez s podvozkem

7.5 Materiál rámu podvozku

Rám podvozku je dynamicky namáhanou konstrukcí, která musí být provozuschopná a musí odolávat únavě i při velmi nízkých teplotách, například až -40°C . Z toho důvodu jsou na materiál kladeny požadavky, které musí zaručit, že ani při nízkých teplotách neklesne hodnota vrubové houževnatosti KCU pod 27 Jcm^{-2} . Pokud by došlo k poklesu pod tuto hodnotu, mohlo by v konstrukci rámu dojít ke křehkému lomu, a to je nepřijatelné. [2]

V následujících tabulkách lze vidět aktuálně používané materiály na rámy podvozků. Jsou zde uvedeny materiály označené dle české státní normy a jejich chemického složení, avšak v dnešní době se používají materiály s označením dle evropských norem. [2]

Materiál podle ČSN	C %	Mn %	Si %	P % max.	S % max.	Cr % max.	Ni % max.	Cu % max.	Cr+Ni+Cu % max.	Nb %	Al %
11 458.1 [8]	0,1–0,16	0,9–1,3	0,25–0,4	0,035	0,035	0,20	–	0,30	–	–	0,015–0,070
11 449+M [7]	0,1–0,16	0,9–1,3	0,25–0,4	0,035	0,035	0,20		0,30			0,015–0,070
11 503.1 [10]	max. 0,18	max. 1,6	max. 0,55	0,35	0,35	0,30	0,30	0,30	0,70	0,02 až 0,08	min. 0,015

Obrázek 40 Materiály dle ČSN [2]

Materiál podle EN 10025	C %	Si %	Mn %	P %	S %	V %	Cr %	Cu %	Nb %	Ti %	Mo %	Ni %	Ak celk. %	Zr max. %	N max. %
S355NL 1.0546	max. 0,18	0,50	0,90–1,65	max. 0,025	max. 0,020	max. 0,12	max. 0,30	max. 0,55	max. 0,05	max. 0,05	max. 0,10				
09r2C (ruský) [15]	> 0,12	0,5–0,6	1,3–1,5												
S355J2G1W (1.8963)												max. 0,65	min. 0,02	0,15	
S355NL												max. 0,05	min. 0,02		0,015

Obrázek 39 Materiály dle EN [2]

Z výše zmíněných materiálů byl vybrán materiál S355NL (1.0546), který má následující mechanické vlastnosti a je používán v praxi.

Materiál podle EN 10025	Re min [MPa]			Rm [MPa]				Zkouška rázem v ohybu KV při -20 [Jmin]		A5 napříč %	
	tl. do 3 mm	3–16	17–40	do 3 mm	3–16 mm	nad 16 mm	≤ 100	do 16 mm	nad 16 mm	do 16	17–40
S355NL 1.0546		355	345				470 až 630		27		

Obrázek 41 Vlastnosti materiálu S355NL

8 Pevnostní kontrola rámu

Před samotnou pevnostní kontrolou rámu, metodou konečných prvků, je třeba si stanovit statické zatížení, kterým musí při provozu rám podvozku, potažmo samotný podvozek kolejového vozidla, odolávat. Tyto zatížení se rozlišují na zatížení výjimečné a normální provozní a jsou definovány normou ČSN EN 15827. [2]

Výjimečná zatížení podvozku se vyskytují v provozu podvozku výjimečně avšak vozidlo (respektive podvozek) musí zůstat provozuschopný a nesmí se na něm vytvořit žádné trvalé deformace. [2]

Dále je třeba rozlišit o jaký typ podvozku se jedná. K tomuto rozlišení slouží norma ČSN EN 13749, která rozděluje podvozky do kategorií B-I až B-VII. Pro příklad – kategorie B-I je pro podvozky kolejových vozidel celostátních drah a případně vysokorychlostních vozidel; B-VII je poté kategorie pro podvozky lokomotiv. Podvozky tramvajových vozidel mají kategorii označenou jako B-IV. [2]

Kategorie B-IV určuje výpočet zatížení pro statické zkoušky při výjimečném a provozním zatížení. Pro výjimečná zatížení podvozku je třeba si stanovit skutečnou hmotnost skříně vozidla m_1 včetně cestujících následovně.

$$m_1 = \frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \quad (1)$$

Pro normální zatížení podvozku je třeba si stanovit skutečnou hmotnost skříně vozidla m_1 včetně cestujících následovně.

$$m_1 = \frac{(M_v + P_2) \cdot c}{100} - m^+ \quad (2)$$

Z těchto hmotností se následně pomocí zrychlení v daném směru určí

- **síla podélná**

$$F_{x1} = m_1 \times a_{xc} \quad (3)$$

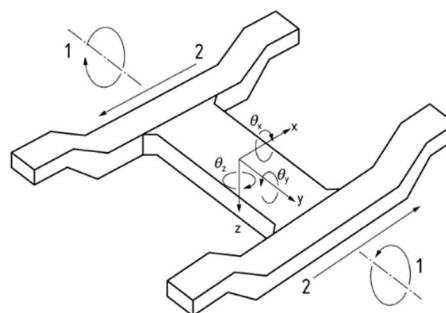
- **síla příčná**

$$F_{yc} = m_1 \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (4)$$

- **síla svislá**

$$F_{zc} = m_1 \times (g + a_{zc}) \quad (5)$$

Souřadný systém podvozku udává norma takto:



Obrázek 42 Souřadný systém podvozku [2]

8.1 Stanovení zatížení cestujících P_1 a P_2

Norma ČSN EN 15663 udává hmotnosti cestujících ve voze rozdělené zvlášť pro jednotlivé kategorie. Pro případ tramvajového podvozku lze vidět normativní zatížení v následující tabulce.

Kategorie	Mimořádná zatížení P_1	Provozní zatížení P_2
B-IV – Tramvajová vozidla	1 cestující na sedadlo, 6 až 8 cestujících na 1 m ² nástupních plošin a chodeb. Průměrná hmotnost cestujícího je 70 až 75 kg.	1 cestující na sedadlo, max. 6 cestujících na 1 m ² nástupních plošin a chodeb. Průměrná hmotnost cestujícího je 70 až 75 kg.

Tabulka 5 Zatížení P_1 a P_2 pro daný typ podvozku, dle normy ČSN EN 15663[2]

Vzhledem k tomu, že v této diplomové práci nebyl řešen celkový návrh tramvajového vozidla – skříně, tak nelze přesně určit, kolik cestujících by bylo možné přepravit. Z toho důvodu byla za vzor vzata tříčlávková tramvaj Škoda 40T s obchodním označením ForCity Smart Plzeň. Tato tramvaj byla aktuálně uvedena na plzeňské trati a její parametry uvádí firma Škoda Transportation následovně.

ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY

Počet článků	3
Celkový počet cestujících – 4 os/m ² (včetně sedících)	185 (64)
Délka	29 140 mm
Šířka	2 500 mm
Rozchod	1 435 mm
Max. rychlost	70 km/h
Napájení	600 V DC
Nízkopodlažnost	100 %

Obrázek 43 Parametry tramvaje Škoda 40T [18]

Jelikož se jedná o tříčlávkovou tramvaj, je zapotřebí vydělit počet sedících cestujících (64 cestujících) počtem článků. Tímto odhadem byl získán počet cca **22 sedících cestujících v jednom článku tramvaje**. Celkový počet stojících cestujících je poté 121. Při uvažování 4 osob/m² vychází celková plocha pro stání 30,25 m². **Plocha pro stání v jednom článku tramvaje je tedy odhadem 10 m². Pohotovostní hmotnost takové 3 článkové tramvaje je 45 000 kg => 1 článek 15 000 kg.**

Při výpočtu mimořádného zatížení P_1 je brána obsazenost stojících osob na horní hranici normy, tedy 8 osob/m². Hmotnost jednoho cestujícího je brána jako maximální hodnota – 75 kg.

$$P_1 = (n_{sed} + n_{stoj}) \cdot m_{cest_{max}} \quad (6)$$

$$P_1 = (22 + 8 \cdot 10) \cdot 75 \quad (7)$$

$$P_1 = 7\,650 \text{ kg} \quad (8)$$

Výpočet provozního zatížení P_2 počítá s daným obsazením stojícími osobami - 6 osob/m². Hmotnost jednoho cestujícího je brána jako průměrná – 72,5 kg.

$$P_2 = (n_{sed} + n_{stoj}) \cdot m_{cest} \quad (9)$$

$$P_2 = (22 + 6 \cdot 10) \cdot 72,5 \quad (10)$$

$$P_2 = 5\,945 \text{ kg} \quad (11)$$

8.2 Stanovení svislého zatížení podvozku

Ke stanovení zatížení působícího na podvozek je třeba dodefinovat zrychlení v příslušných směrech. Tyto zrychlení taktéž definuje norma ČSN EN 13749 pro daný typ zatížení následovně:

Zátěžný stav	Zrychlení		
	a_{zc} [m/s ²]	a_{yc} [m/s ²]	a_{ycc} [m/s ²]
Výhybka	3,2	2,2	-
Jízda v oblouku	1,6	1,3	2

Tabulka 6 Zrychlení podvozku pro výjimečné zatížení

Zátěžný stav	Zrychlení		
	a_{zc} [m/s ²]	a_{yc} [m/s ²]	a_{ycc} [m/s ²]
Výhybka	2,4	1,6	-
Přímá trať	1,2	0,9	-
Jízda v oblouku	1,2	0,9	1

Tabulka 7 Zrychlení podvozku pro normální zatížení

8.2.1 Výjimečné zatížení

Svislá síla při výjimečném zatížení byla získána následovně za použití rovnice (1) a (5). Hmotnost vozidla v provozním stavu je brána lehce vyšší než u tramvaje Škoda 40T z důvodu případné rezervy.

Výjimečné svislé zatížení pro případ výhybky:

$$F_{zb_{výjv}} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (g + a_{zc}) \quad (12)$$

$$F_{zb_{výjv}} = \left(\frac{(18\,000 + 7\,650) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (g + 3,2) \quad (13)$$

$$F_{zb_{výjv}} = 119\,367\,N \quad (14)$$

Výjimečné příčné zatížení pro případ výhybky:

$$F_{ycv} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (15)$$

$$F_{ycv} = \left(\frac{(18\,000 + 7\,650) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times 2,2 \quad (16)$$

$$F_{ycv} = 20\,185\,N \quad (17)$$

Výjimečné svislé zatížení pro případ jízdy v oblouku:

$$F_{zb_{výjo}} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (g + a_{zc}) \quad (18)$$

$$F_{zb_{výjo}} = \left(\frac{(18\,000 + 7\,650) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (g + 1,6) \quad (19)$$

$$F_{zb_{výjo}} = 106\,687\,N \quad (20)$$

Výjimečné příčné zatížení pro případ jízdy v oblouku:

$$F_{yco} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (21)$$

$$F_{yco} = \left(\frac{(18\,000 + 7\,650) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (1,2 + 2) \quad (22)$$

$$F_{yco} = 30\,278\,N \quad (23)$$

8.2.2 Provozní zatížení

Svislá síla při provozním zatížení byla získána následovně za použití rovnice (1) a (5). Hmotnost vozidla v provozním stavu je brána lehce vyšší, než je u tramvaje Škoda 40T z důvodu případné rezervy.

Provozní svislé zatížení pro případ výhybky:

$$F_{zb_{prov}} = \left(\frac{(M_v + P_2) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (g + a_{zc}) \quad (24)$$

$$F_{zb_{prov}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (g + 2,4) \quad (25)$$

$$F_{zb_{prov}} = 101\,618\,N \quad (26)$$

Provozní příčné zatížení pro případ výhybky:

$$F_{yc_{prov}} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (27)$$

$$F_{yc_{prov}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times 1,6 \quad (28)$$

$$F_{yc_{prov}} = 13\,316\,N \quad (29)$$

Provozní svislé zatížení pro případ přímé trati:

$$F_{zb_{prop}} = \left(\frac{(M_v + P_2) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (g + a_{zc}) \quad (30)$$

$$F_{zb_{prop}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (g + 1,2) \quad (31)$$

$$F_{zb_{prop}} = 91\,631\,N \quad (32)$$

Provozní příčné zatížení pro případ přímé trati:

$$F_{yc_{prop}} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (34)$$

$$F_{yc_{prop}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times 0,9 \quad (35)$$

$$F_{yc_{prop}} = 7\,490\,N \quad (36)$$

Provozní svislé zatížení pro případ jízdy v oblouku:

$$F_{zb_{proP}} = \left(\frac{(M_v + P_2) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (g + a_{zc}) \quad (37)$$

$$F_{zb_{proP}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (g + 1,2) \quad (38)$$

$$F_{zb_{proP}} = 91\,631\,N \quad (39)$$

Provozní příčné zatížení pro případ přímé trati:

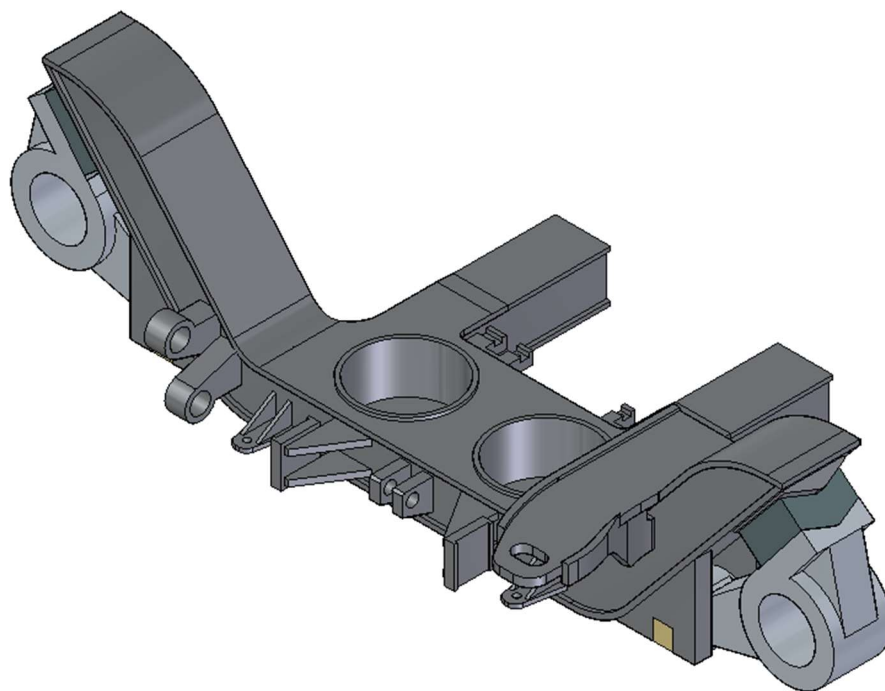
$$F_{yc_{proP}} = \left(\frac{(M_v + P_1) \cdot c}{100} - m^+ \right) \times (a_{yc} + a_{ycc}) \quad (40)$$

$$F_{yc_{proP}} = \left(\frac{(18\,000 + 5\,945) \cdot 50}{100} - 3650 \right) \times (0,9 + 1) \quad (41)$$

$$F_{yc_{proP}} = 15\,813\,N \quad (42)$$

9 Pevnostní výpočet rámu metodou konečných prvků

Pevnostní výpočet rámu byl proveden v softwaru NX. Výpočetní model byl přenesen z již vytvořeného modelu v programu Solid Edge ve formátu step. Nebylo třeba přenášet celý rám podvozku, nýbrž jen jeho symetrickou poloviční část, kterou lze vidět na následujícím obrázku, tak aby výpočet byl jednodušší.



Obrázek 44 Výpočtový model pro MKP

Jak lze vidět, tak ve výpočtovém modelu byly odstraněny všechny součásti, které se rozebíratelně připojují k samotnému svařenci rámu podvozku. Zůstaly zde kyvná ramena a čepy, které však ve výsledcích budou zanedbány, protože cílem tohoto výpočtu je pevnostní kontrola rámu podvozku.

