

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh nápravnice pro tramvajové vozidlo, včetně volně otočných kol

Autor: **Jiří Vik**

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

Akademický rok 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří VIK**
Osobní číslo: **S13B0284P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Návrh nápravnice pro tramvajové vozidlo, včetně volně otočných kol.**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Nápravnice musí obsahovat dosedací plochy pro uložení primárního vypružení a konzolu pro kotoučovou brzdu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše, specifikace požadavků
2. Konstrukční návrh nápravnice
3. Zhodnocení konstrukčního návrhu nápravnice
4. Výrobní výkres vybrané části
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla III.* Plzeň: ZČU - KKS, 2011

DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla I.* Plzeň: ZČU - KKS, 2010

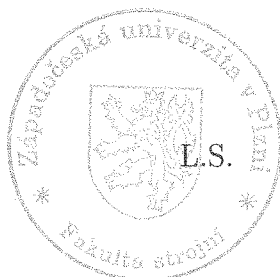
LEINVEBER, J., ŘASA, J. VÁVRA, P. *Strojnické tabulky třetí upravené vydání.*
Praha: Scientea, 1999

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**
Regionální technologický institut
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Kořínek**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **21. září 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 21. září 2015

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vik	Jméno Jiří	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Heller, CSc.	Jméno Petr	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh nápravnice pro tramvajové vozidlo, včetně volně otočných kol		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	81	TEXTOVÁ ČÁST	57	GRAFICKÁ ČÁST	24
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem práce je návrh vhodného konstrukčního řešení nápravnice tramvajového vozidla včetně volně otočných kol. Nápravnice obsahuje konzolu pro kotoučovou brzdu a otvory primárního vypružení. Pomocí metody konečných prvků je ověřena pevnost navržené konstrukce. Výpočet je proveden v programu Siemens NX 9. CAD modely jsou provedeny v programu Autodesk Inventor Professional 2016.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>kolejová vozidla, nízkopodlažní tramvaje, podvozky tramvajů, dvojkolí s nápravnicí, pevnostní analýza, CAD, MKP</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Vik	Name Jiří	
FIELD OF STUDY	B2301 “Transport and handling machinery“		
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	Mechanical design of axlebridge of tramcar including the two independent wheels		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	81	TEXT PART	57	GRAPHICAL PART	24
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Aim of this work is mechanical design of axlebridge of low floor streetcar. Mechanical design includes the independent wheels. Axlebridge includes bracket of hydraulic brake and wholes of primery suspension. With the help of FEA is checked mechanical design. FEA is made in Siemens NX 9. CAD design is made in Inventor Profesional 2016.
KEY WORDS	light rail vehickles, streetcars, streetcar bogies, wheel set with axlebridge, stress analyses, CAD, FEM

Poděkování

Rád bych především poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Doc. Ing. Petrovi Hellerovi, CSc. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky k této práci.

Obsah

1	Úvod	11
2	Úvod do nízkopodlažních tramvají	12
2.1	Důvod vzniku nízkopodlažních tramvají.....	12
2.2	Nízká podlaha	12
2.3	Konstrukční řešení nízké podlahy	12
2.4	Koncepce nízkopodlažních tramvají	13
2.5	Vybrané nízkopodlažní tramvaje.....	14
2.5.1	Alstom.....	14
2.5.2	Siemens.....	15
2.5.3	Bombardier	17
2.5.4	Škoda Transportation.....	19
2.5.5	Končar.....	21
3	Podvozky nízkopodlažních tramvají.....	23
3.1	Základní charakteristika nízkopodlažních tramvajových podvozků	23
3.2	Dělení podvozků pro nízkopodlažní tramvaje.....	23
3.2.1	Neotočné podvozky	23
3.2.2	Otočné podvozky	23
3.3	Konstrukční řešení podvozků nízkopodlažních tramvají z hlediska dvojkolí	23
3.3.1	Podvozky nízkopodlažních tramvají se standardním dvojkolím	23
3.3.2	Podvozky nízkopodlažních tramvají s nápravnicí a volně otočnými koly	24
3.4	Popis vybraných neotočných podvozků	24
3.4.1	Podvozek Corège (Alstom).....	24
3.4.2	Combino plus SF 30 C TFW/LFW	25
3.4.3	DG 1000 (Končar – Sames).....	26
3.4.4	S 1000 (Bombardier)	27
3.4.5	S 1100 Incentro (Bombardier)	28
3.4.6	S 3400 Eurotram (Bombardier)	29
3.5	Popis vybraných otočných podvozků.....	30
3.5.1	Podvozek tramvaje Škoda 15T For City.....	30
4	Dvojkolí nízkopodlažní tramvaje s nápravnicí	32
4.1	Nápravnice.....	32
4.2	Kola nízkopodlažní tramvaje.....	32
4.2.1	Tlumení hluku.....	32
4.2.2	Celistvé kolo s tlumičem hluku	32

4.2.3	Složené kolo.....	33
4.3	Primární vypružení	34
4.4	Brzdy	34
4.5	Pohon volně otočných kol	34
5	Konstrukční návrh.....	36
5.1	Požadavky na konstrukci	36
5.2	Možné způsoby výroby nápravnice	36
5.2.1	Odlitek	36
5.2.2	Výkovek.....	36
5.2.3	Odlitek + svařenec	36
5.2.4	Výkovek + svařenec.....	36
5.3	Porovnání jednotlivých technologií výroby	37
5.4	Součásti nápravnice a jejich možné konstrukční řešení	37
5.4.1	Příčník.....	37
5.4.2	Odlitek	37
5.4.3	Sestava volně otočného kola.....	38
5.5	Shrnutí konstrukčního provedení nápravnice	38
5.6	Materiál.....	38
5.6.1	Materiál odlitku.....	38
5.6.2	Materiál příčnicku.....	39
5.6.3	Materiál součástí volně otočného kola.....	39
6	Výpočty	40
6.1	Norma ČSN EN 13103	40
6.1.1	Schéma působících sil.....	40
6.1.2	Síly působící na nápravnici.....	40
6.1.3	Výpočet sil působících na nápravnici	41
6.2	Výpočet brzdné síly	42
6.2.1	Výpočet celkové brzdné síly.....	42
6.2.2	Výpočet brzdné síly na konzoly nápravnice	43
6.3	Výpočet kolových ložisek	43
6.3.1	Kuželíkové ložisko SKF 33220	44
6.3.2	Kuželíkové ložisko SKF 32218 J2/Q.....	45
6.3.3	Kontrola ložisek na kilometrovou životnost L_s	46
6.4	Pevnostní analýza metodou konečných prvků.....	47

7	Zhodnocení konstrukčních uzlů	50
7.1	Nápravnice	50
7.1.1	Odlitek	50
7.1.2	Svařenec příčniku	51
7.2	Volně otočné kolo.....	52
7.2.1	Uložení volně otočného kola a těsnění	53
8	Závěr	54
9	Zdroje.....	55

Zkratky

CTETRA10	-	(tetraedr) čtyřstěn s deseti uzly
G	-	těžiště
MKP	-	metoda konečných prvků
NX 9	-	výpočetní software
Obr.	-	obrázek
Tab.	-	tabulka
TK	-	temeno kolejnice
ULF	-	(ultra low floor) extrémně nízká podlaha

Značky

$2b$	mm	-	příčná rozteč primárního vypružení
$2s$	mm	-	vzdálenost styčných kružnic
m	kg	-	hmotnost
G	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	-	tíhové zrychlení
P_1, P_2	kN	-	svislé síly
Y_1, Y_2	kN	-	příčné síly
H	kN	-	příčná síla jako rozdíl sil Y_1, Y_2
Q_1, Q_2	kN	-	reakční síly
h_1	mm	-	výška těžiště
F_B	kN	-	brzdná síla
M_B	Nm	-	moment od brzdné síly
R	mm	-	poloměr nového kola
r	mm	-	střední poloměr brzdového kotouče
r_1	mm	-	střední poloměr uchycení brzdy
F_R	kN	-	radiální síla
F_a	kN	-	axiální síla
K_a	[-]	-	porovnávací koeficient pro výpočet přídavné axiální síly z katalogu kuželíkových ložisek SKF
C	kN	-	dynamická únosnost ložiska
e	[-]	-	poměr axiální a radiální síly
Y	[-]	-	Součinitel, přepočítávající axiální zatížení na radiální
F_e	kN	-	ekvivalentní síla
L_s	km	-	kilometrová životnost ložiska