V rámci následujících výpočtů metodou konečných prvků bylo v rámci vypružení uvažováno nejhoršího stavu, tedy úplného stlačení. Jak lze vidět z obrázku 46, tak pryžokovové pružiny byly tedy nahrazeny jedním blokem, jehož deformace / napětí budou ve výsledcích opět zanedbány.

Následující dvě tabulky shrnují zátěžné stavy a síly, které působí na rám podvozku.

Výjimečné zatížení		
	Výhybka	Jízda v oblouku
Svislé zatížení F_z	119 367 N	106 687 N
Příčné zatížení F_y	20 185 N	30 278 N

Tabulka 8 Výjimečná zatížení podvozku

Provozní zatížení			
	Výhybka	Jízda v oblouku	Přímá trať
Svislé zatížení F_z	101 618 N	91 631 N	91 631 N
Příčné zatížení F_y	13 316 N	15 813 N	7 490 N

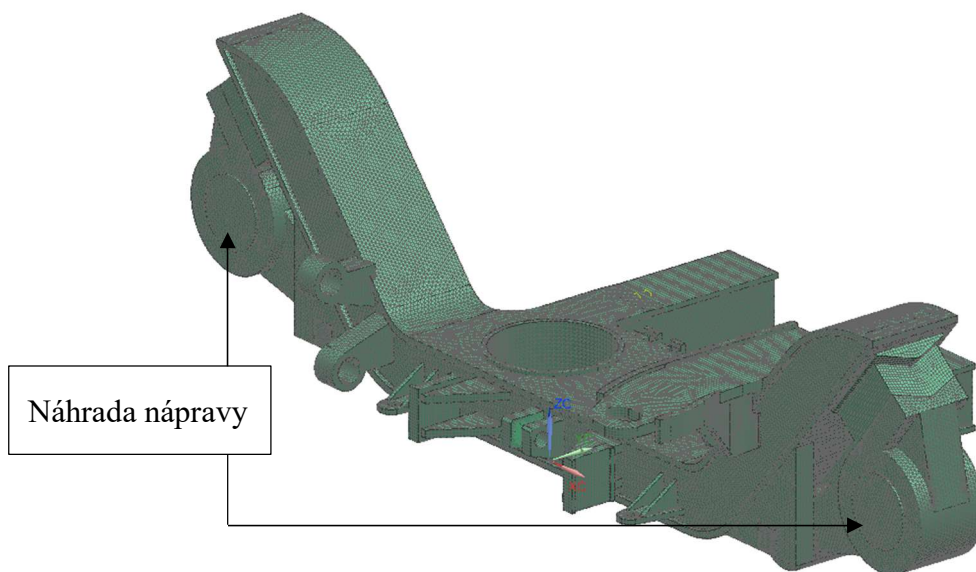
Tabulka 9 Provozní zatížení podvozku

Při analýze těchto výsledků bylo zjištěno, že nejhorší stav nastává při výjimečném zatížení a to konkrétně při průjezdu výhybkou. Z toho důvodu bude v rámci MKP tento stav prověřen. Ostatní stavy budou ověřeny také, i když ze zatížení je patrné, že průběhy napětí budou nižší.

9.1 Výpočetní model

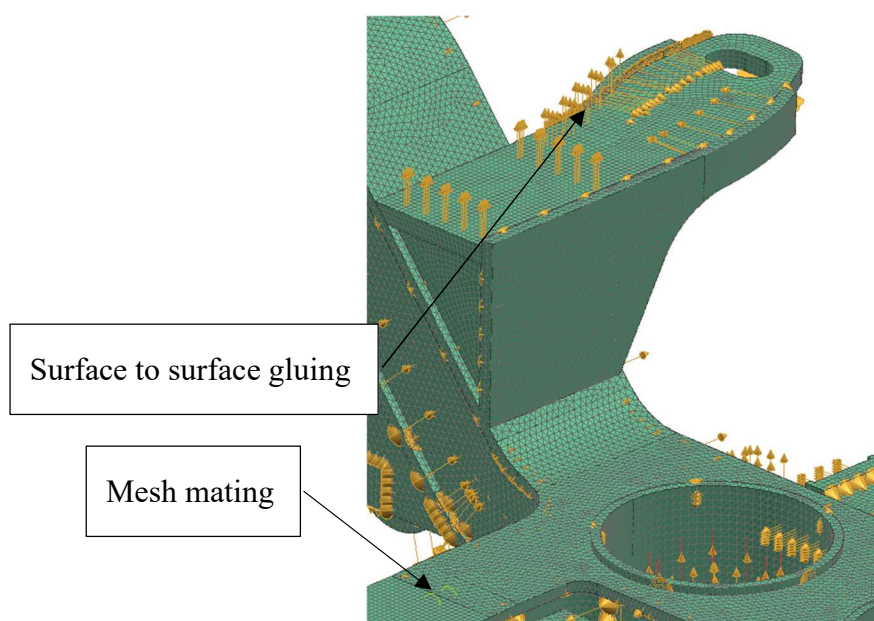
V rámci idealizovaného dílu byly vytvořeny ještě části náprav, které simulují následné reálné uchycení kyvných ramen. Tuhost těchto částí náprav bude ve výsledcích opět zanedbána.

V další fázi výpočtu metodou konečných prvků bylo třeba si vytvořit konečno prvkovou síť. Pro vytvoření této sítě byly využity funkce 3D tetrahedralové sítě s prvky CTETRA(10) s velikostí elementu 8 mm a 3D swept mesh s prvky CHEXA(8) s velikostí elementu 6 mm, kdy se v obou případech jedná o prvky s meziuzlem. Síť, kterou je možno vidět na obrázku 47, tvoří cca 371 500 elementů.



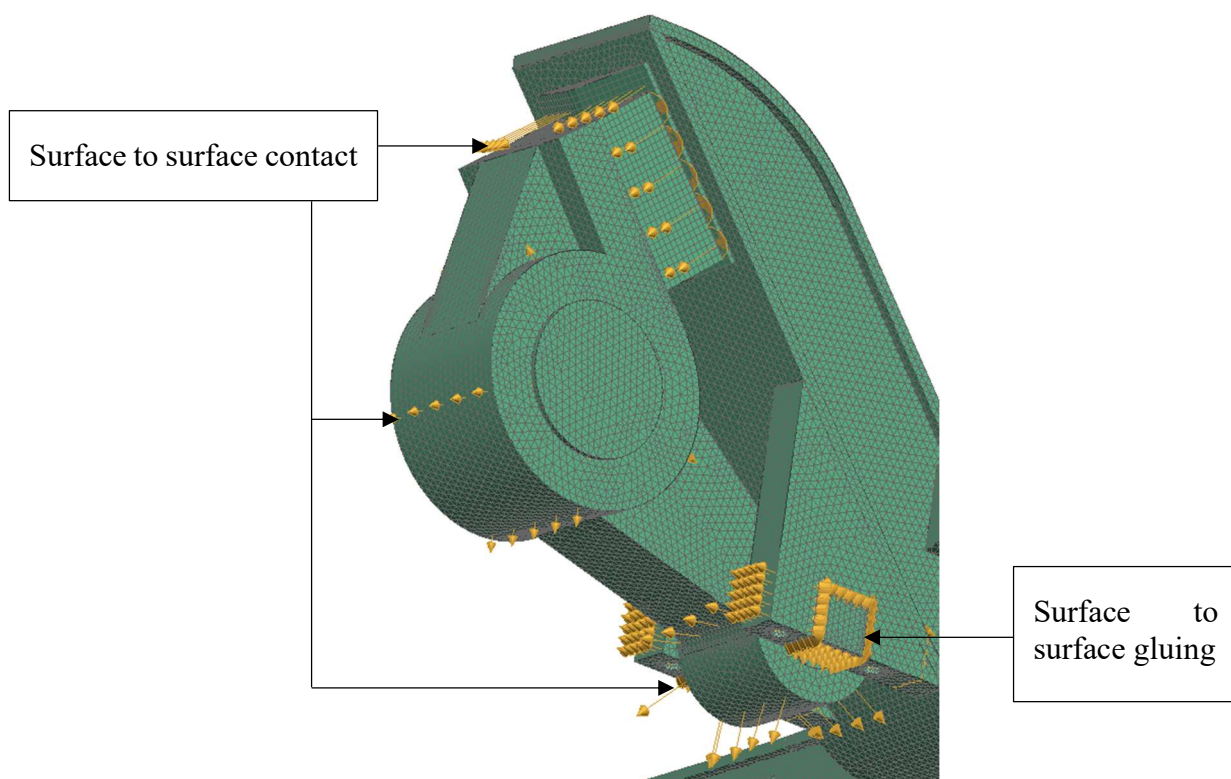
Obrázek 45 Zasiťovaný výpočtový model

V dalším kroku bylo třeba zajistit náhradu svarových spojů. Tyto spoje byly v rámci výpočtového modelu nahrazeny funkcí mesh mating – pro případ tupých svarů a ostatní svary byly nahrazeny funkcí surface to surface gluing. Ke spojení kyvného ramena s čepem a nápravou bylo dále využito funkce surface to surface contact.



Obrázek 46 Spojení sítí – nahrazení svarových spojů

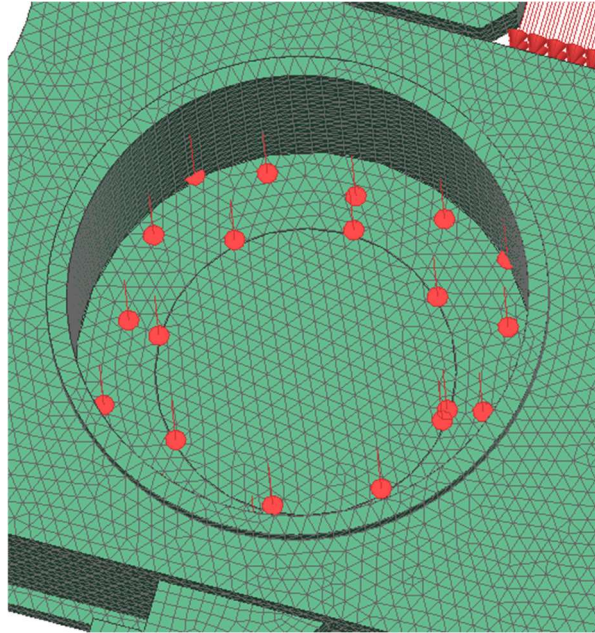
Uchycení ramen k podvozku a čepům je ve skutečnosti realizováno pomocí čepů a ložisek. Tyto ložiska byla ve výpočtu nahrazena funkcí surface to surface contact. Tato funkce byla využita i na náhradě pryžokovových pružin v kontaktu s rámem podvozku, tak aby byly umožněny případné pohyby mezi rámem podvozku a náhradami pružin.



Obrázek 47 Spojení ramen s podvozkem

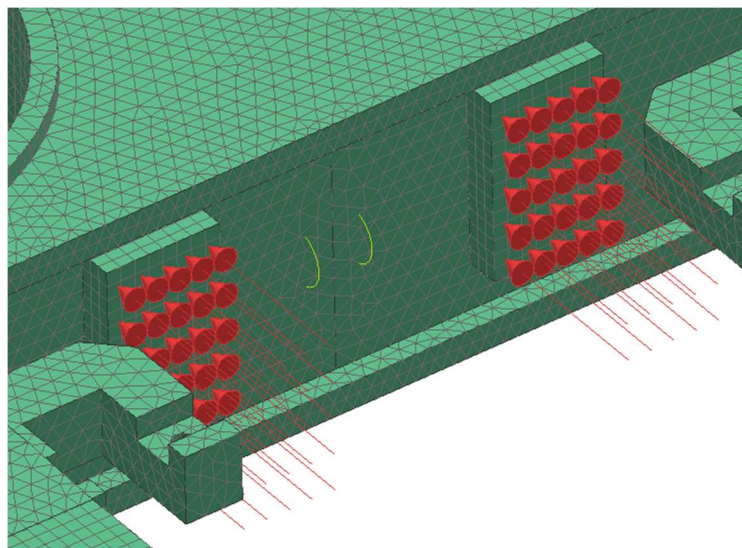
Samotný čep, byl k rámu podvozku uložen pomocí funkce surface to surface gluing.

Vzhledem k tomu, že skříň tramvajového vozidla leží na kolébce, tak síly jsou na rám podvozku přenášeny přes sekundární vypružení podvozku. V místech vypružení tedy byla síť rozdělena, aby do těchto míst mohly být zaneseny síly.



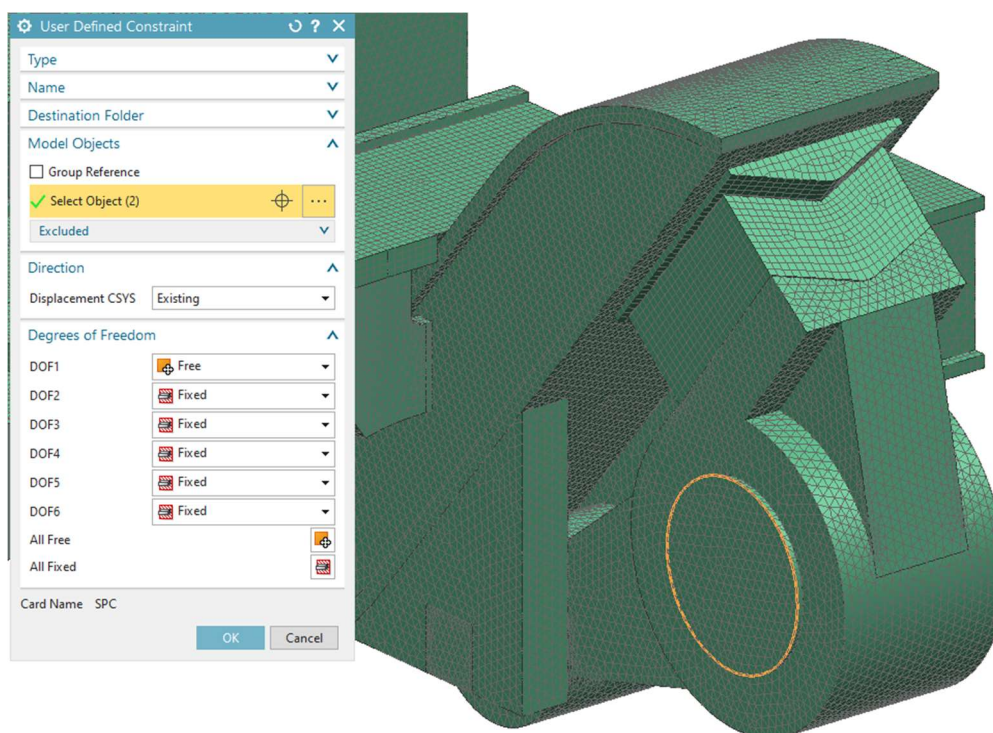
Obrázek 48 Náhrada sekundárního vypružení silou

Příčné síly jsou přes kolébku a narážky přenášeny do podélníků podvozku. Ve výpočtovém modelu jsou tyto příčné síly zaneseny na plochy narážek.



Obrázek 49 Příčné síly

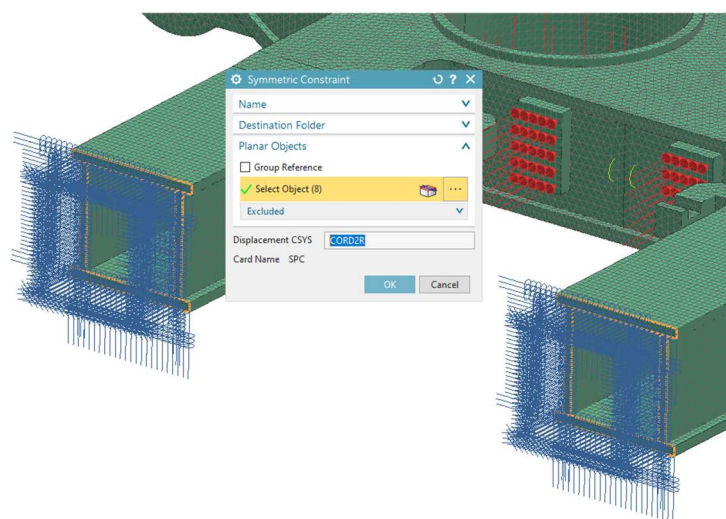
V neposlední řadě bylo třeba vytvořit vazby samotného rámu podvozku vůči souřadnicovému systému softwaru. Při tom bylo využito zmíněných ramen a částí náprav, aby zatížení ve výpočtovém modelu co nejvíce odpovídalo skutečnosti. K vytvoření těchto vazeb bylo využito uživatelsky definované vazby (User Defined Constraint).



Obrázek 50 Vazby rámu podvozku vůči souřadnicovému systému – náprava

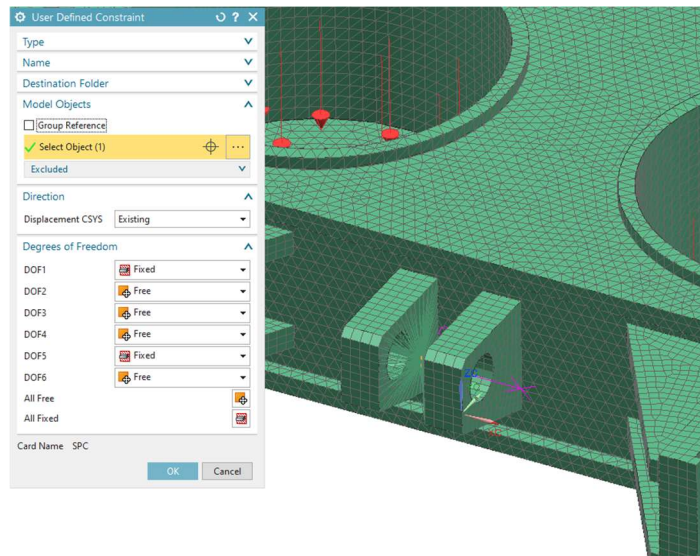
Na čelech části nápravy jsou zakázány posuvy ve směru osy Z a Y protože v těchto osách je znemožněno se při deformaci posouvat, jelikož v těchto směrech je rám podvozku v realitě držen dvojkolím podvozku. Dále jsou zakázány všechny rotace podvozku, protože ty jsou nahrazeny funkcí surface to surface contact mezi nápravou a kyvným ramenem.

Jelikož je z rámu podvozku použita jedna polovina, bylo třeba tuto skutečnost zanést do výpočtu vazbou symetrie na plochy, které vznikly po rozdělení rámu polovinu.



Obrázek 51 Vazba symetrie

Aby byl rám podvozku staticky určitě vazben vůči souřadnému systému, bylo třeba ještě odebrat volnost do směru X. Došlo k předpokladu, že deformace tohoto rámu bude symetrická, tudíž byla do míst uchycení tlumiče sekundárního vypružení vytvořena 1D rigidová ržice. Pomocí ní byla následně odebrána i volnost ve směru X.



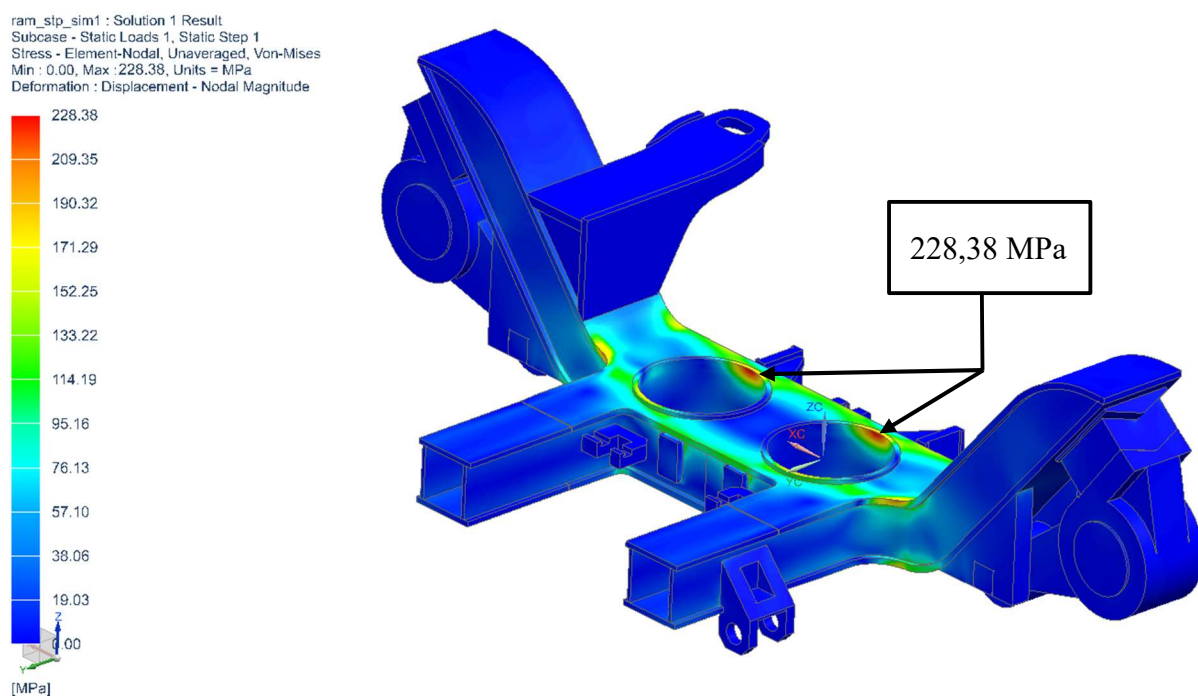
Obrázek 52 Odebrání volnosti v ose

9.2 Výjimečné zatížení – výhybka

Vzhledem k výběru materiálu S355NL bylo třeba stanovit dovolené napětí vůči kterému budou následně porovnávány výsledky jednotlivých zátěžných stavů. Na obrázku 43 lze vidět hodnotu meze kluzu pro daný materiál a tloušťku plechu. Vzhledem k tomu, že se podvozek stává z různých tlouštěk plechů, nikoliv však převyšující hodnotu 16 mm, bude brána vyšší hodnota meze kluzu, tedy pro tloušťky 3–16 mm => $R_{emin} = 355 \text{ MPa}$. Z této hodnoty bude dopočtena dovolená hodnota napětí za pomoci koeficientu S neboli bezpečnostního součinitele, který má následující hodnotu $S = 1,5 \text{ MPa}$. Hodnota dovoleného napětí se stanoví následovně a budou s ní porovnávány výsledky simulací:

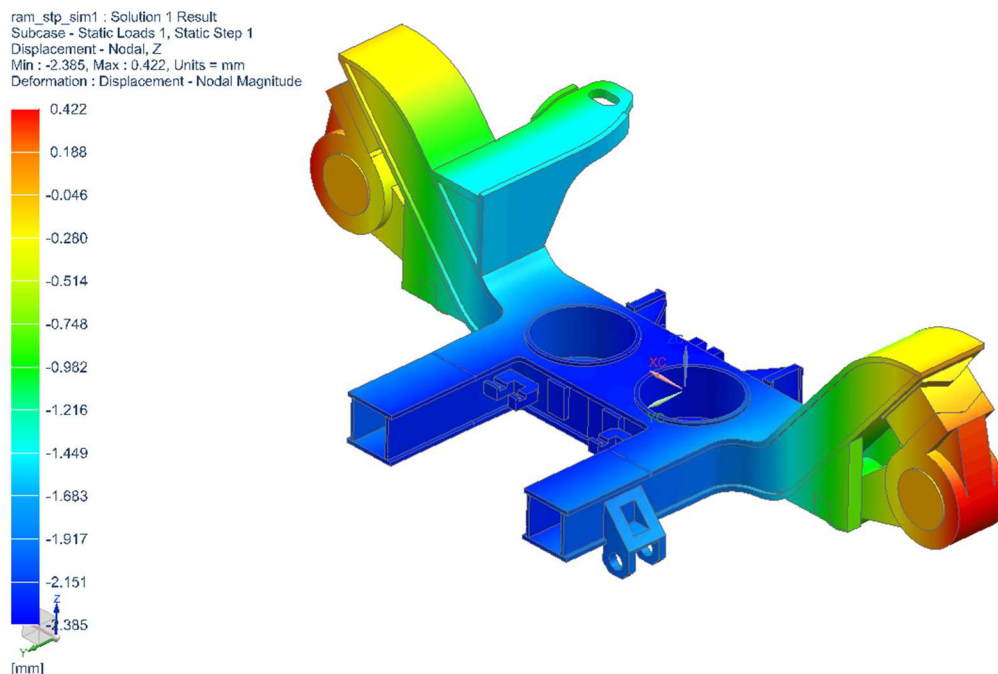
$$\sigma_{dov} = \frac{R_e}{S} = \frac{355}{1,5} = 236,7 \text{ MPa} \quad (43)$$

Nejvyšší redukované napětí, dle hypotézy Von-Misses, které se vyskytuje na rámu podvozku, nabývá hodnoty 228,38 MPa a vyskytuje se v místech otvorů pro sekundární vypružení. Tato hodnota je pod mezí kluzu a není ani přímo v místě svaru, tudíž se dá tento rám podvozku označit za vyhovující z hlediska pevnosti i využití materiálu.



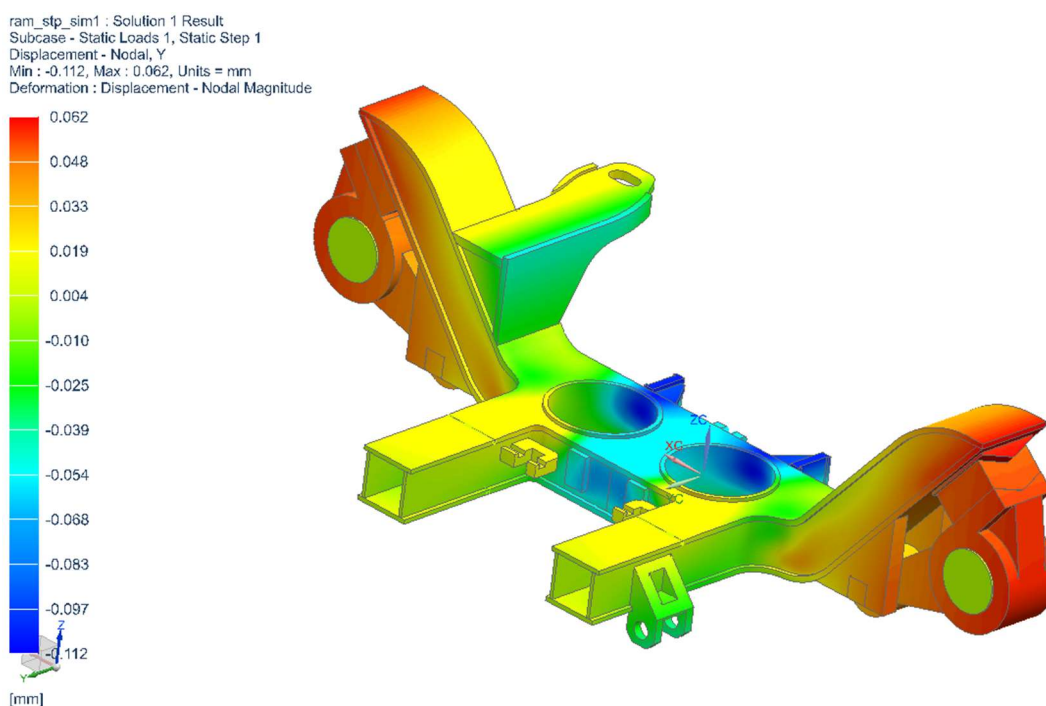
Obrázek 53 Průběh napětí – výjimečné zatížení - výhybka

Na následujícím obrázku lze vidět posunutí od deformací ve směru osy Z, což je tedy posunutí od svislých sil. V tomto případě dojde k posunutí o 2,4 mm ve směru působící síly ve střední části rámu podvozku. Vzhledem k tomu, že tato deformace se vyskytuje pouze ve výjimečných případech – výhybky – dá se považovat tuhost rámu podvozku v tomto směru za dostačující.



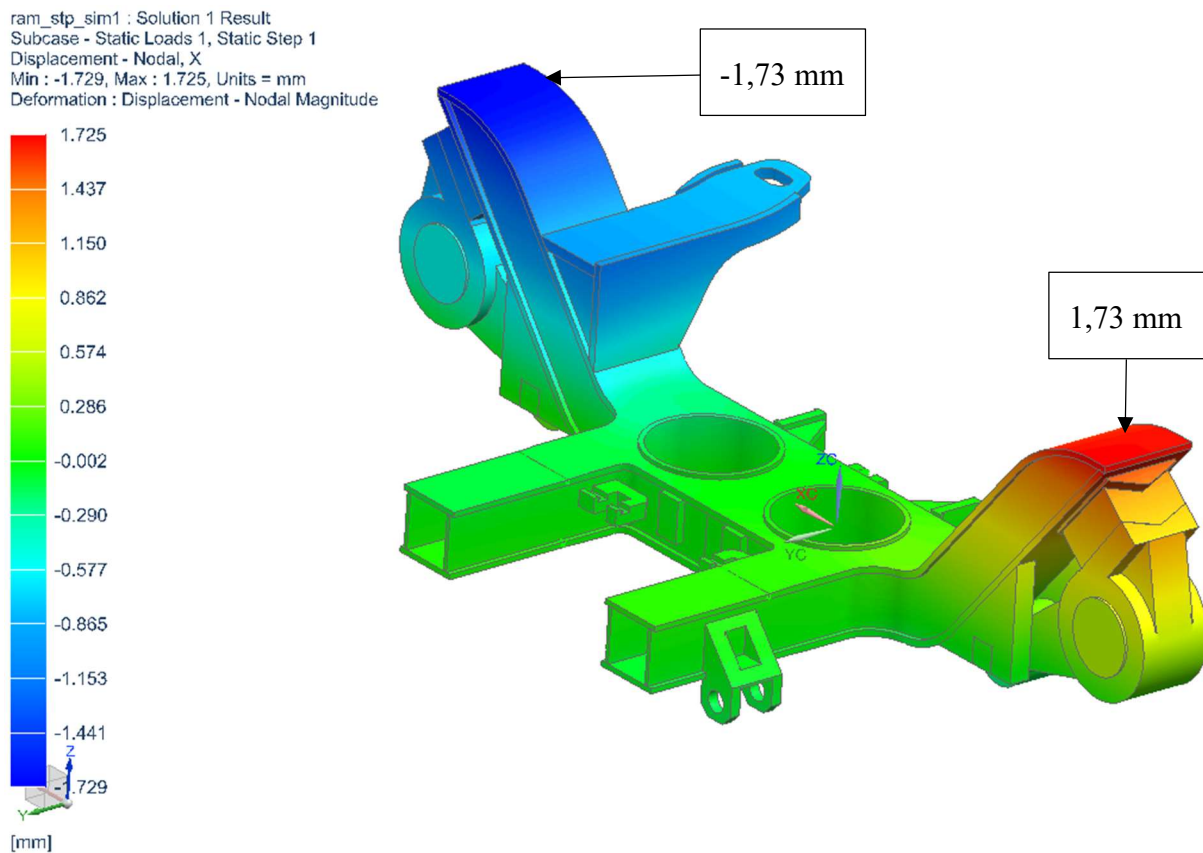
Obrázek 54 Posunutí od deformací - osa Z – výjimečné zatížení - výhybka

Příčné síly vyvolávají zanedbatelné posunutí od deformací vzhledem k celkovým rozměrům podvozku. Jedná se o posunutí o hodnotu 0,11 mm ve směru působení příčných sil, tudíž je i v tomto směru tuhost podvozku dostačující. Tuto hodnotu lze naměřit na vnější straně podélníku.