1 Úvod

Tato práce si bere za cíl konstrukční návrh nápravnice nízkopodlažního tramvajového vozidla. Návrh má obsahovat volně otočná kola, konzoly pro kotoučovou brzdu a dosedací plochy primárního vypružení. Bakalářská práce obsahuje teoretickou část a praktickou část. Teoretická část se věnuje rešerši nízkopodlažních tramvají a jejich podvozků. Praktická část obsahuje konstrukční řešení, výpočet nápravnice pomocí MKP, zhodnocení konstrukčních uzlů a výkres sestavy nápravnice s volně otočnými koly, výkres sestavy nápravnice a výkres součástí nápravnice.

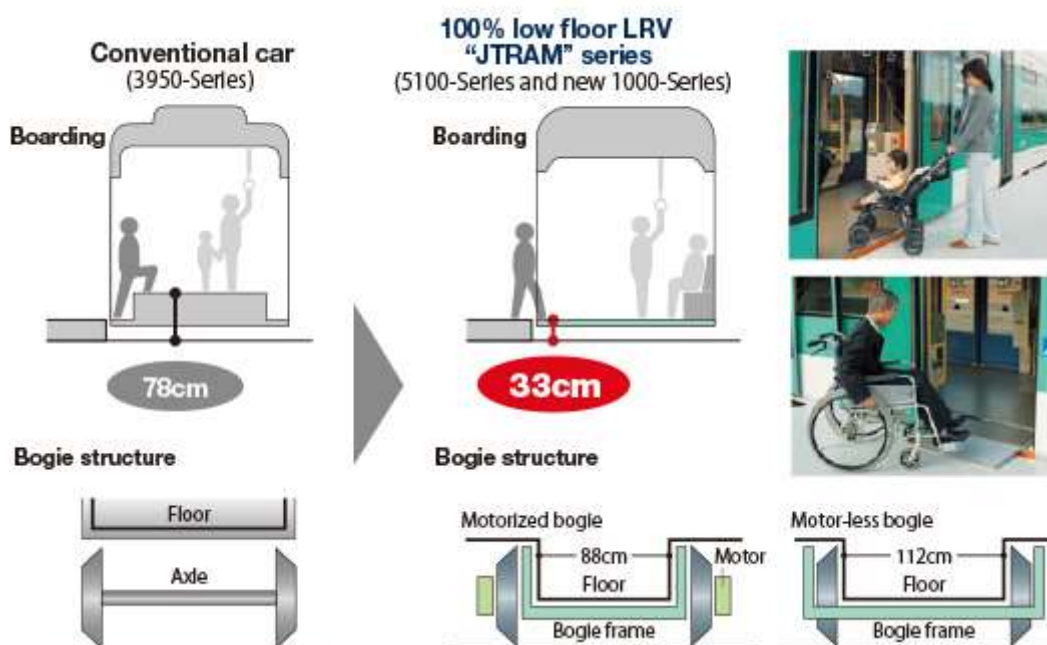
2 Úvod do nízkopodlažních tramvají

2.1 Důvod vzniku nízkopodlažních tramvají

Nízkopodlažní tramvaje začali vznikat začátkem 90. let 20. století. Hlavním důvodem stavby těchto tramvají nebylo zvýšení přepravní kapacity, ale zvýšení rychlého nástupu a výstupu cestujících. Dále dosavadní vysokopodlažní vozidla představovala obtížné nastupování pro cestující se sníženou pohyblivostí, cestující s kočárky a na invalidním vozíku. Z toho důvodu se začali konstruovat tramvaje s nízkou podlahou. (1)