Obrázek 55 Posunutí od deformací – osa Y – výjimečné zatížení – výhybka

Při pohledu na poslední posunutí od deformací – osu X - lze vidět, že podvozek byl deformován symetricky, tak jak bylo předpokládáno, protože oba konce podélníků se vlivem zatížení deformovaly o stejnou hodnotu.

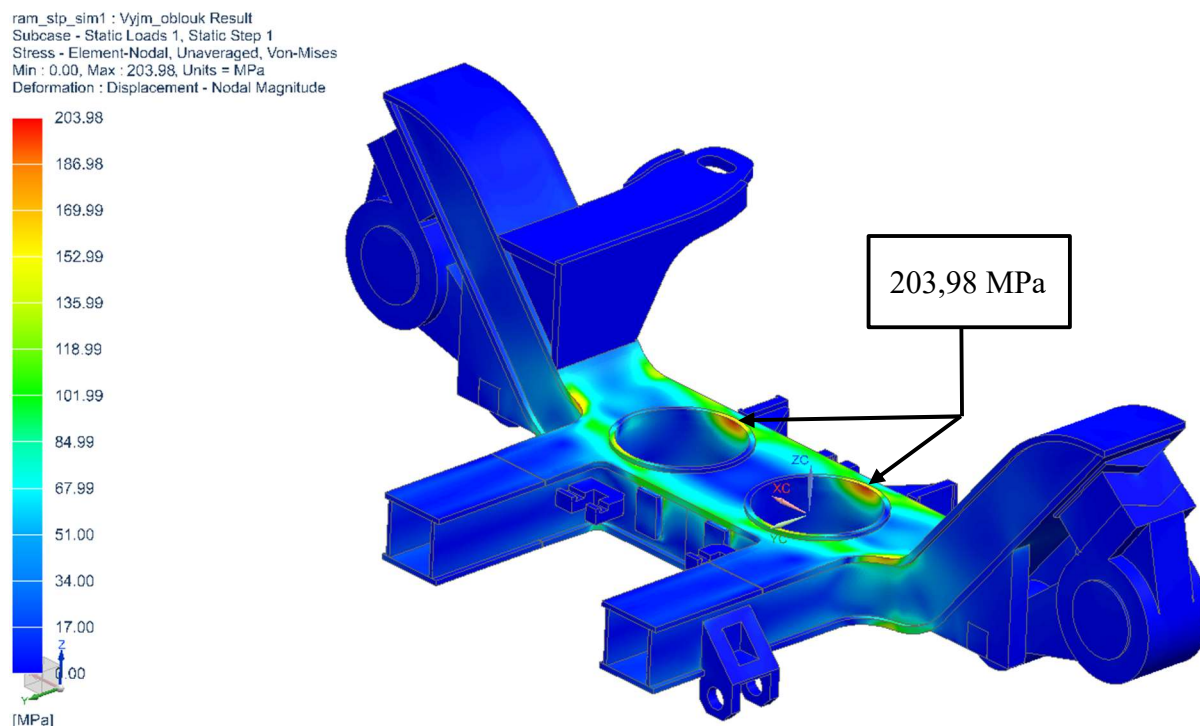


Obrázek 56 Posunutí od deformací – osa X – výjimečné zatížení – výhybka

Jedná se o posunutí o hodnotu $\pm 1,73$ mm směrem ke středu podélníku (viz souřadný systém na obrázku 58). Tato hodnota byla naměřena na špičkách podélníků. Jak již bylo zmíněno, tak tato deformace se děje jen ve výjimečném zatížení při průjezdu výhybkou, tudíž se dá říci, že celková tuhost tohoto rámu je dostačující.

9.3 Výjimečné zatížení – jízda v oblouku

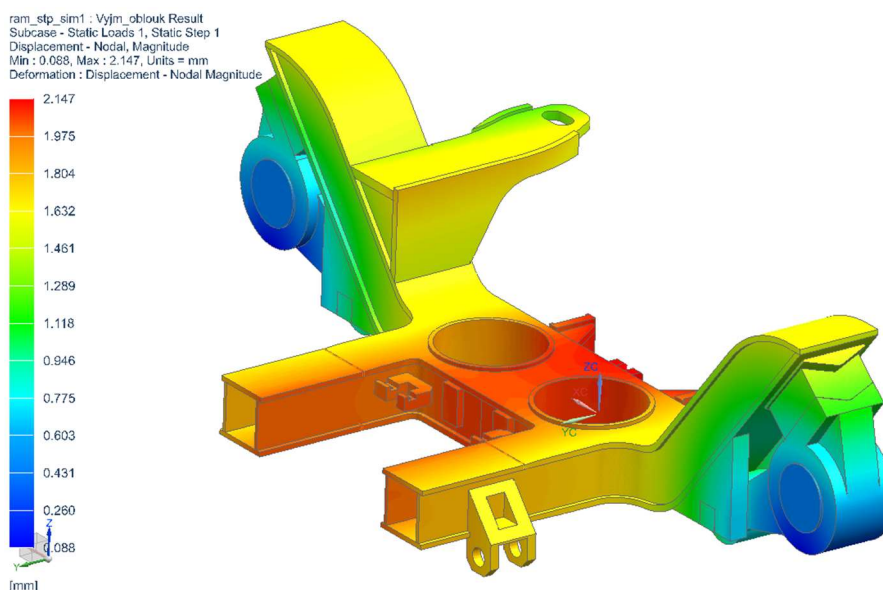
Na následujícím obrázku lze vidět průběh napětí pro výjimečné zatížení při průjezdu obloukem.



Obrázek 57 Průběh napětí – výjimečné zatížení – jízda v oblouku

Hodnota nejvyššího redukovaného napětí, metodou Von-Misses, nabývá 203,98 MPa. Toto napětí je nižší, než je dovolená hodnota a z toho důvodu lze rám podvozku označit za pevnostně vyhovující.

Na následujícím obrázku lze vidět posunutí od deformací v kombinované formě. Největší deformace zde nabývá hodnoty 2,15 mm a jedná se o posunutí střední části podélníku směrem k temeni kolejnice (ve směru působení svislých sil). Vzhledem k výjimečnému zatížení a celkovým rozměrům rámu ho lze označit za vyhovující z hlediska tuhosti.

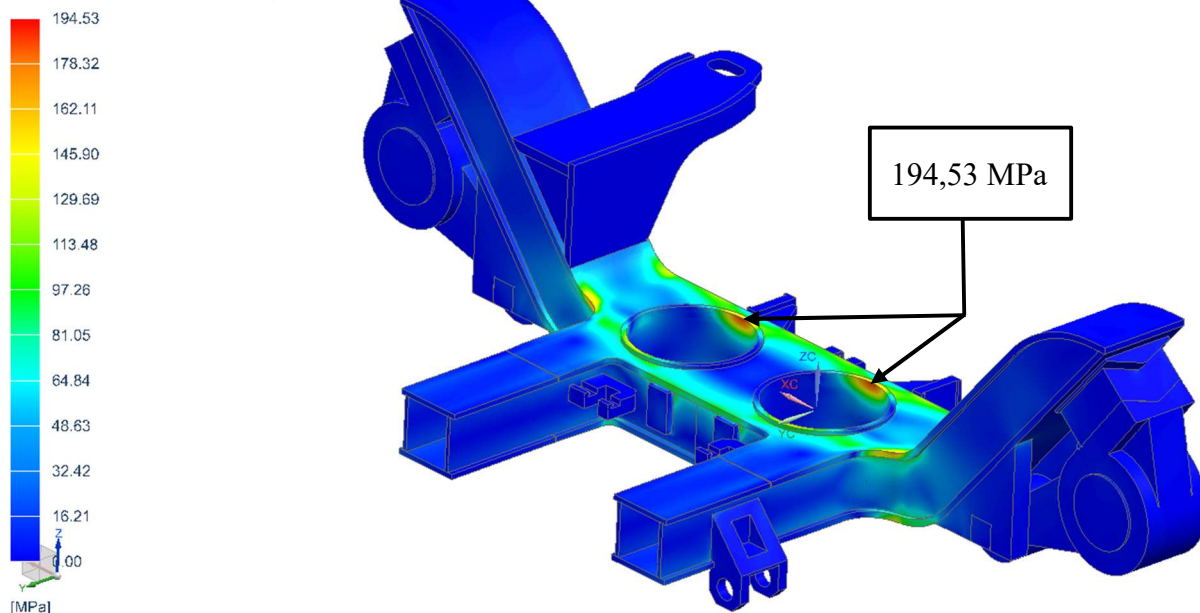


Obrázek 58 Posunutí od deformací – výjimečné zatížení – jízda obloukem

9.4 Provozní zatížení – výhybka

Na následujícím obrázku lze vidět průběh napětí pro provozní zatížení při průjezdu výhybkou.

ram_slp_sim1 : Provoz_vyhodka Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 194.53, Units = MPa
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

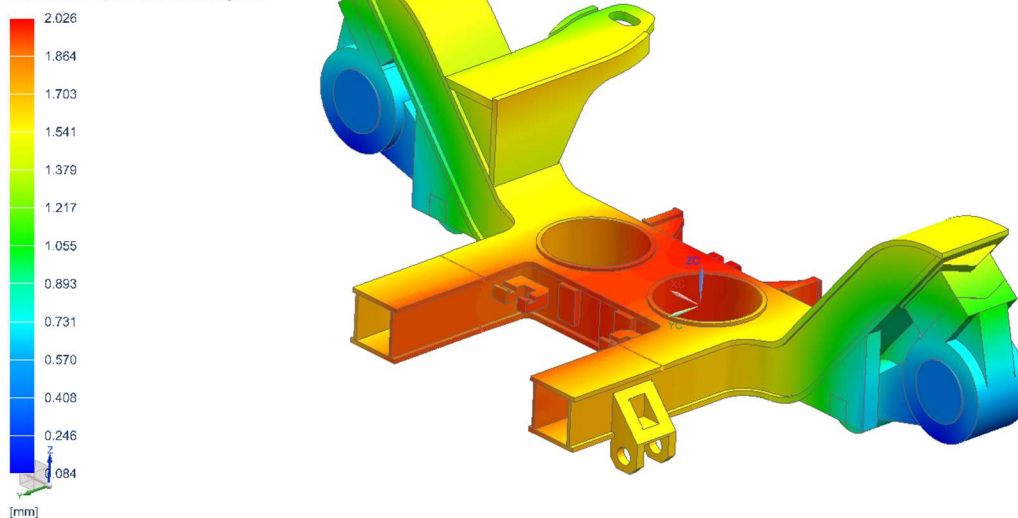


Obrázek 59 Průběh napětí – provozní zatížení – výhybka

Hodnota nejvyššího redukovaného napětí, metodou Von-Mises, nabývá 194,53 MPa. Toto napětí je nižší, než je dovolená hodnota a z toho důvodu lze rám podvozku označit za pevnostně vyhovující.

Na následujícím obrázku lze vidět posunutí od deformací v kombinované formě. Největší deformace zde nabývá hodnoty 2,03 mm a jedná se o posunutí střední části podélníku směrem k temeni kolejnice (ve směru působení svislých sil). Vzhledem k celkovým rozměrům rámu ho lze označit za vyhovující z hlediska tuhosti.

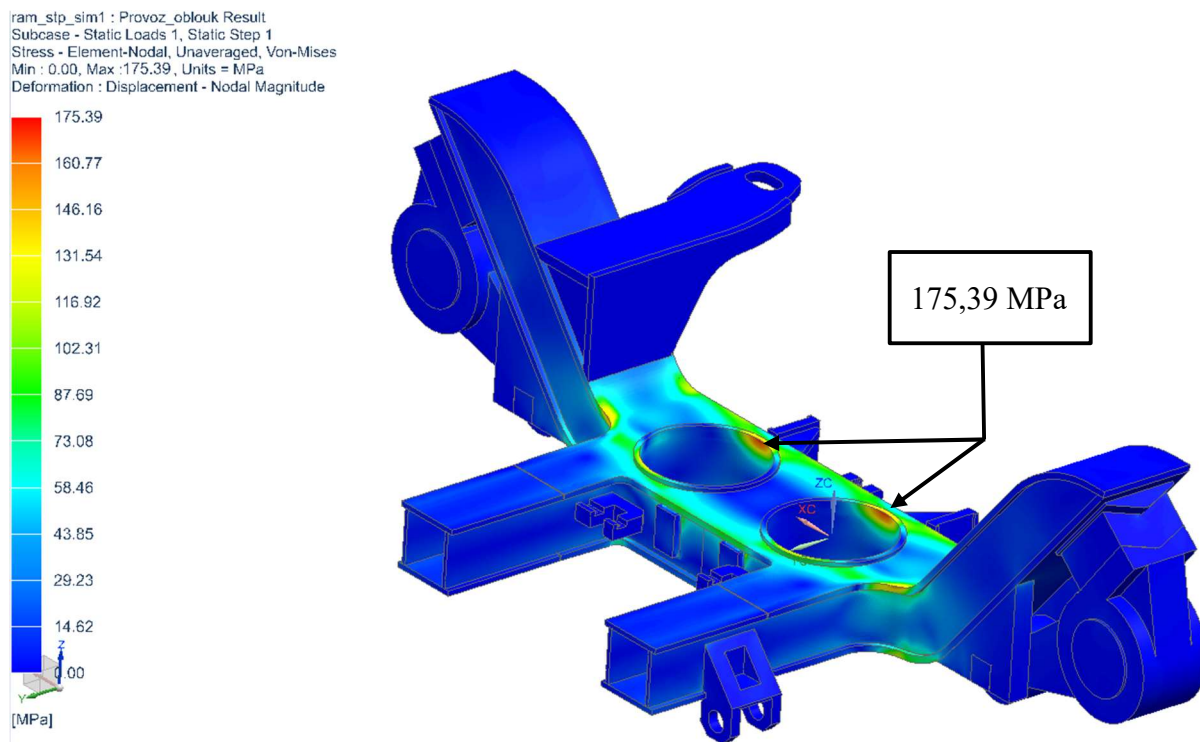
ram_slp_sim1 : Provoz_vyhodka Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 0.084, Max : 2.026, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 60 Posunutí od deformací – provozní zatížení – výhybka

9.5 Provozní zatížení – jízda v oblouku

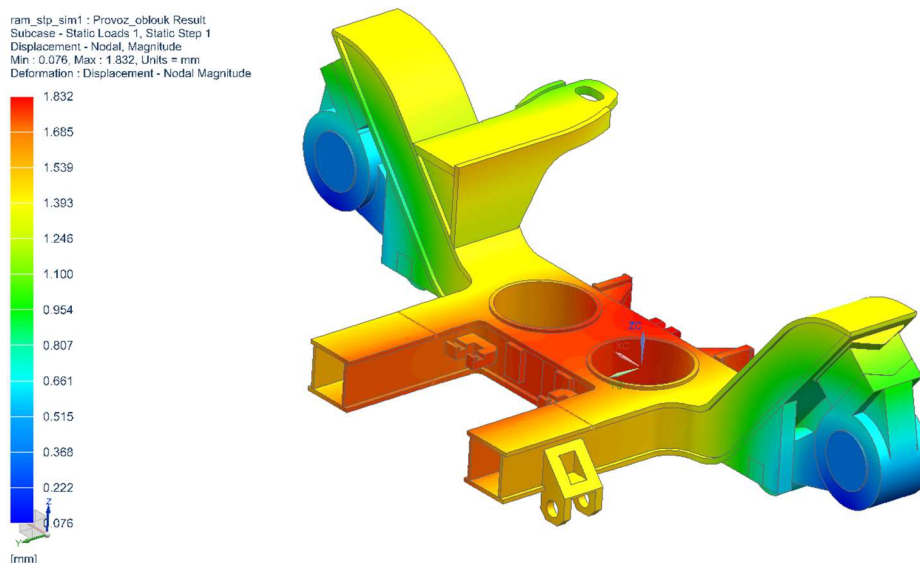
Na následujícím obrázku lze vidět průběh napětí pro provozní zatížení při jízdě v oblouku.



Obrázek 61 Průběh napětí – provozní zatížení – jízda v oblouku

Hodnota nejvyššího redukovaného napětí, metodou Von-Misses, nabývá 175,39 MPa. Toto napětí je nižší, než je dovolená hodnota a z toho důvodu lze rám podvozku označit za pevnostně vyhovující.

Na následujícím obrázku lze vidět posunutí od deformací v kombinované formě. Největší deformace zde nabývá hodnoty 1,83 mm a jedná se o posunutí střední části podélníku směrem k temeni kolejnice (ve směru působení svislých sil). Vzhledem k celkovým rozměrům rámu ho lze označit za vyhovující z hlediska tuhosti.

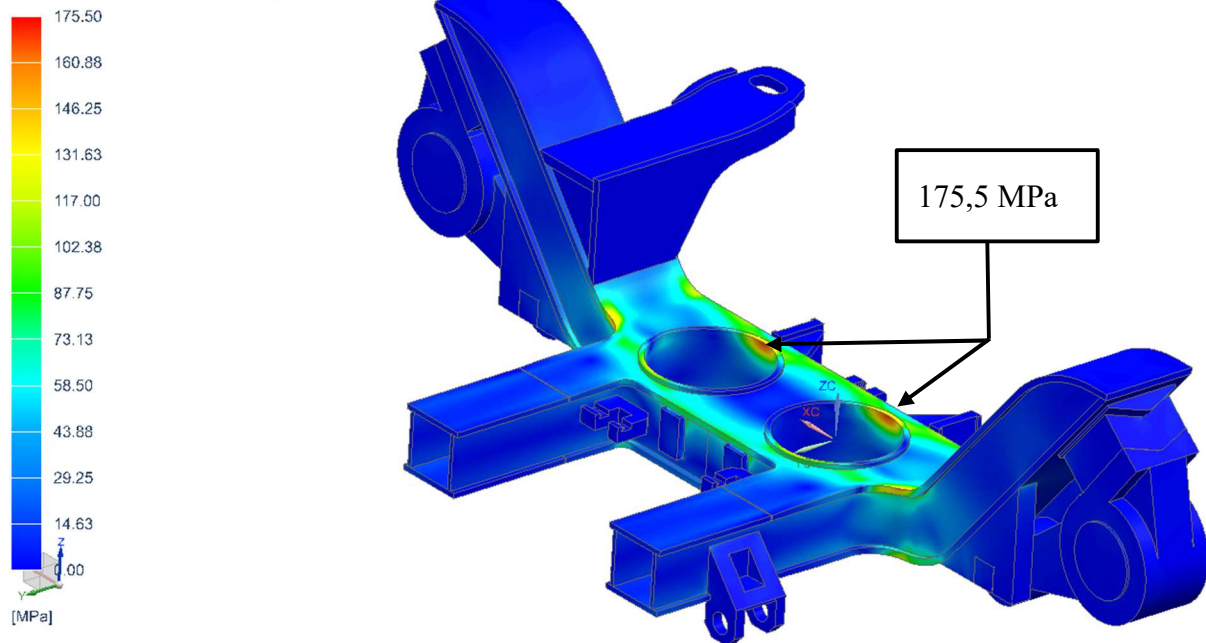


Obrázek 62 Posunutí od deformací – provozní zatížení – jízda v oblouku

9.6 Provozní zatížení – jízda po přímé trati

Na následujícím obrázku lze vidět průběh napětí pro provozní zatížení při jízdě po přímé trati

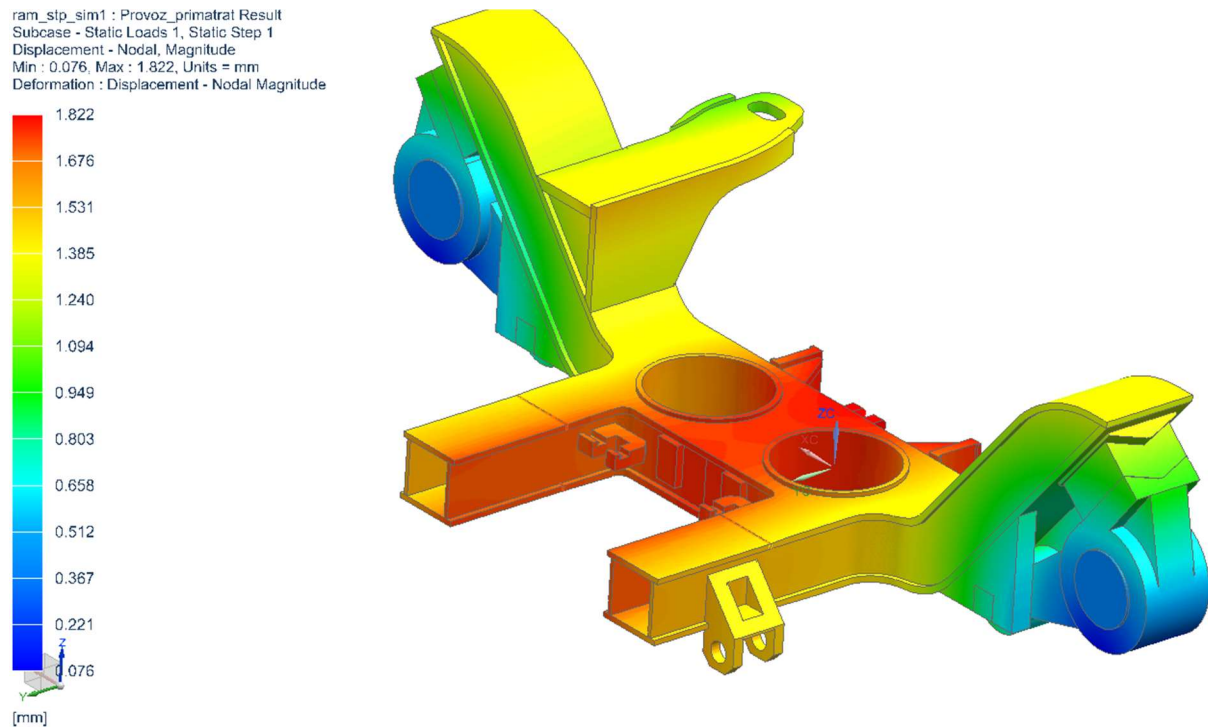
ram_slp_sim1 : Provoz_primatrati Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 175.50, Units = MPa
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 63 Průběh napětí – provozní zatížení – jízda po přímé trati

Hodnota nejvyššího redukovaného napětí, metodou Von-Mises, nabývá 175,50 MPa. Toto napětí je nižší, než je dovolená hodnota, a proto lze rám podvozku označit za pevnostně vyhovující. Vzhledem k tomu, že při tomto stavu se bude tramvajový podvozek vyskytovat nejčastěji, je zde výhodou nižší napětí s ohledem na únavovou pevnost rámu.

Na následujícím obrázku lze vidět posunutí od deformací v kombinované formě. Největší deformace zde nabývá hodnoty 1,83 mm a jedná se o posunutí střední části podélníku směrem k temeni kolejnice (ve směru působení svislých sil). Vzhledem k celkovým rozměrům rámu ho lze označit za vyhovující z hlediska tuhosti.



Obrázek 64 Posunutí od deformací – provozní zatížení – jízda po přímé trati

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit konstrukční návrh rámu tramvajového podvozku s kyvným ramenem a nápravou. V první části této práce byla provedena rešerše stávajících řešení tramvajových podvozku včetně krátkého pohledu do dob minulých. Z této rešerše vzešly tři koncepční návrhy, přičemž jeden z nich byl vybrán a detailněji konstrukčně zpracován.

Jednotlivé konstrukční prvky navrženého podvozku byly rozděleny do kapitol, kde bylo ke každé z vlastností zmíněno její klíčové vlastnosti. Byl navržen podvozek pro normální rozchod kolejí – 1 435 mm. Rozvor navrženého podvozku je 1 800 mm a jeho výška od temena kolejnice je 645 mm. Pro rám podvozku byl navržen materiál S355NL dle technických dodacích podmínek EN 10025-2.

V následujících kapitolách došlo k výpočtu sil zatěžujících rám podvozku. K tomuto výpočtu bylo využito norem ČSN EN 15827 - Požadavky na podvozky a pojezdy; ČSN EN 13749 - Dvojkolí a podvozky – Metoda specifikování konstrukčních požadavků na rámy podvozků a v neposlední řadě normy ČSN EN 15663 - Definice referenčních hmotností vozidla. Na základě těchto norem byly získány síly pro jednotlivá zatížení podvozku, které jsou základně rozdělena na výjimečná a provozní. Na všechny jízdní stavy byla následně ověřena statická pevnost rámu podvozku.

Pevnost rámu podvozku byla ověřena pomocí metody konečných prvků. Nejprve byl rám podvozku zjednodušen na jednu polovinu, protože se jedná defacto o symetrický podvozek, přičemž symetrii kazí pouze konzoly pro uložení motoru. Tímto byl následný výpočet usnadněn a zkrácen. Dále je v práci popsán postup tvorby sítě, uložení rámu podvozku vůči souřadnému systému a další podrobnosti.

Každý z jízdních stavů podvozku, který v realitě může nastat, byl pevnostně vyhovující. Nejvyššího napětí bylo dosaženo při jízdním stavu při výjimečném zatížení při průjezdu výhybkou. Výsledné redukované napětí – 238,38 MPa – při tomto jízdním stavu se blíží dovolené hodnotě napětí. Nicméně, je zde předpoklad, že tento jízdní stav v realitě nenastává příliš často. Z toho důvodu byly následně ověřeny i jízdní stavy provozní, které se v realitě již vyskytují mnohem častěji. Nejvyššího redukovaného napětí je zde dosaženo při průjezdu výhybkou a nabývá hodnoty 194,53 MPa. Ani jedno z nejvyšších redukovaných napětí není v místech svaru, tudíž se dá navržený rám podvozku prohlásit za pevnostně vyhovující.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HELLER, Petr. Kolejová vozidla I. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.
- [2] HELLER, Petr. Kolejová vozidla II. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2019. ISBN 978-80-261-0773-6.
- [3] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. Kolejová vozidla III. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN 978-80-261-0028-7.
- [4] Elektrická dráha na Letné v Praze. Wikipedia [online]. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_dr%C3%A1ha_na_Letn%C3%A9_v_Praze
- [5] Brno, 140 let MHD (84), vozovna Pisárky. Wikipedia [online]. [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Brno,_140_let_MHD_\(84\),_vozovna_Pis%C3%A1rky,_Vario_LF2-podvozek.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Brno,_140_let_MHD_(84),_vozovna_Pis%C3%A1rky,_Vario_LF2-podvozek.jpg)
- [6] JANČAR, Rost'a. Výroba tramvaje pro Prahu trvá půl roku. V každé jsou kilometry kabelů. idnes.cz [online]. 2011 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/reportaze/vyroba-tramvaje-pro-prahu-trva-pul-roku-v-kazde-jsou-kilometry-kabelu.A110714_184458_tec_reportaze_rja
- [7] Podvozky [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.nymwag.cz/produkty/podvozky/>
- [8] Podvozky nákladních vozů ČSD/ČD [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.parostroj.net/katalog/nv/clanky/Podvozky/podvozky.php3>
- [9] Podvozky typu Fiat (Y 32) [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/pojezdy/fiat/fiat.html>
- [10] Koňka vozila Pražany tři desetiletí. Naposledy vyjela před 110 lety [online]. 2015 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/praha/zpravy/posledni-konka-projela-prahou-pred-110-lety.A150512_2161798_praha-zpravy_bur
- [11] KOLEJNICE: Třinecké železárny [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.trz.cz/modul_werk_vyrobky/img/nakres_zlabkova.png
- [12] Compact tapered bearing units [online]. SKF [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.skf.com/my/industries/railways/solutions/compact-tapered-bearing-units>
- [13] COMPACT TAPER ROLLER BEARING LIVES UP TO ITS NAME [online]. SKF [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968033953a-Compact_taper_roller_bearing_lives_up_to_its_name_2004_E3_EN_tcm_12-162159.pdf#cid-162159
- [14] Pryžové pružiny [online]. vagony.cz [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.vagony.cz/pojezdy/vypruzeni/pryzove_pruziny.html
- [15] Bogie engineering in Finnish: a special challenge [online]. Prose [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: https://www.prose.one/DesktopModules/PRO_CaseHistory/files_ch/7-3_002.pdf
- [16] Katalog firmy Bombardier

[17] J. Kolář, Modern Trends in the Drive Wheelsets of Rail Vehicles [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-319-22762-7_5/MediaObjects/340388_1_En_5_Fig9_HTML.gif

[18] TRAMVAJ FORCITY SMART PLZEŇ [online]. Plzeň: Škoda Transportation Group, 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/admin/wp-content/uploads/2021/06/Skoda-ForCity-Smart-Plzen-CZ-EN.pdf>

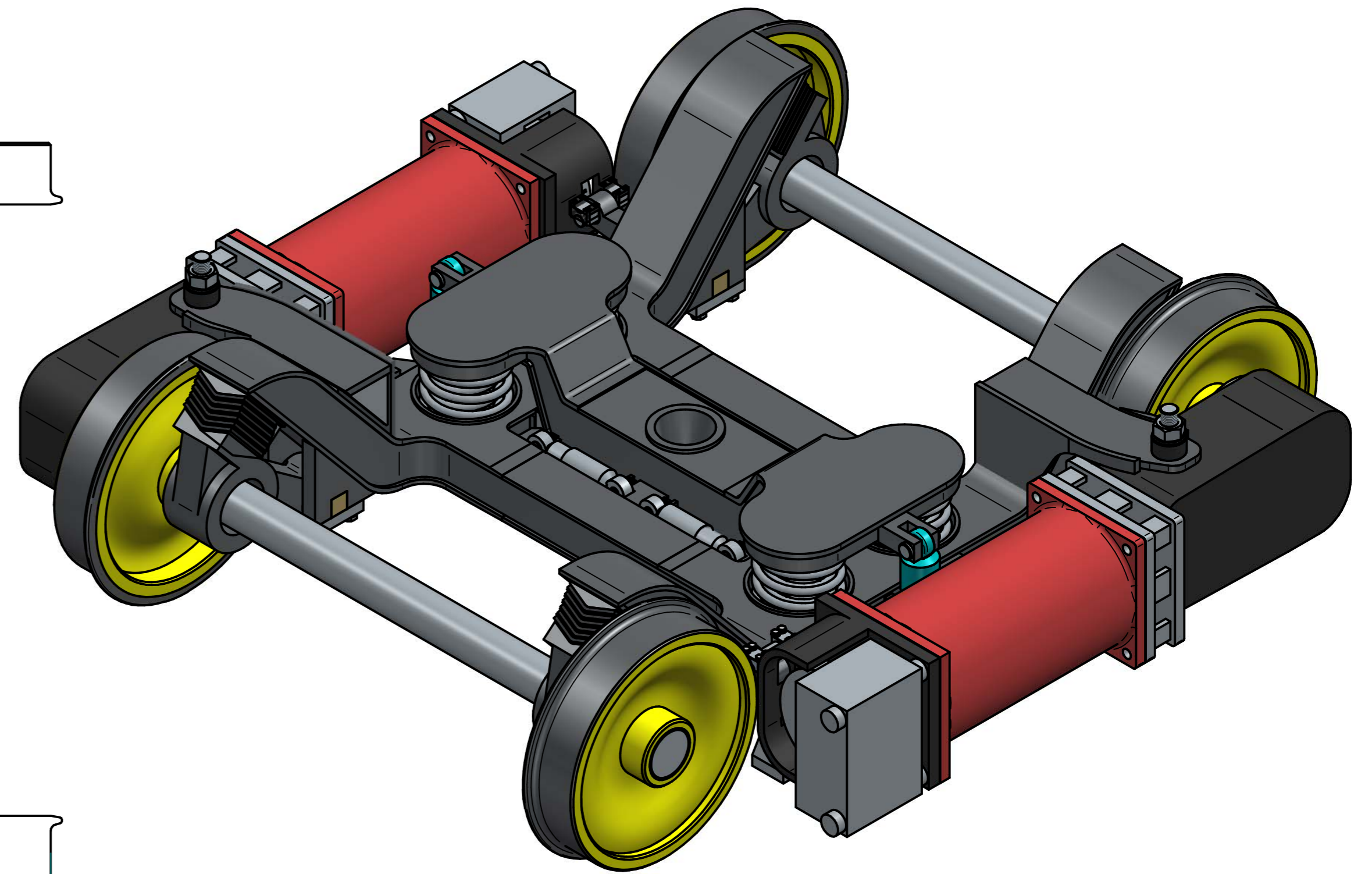
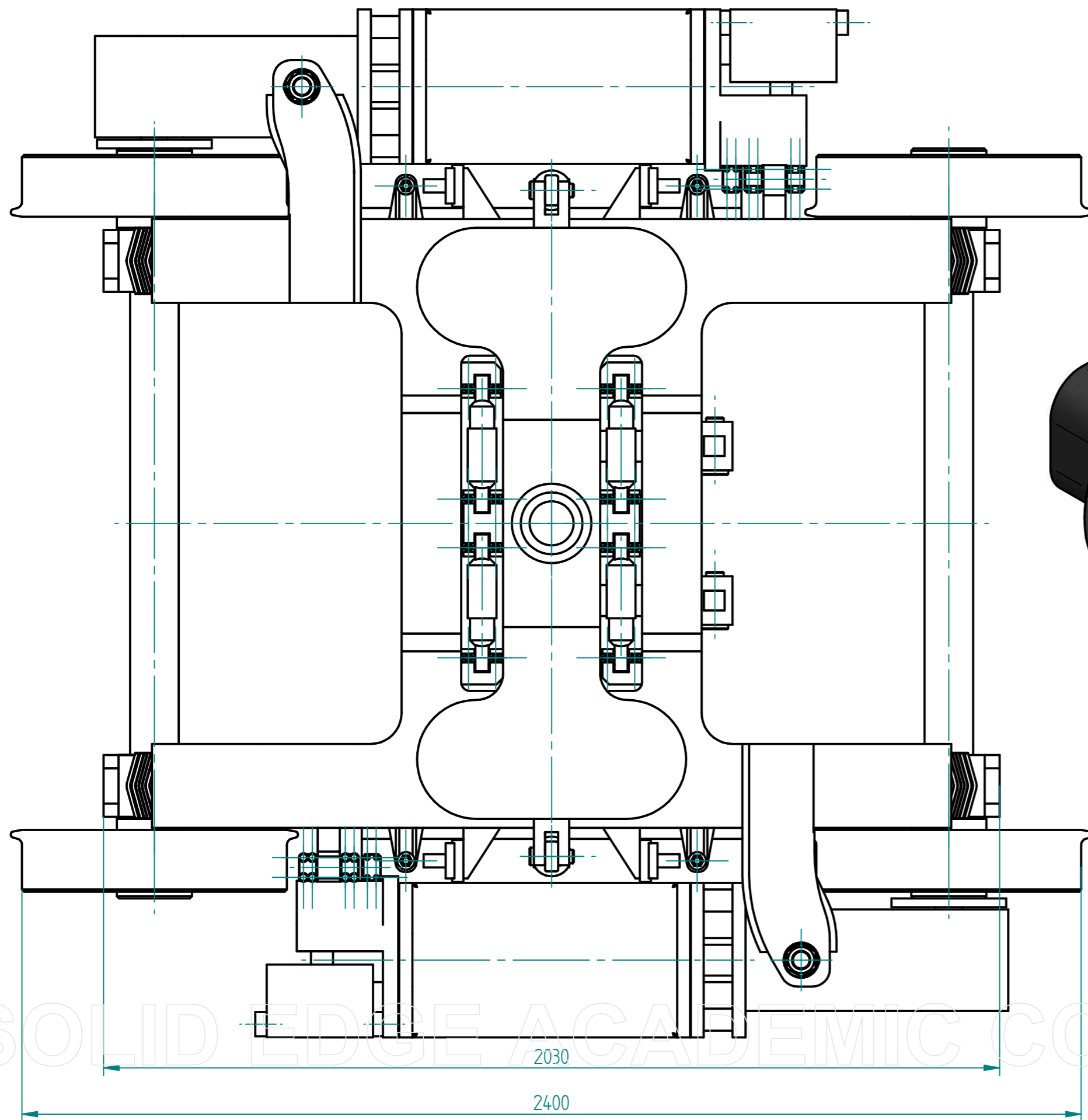
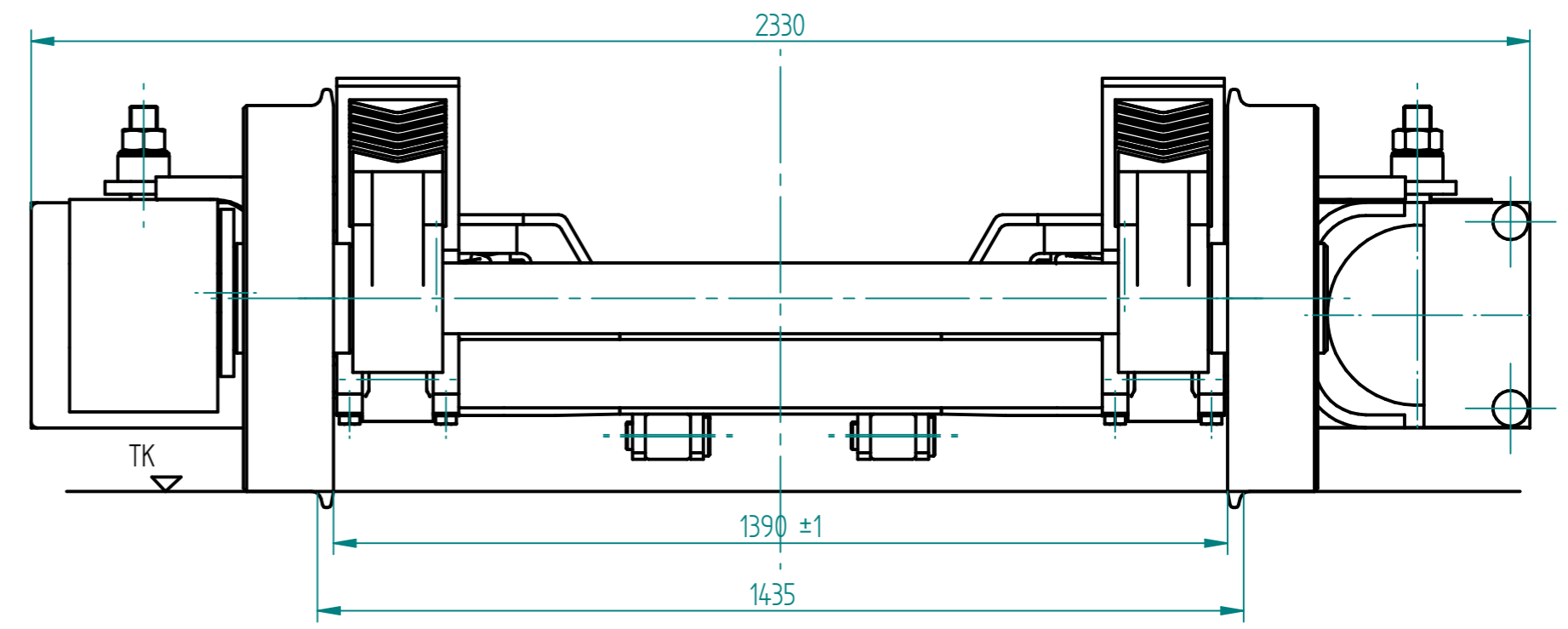
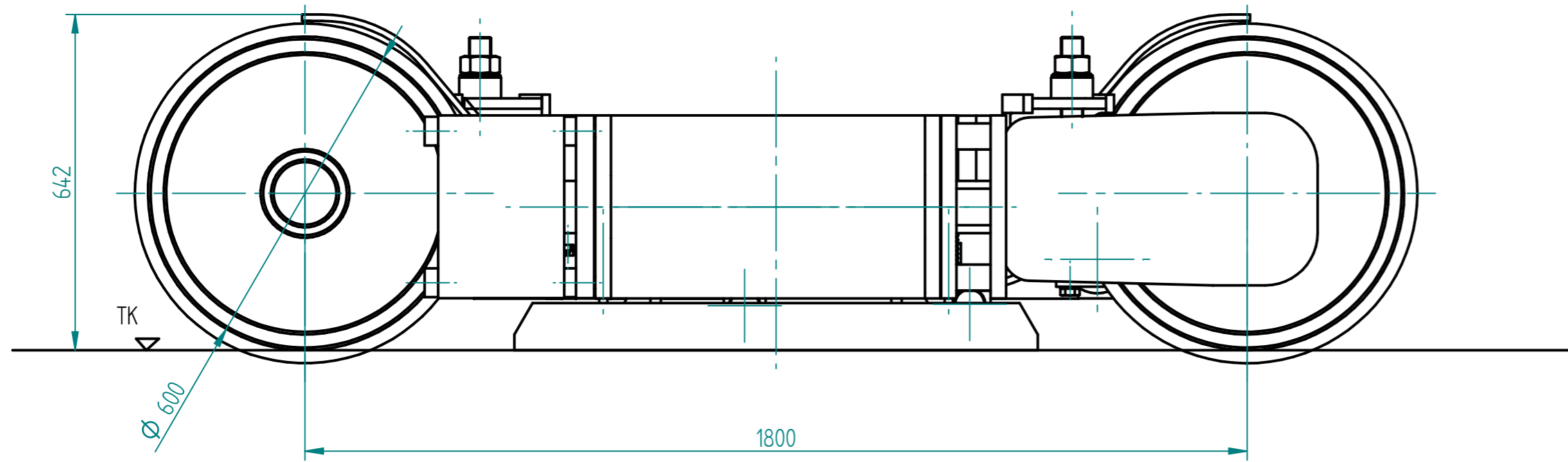
Seznam obrázků

Obrázek 1 Záběr uličního prostoru [3]	4
Obrázek 2 První elektrická tramvaj v Praze [4].....	4
Obrázek 3 Koněspřežná tramvaj – Praha r. 1905 [10].....	5
Obrázek 4 Žlábková kolejnice [11].....	5
Obrázek 5 Procento nízké podlahy [3].....	7
Obrázek 6 Průjezdny průřez pro jednokolejnou tramvajovou trať [3]	8
Obrázek 7 Podvozek Y25 [7].....	9
Obrázek 8 Podvozek KOMFORT [5].....	10
Obrázek 9 Podvozek KOMFORT Plus [3]	11
Obrázek 10 Podvozek tramvaje Avanto SF 70 [3]	11
Obrázek 11 Podvozek tramvaje For City [6]	12
Obrázek 12 Nápravnice podvozku For City [3].....	12
Obrázek 13 Podvozek tramvaje For City pro krajní článek [6]	13
Obrázek 14 Otočný podvozek Prose [15]	14
Obrázek 15 Flexx Urban 1000 [16]	15
Obrázek 16 Podvozky Flexx Urban 2000 a 2500 [16]	16
Obrázek 17 Podvozek iXege Alstom[17]	17
Obrázek 18 Koncepční varianta A	18
Obrázek 19 Koncepční varianta B	19
Obrázek 20 Koncepční varianta C	20
Obrázek 21 Přenos tažných sil.....	20
Obrázek 22 Vlastní návrh podvozku.....	22
Obrázek 23 Ložisková jednotka CTBU[13]	23
Obrázek 24 Kyvné rameno	23
Obrázek 25 Uchycení kyvného ramene k rámu	24
Obrázek 26 Sekundární vypružení – Řez podvozkem.....	24
Obrázek 27 Kolébka	25
Obrázek 28 Půdorysný pohled na kolébku - umístění tlumičů příčných pohybů.....	25
Obrázek 29 Přenos sil v příčném směru - řez kolébkou	26
Obrázek 30 Přenos tažných sil.....	26
Obrázek 31 Rám podvozku.....	27
Obrázek 32 Postupný přechod mezi tloušťkami plechů příčnicku	27
Obrázek 33 Uchycení motoru k rámu podvozku	28
Obrázek 34 Uchycení převodovky.....	28

Obrázek 35 Kolejnicová brzda – uložení.....	29
Obrázek 36 Trakční motor s převodovkou a brzdou	29
Obrázek 37 Průjezdny průřez.....	30
Obrázek 38 Průjezdny průřez s podvozkem	30
Obrázek 39 Materiály dle EN [2].....	31
Obrázek 40 Materiály dle ČSN [2]	31
Obrázek 41 Vlastnosti materiálu S355NL	31
Obrázek 42 Souřadny systém podvozku [2]	32
Obrázek 43 Parametry tramvaje Škoda 40T [18]	33
Obrázek 44 Výpočtový model pro MKP	38
Obrázek 45 Zasiťovaný výpočtový model.....	39
Obrázek 46 Spojení sítí – nahrazení svarových spojů	40
Obrázek 47 Spojení ramen s podvozkem.....	40
Obrázek 48 Náhrada sekundárního vypružení silou	41
Obrázek 49 Příčné síly	41
Obrázek 50 Vazby rámu podvozku vůči souřadnicovému systému – náprava	42
Obrázek 51 Vazba symetrie	42
Obrázek 52 Odebrání volnosti v ose.....	43
Obrázek 53 Průběh napětí – výjimečné zatížení - výhybka.....	44
Obrázek 54 Posunutí od deformací - osa Z – výjimečné zatížení - výhybka	45
Obrázek 55 Posunutí od deformací – osa Y – výjimečné zatížení – výhybka.....	45
Obrázek 56 Posunutí od deformací – osa X – výjimečné zatížení – výhybka.....	46
Obrázek 57 Průběh napětí – výjimečné zatížení – jízda v oblouku.....	47
Obrázek 58 Posunutí od deformací – výjimečné zatížení – jízda obloukem.....	47
Obrázek 59 Průběh napětí – provozní zatížení – výhybka	48
Obrázek 60 Posunutí od deformací – provozní zatížení – výhybka	48
Obrázek 61 Průběh napětí – provozní zatížení – jízda v oblouku	49
Obrázek 62 Posunutí od deformací – provozní zatížení – jízda v oblouku	49
Obrázek 63 Průběh napětí – provozní zatížení – jízda po přímé trati.....	50
Obrázek 64 Posunutí od deformací – provozní zatížení – jízda po přímé trati.....	51

Seznam tabulek

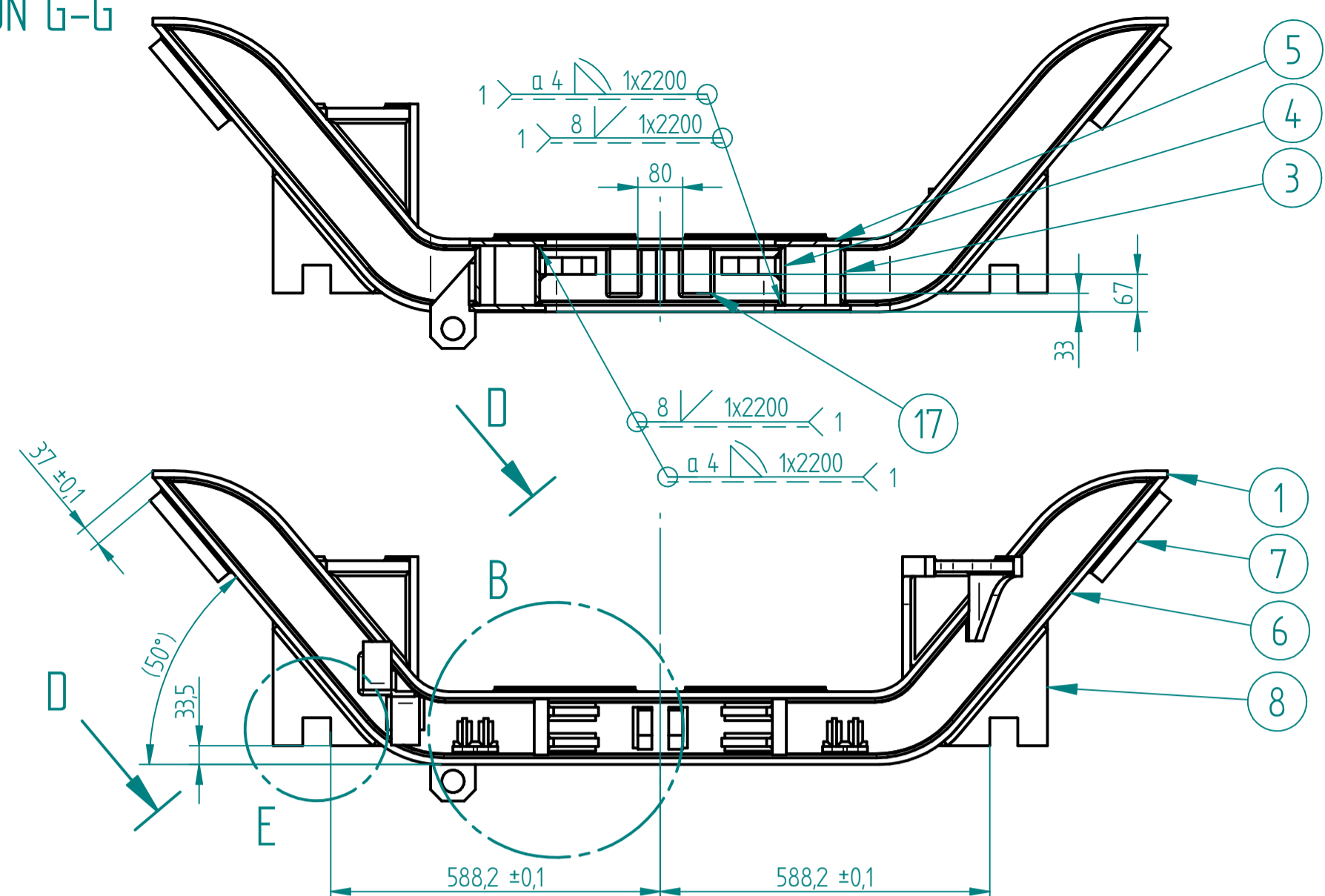
Tabulka 1 Podvozek Prose [15]	14
Tabulka 2 Technické parametry podvozku Flexx Urban 1000[16]	15
Tabulka 3 Rozhodovací analýza	21
Tabulka 4 Základní rozměry navrženého podvozku.....	22
Tabulka 5 Zatížení P1 a P2 pro daný typ podvozku, dle normy ČSN EN 15663[2].....	33
Tabulka 6 Zrychlení podvozku pro výjimečné zatížení.....	34
Tabulka 7 Zrychlení podvozku pro normální zatížení.....	34
Tabulka 8 Výjimečná zatížení podvozku.....	38
Tabulka 9 Provozní zatížení podvozku.....	39



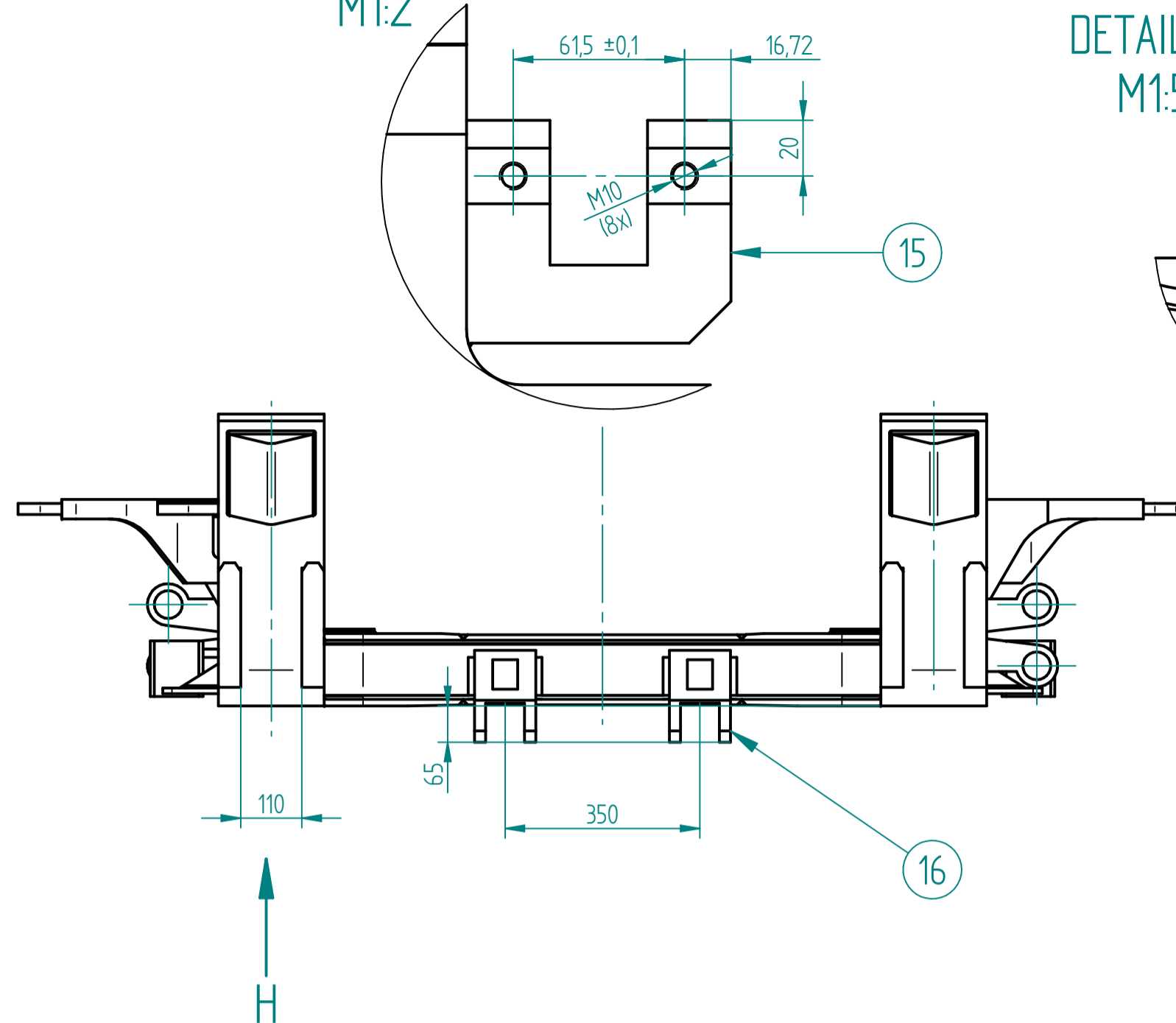
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Hmotnost (kg)	3650	Promítání	Formát	A2
	Kreslil	Bc. CAJTHAML Jan	Název	TRAM. PODVOZEK	
	Datum	3. 5. 2022	Schválil	Číslo dokumentu	KKS-DP-00
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Datum		Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	
	List 1 Listů 1				

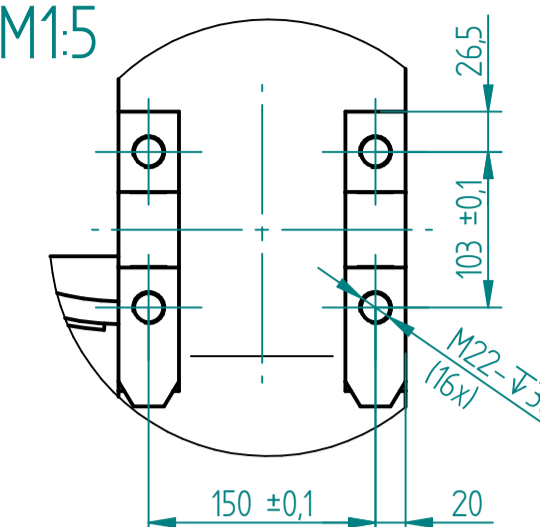
SECTION G-G



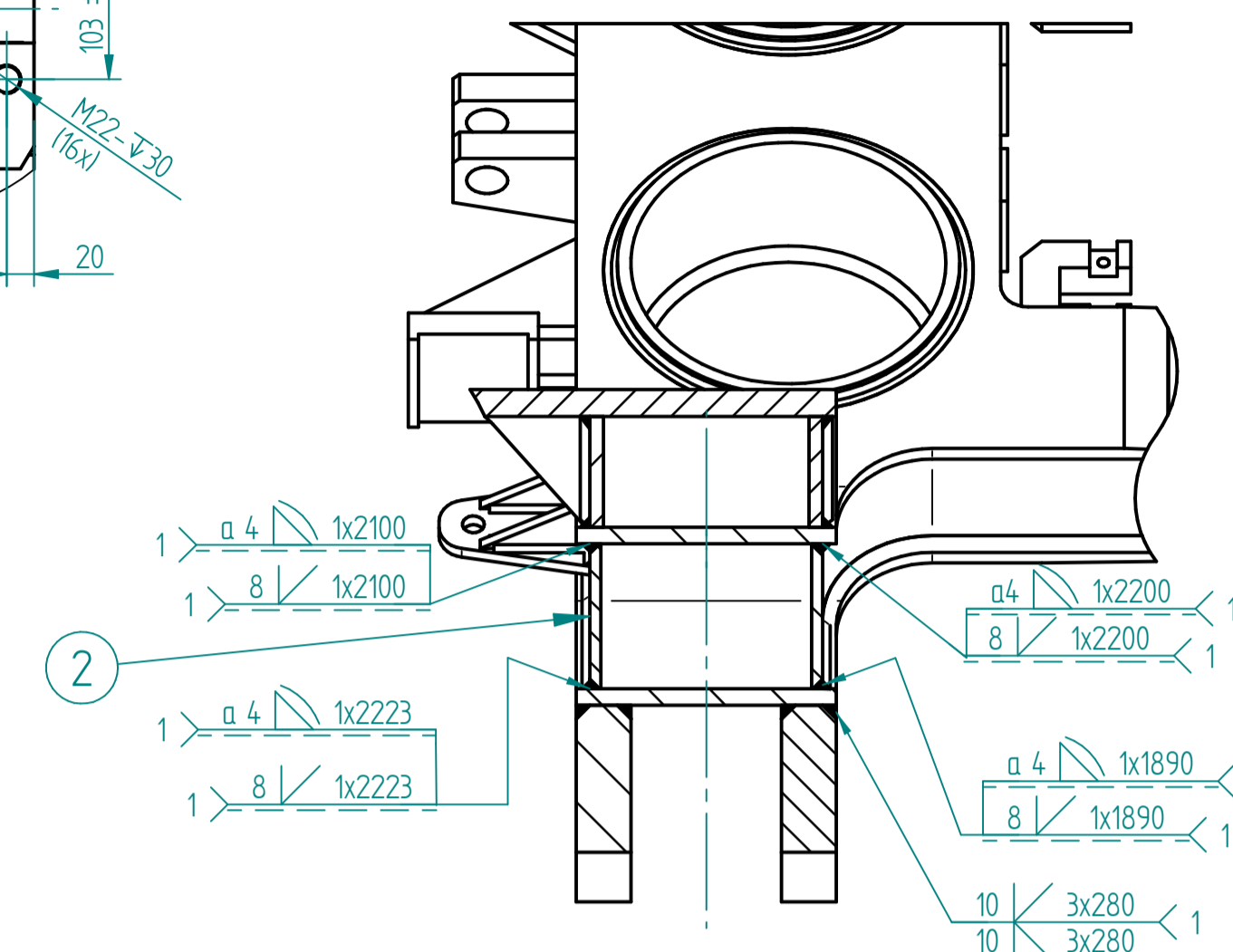
DETAIL F
M1:2



DETAIL C
M1:5



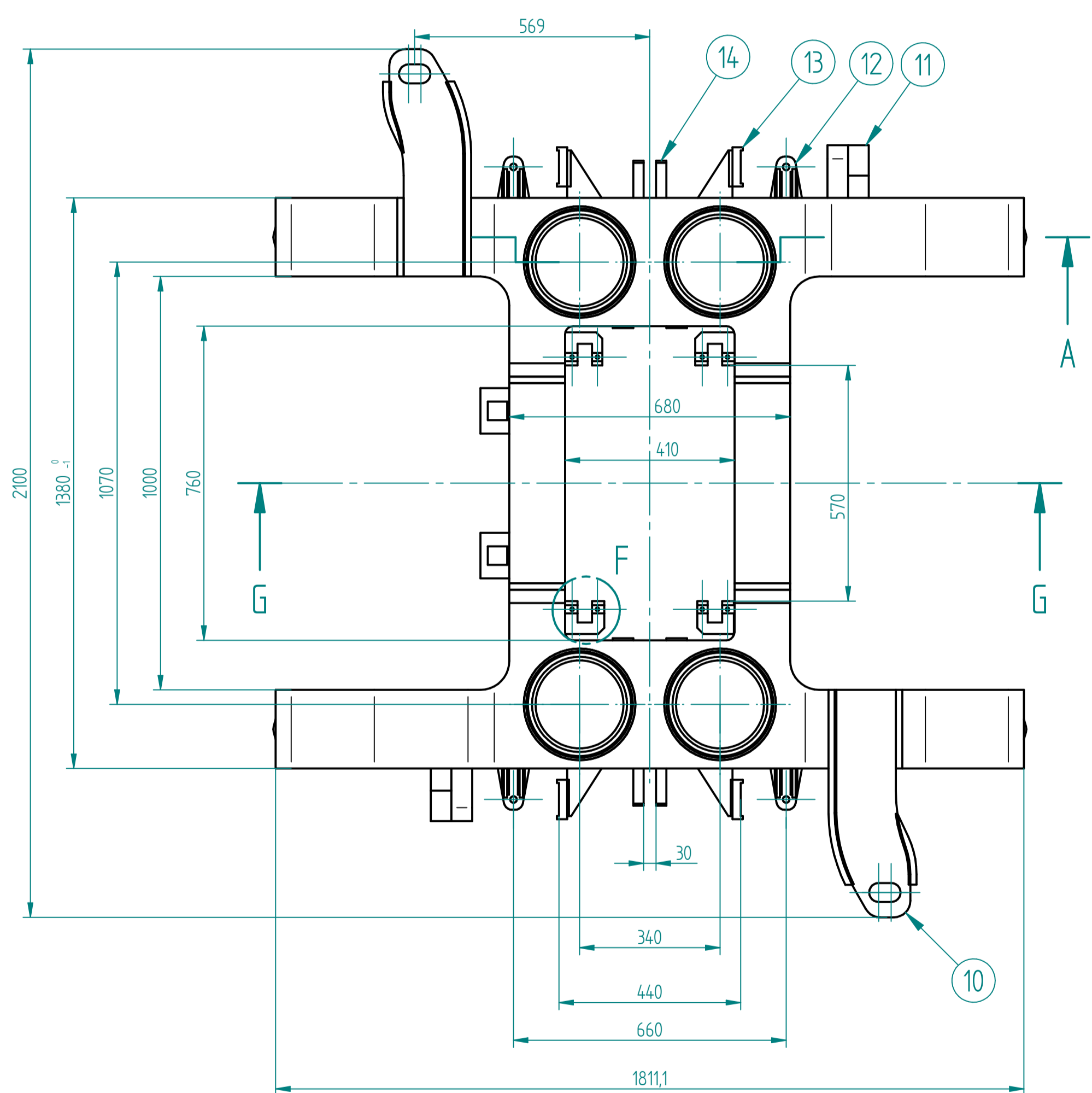
SECTION D-D
M1:5 Rotated 50°



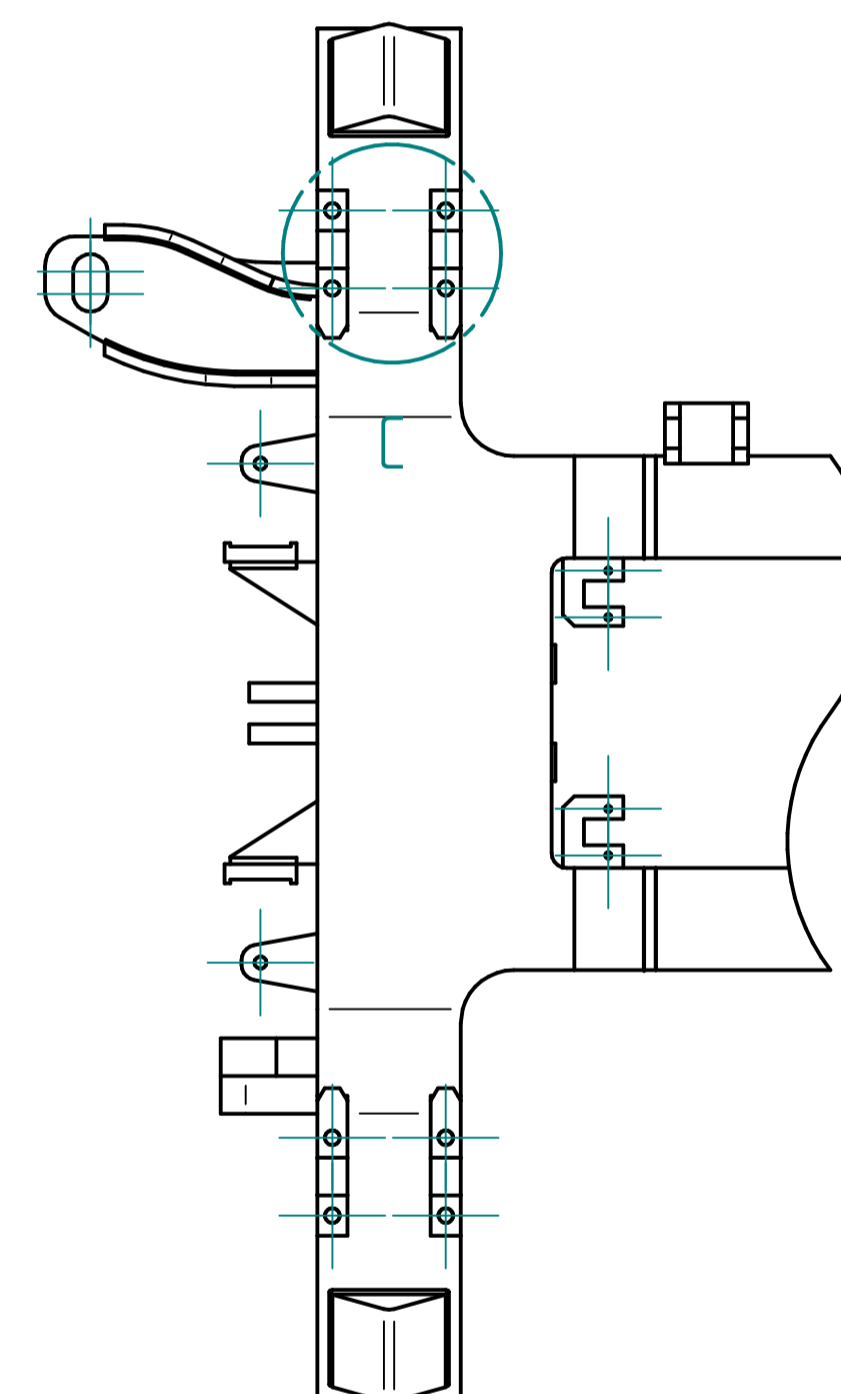
1. SVAŘENO 135 EN440 - G42 5 M G3S11
2. POD VŠEMI V SVARÝ PODLOŽKA
3. PŘI ROVNÁNÍ NECHLADIT VODOU
4. NEROVNOSTI SVARŮ V MÍSTECH JEJICH
NAPOJOVÁNÍ PLYNULE VYBROUŠENY
5. VŠECHNY OSTRÉ HRANY A OTŘEPY SRAŽENY
6. RÁM PODVOZKU ŽIHAT NA ODSTRANĚNÍ PNUTÍ, TEPLOTA 600±10°C,
PRODĚVA 2 hod., CHLADNUTÍ RYCHLOSTÍ MAX 150°C/hod DO TEPLOTY 150°C
7. ROVNÁNÍ RÁMU PODVOZKU NENÍ PO ŽIHÁNÍ DOVOLENO
8. BARVIT: RAL7011 - EMAIL POLYURETANOVÝ DVOUSLOŽKOVÝ



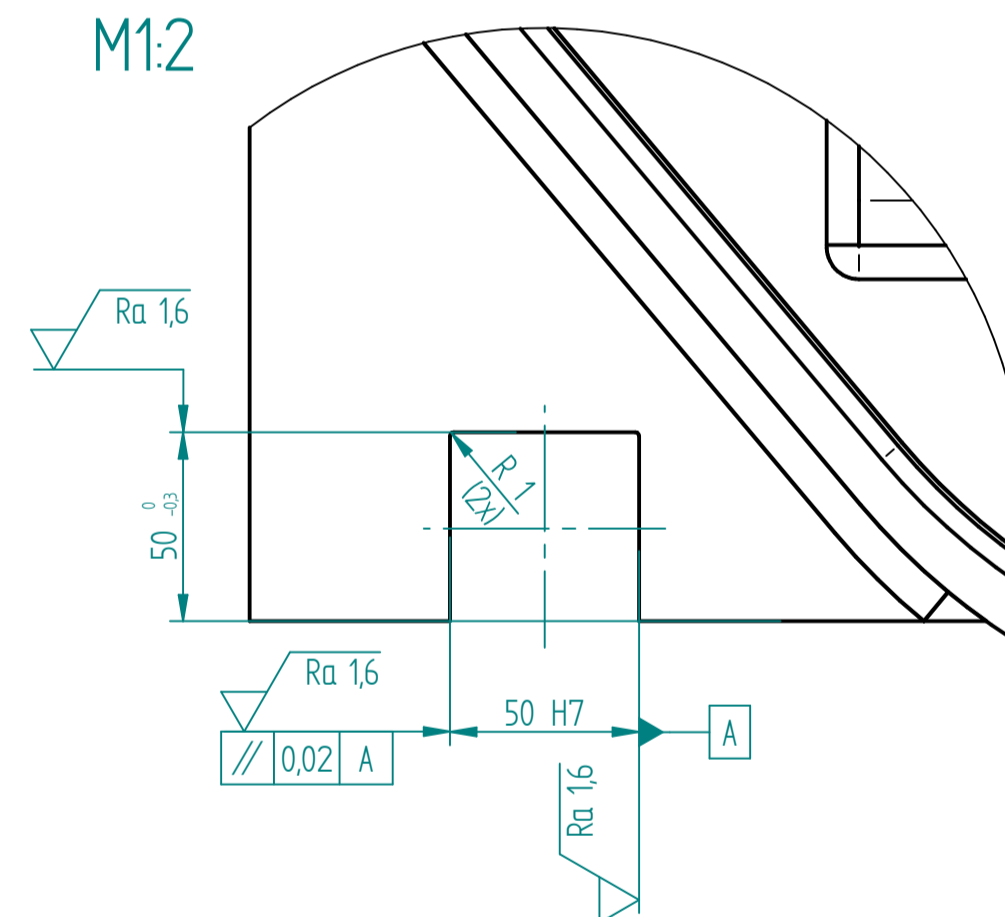
A



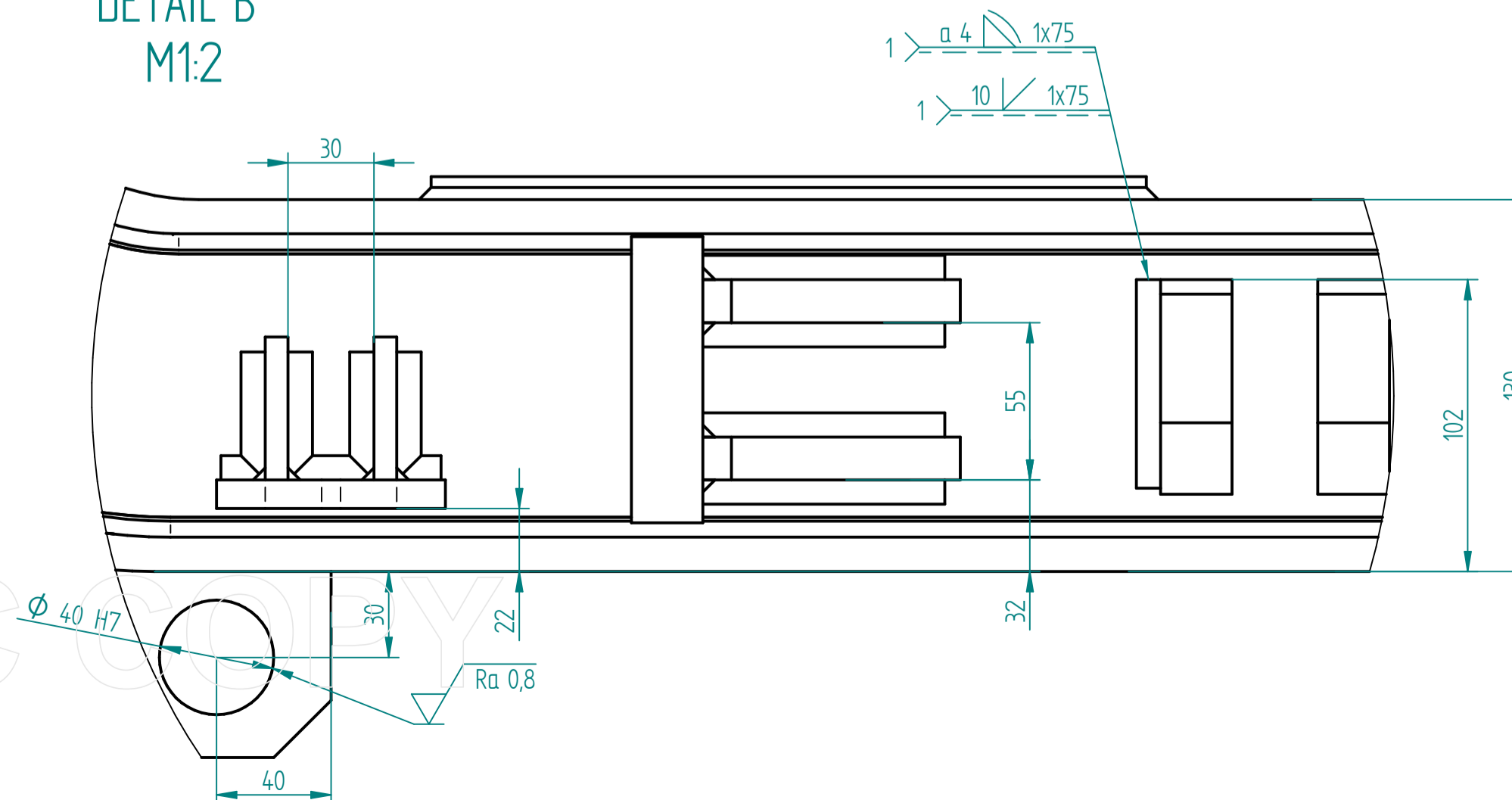
VIEW H



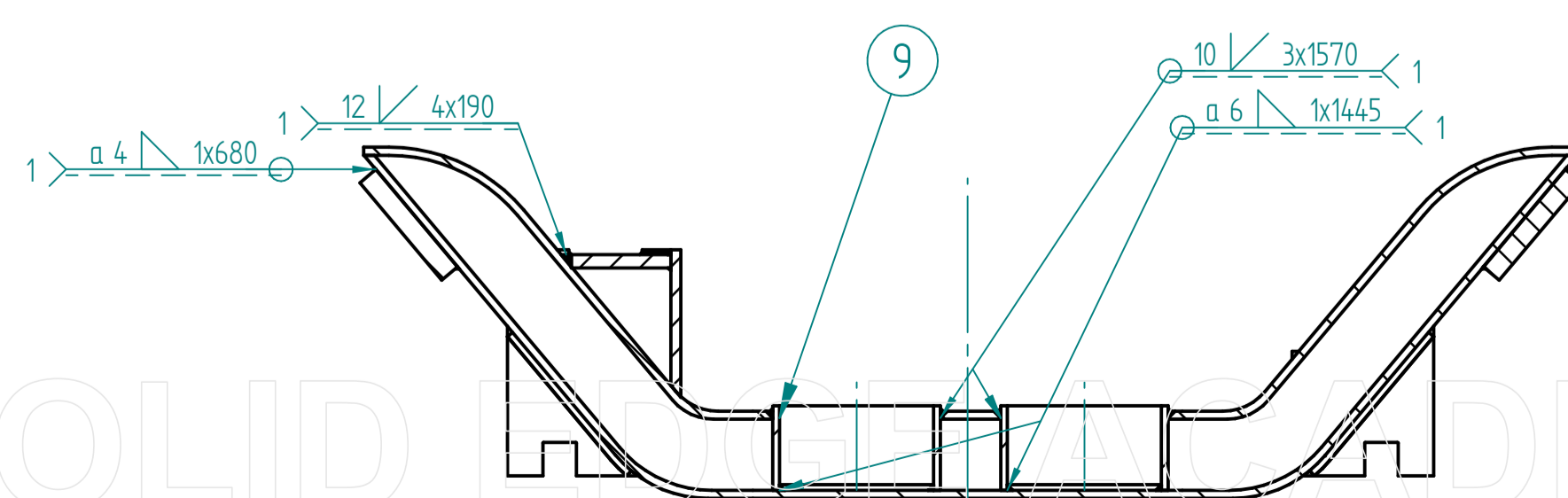
DETAIL E
M1:2



DETAIL B
M1:2



SECTION A-A



17	NARAZKA KKS-DP-17.00	S355NL (1.0546)	1	KS	4
16	PRENOS TAZNYCH SIL - OKO KKS-DP-16.00	S355NL (1.0546)	15	KS	2
15	OKO - TLUMIE - PRICNY KKS-DP-15.00	S355NL (1.0546)	1	KS	4
14	OKO - TLUMIE KKS-DP-14.00	S355NL (1.0546)	2	KS	4
13	NARAZKA - BRZDA KKS-DP-13.00	SESTAVA	5	KS	4
12	KONZOLE - BRZDA KKS-DP-12.00	SESTAVA	5	KS	4
11	OKO KKS-DP-11.00	S355NL (1.0546)	2	KS	4
10	KONZOLE - PREVODOVKA KKS-DP-10.00	SESTAVA	25	KS	2
9	TRUBKA KKS-DP-09.00	S355NL (1.0546)	23	KS	4
8	PLECH KKS-DP-08.00	S355NL (1.0546)	13	KS	8
7	BLOK KKS-DP-07.00	S355NL (1.0546)	18	KS	4
6	PLECH PODELNIK SPODNI KKS-DP-06.00	S355NL (1.0546)	127,5	KS	2
5	PLECH PRICNIK KKS-DP-05.00	S355NL (1.0546)	30	KS	4
4	PLECH PRICNIK BOCNI-vnitř KKS-DP-04.00	S355NL (1.0546)	69	KS	2
3	PLECH PRICNIK BOCNI KKS-DP-03.00	S355NL (1.0546)	107	KS	2
2	PLECH PODELNIK BOCNI KKS-DP-02.00	S355NL (1.0546)	84	KS	2
1	PLECH PODELNIK HORNÍ KKS-DP-01.00	S355NL (1.0546)	114	KS	2

Číslo polož.	Název - označení	Material (dle tdp EN10025-2)	Hmotn. (kg)	J.	Množ.
Měřítko	Číslo výkresu - označení normy				
1:10	Hmotnost (kg)	1508	Promítání		Formát
	Kreslil	Bc. CAJTHAML Jan			A1
	Datum	3. 5. 2022			
	Schválil				
	Datum				
KKS	KATEDRA KONSTRUKOVÁNÍ STROJŮ	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	Název	RÁM PODVOZKU
				Číslo dokumentu	KKS-DP-00.00
					List 1 Listů 1