2.2 Nízká podlaha

Mnoho nízkopodlažních tramvají nemá nízkou podlahu v celé délce prostoru pro cestující. Z tohoto důvodu se definuje parametr % nízké podlahy. Nízká podlaha se nachází ve výšce 350 mm nad temenem kolejnice, ovšem výška nástupní hrany může být 290 mm. Nástupní hrana se nachází výše než nástupní hrana ostrůvku, která je ve výšce 180-200 mm, z důvodu snazšího nástupu a také instalaci nástupní plošiny pro nástup cestujících s kočárky či cestujících na invalidním vozíku. (1)



Obrázek 1 Porovnání podvozků s a bez nápravnice (11)

2.3 Konstrukční řešení nízké podlahy

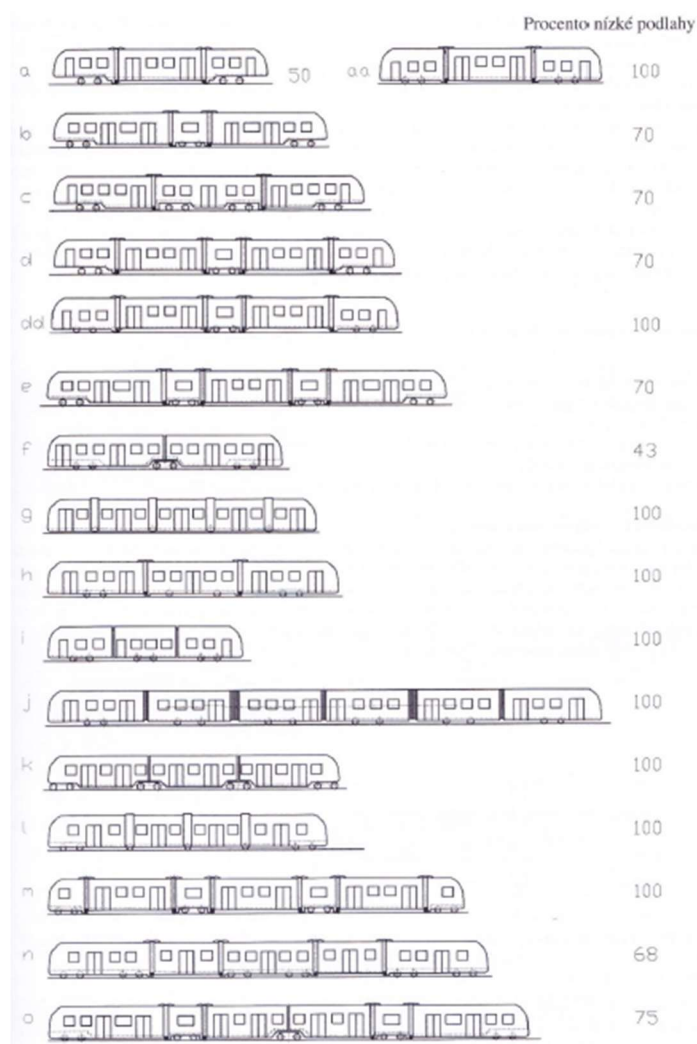
Problémem pro instalaci nízké podlahy je umístění podvozku. Obvyklé trakční podvozky s dvojkolím znemožňují vytvoření nízké podlahy v celé délce vozidla. Možností, jak vytvořit alespoň částečně nízkopodlažní tramvajové vozidlo je více. Jedním z řešení je, použití podvozků klasické koncepce, nad kterými bude vysoká podlaha a ta bude s nízkou podlahou spojena 2 až 3 schody. Dále je možné zmenšení průměru kol u běžného podvozku. Mezi vysokou a nízkou podlahou je buď jeden schod, nebo šikmá rampa. Tato řešení, ale neslouží k vytvoření 100% nízkopodlažní tramvaje, neboť výška podlahy pod podvozkem je cca. 450

mm. Proto se začali uplatňovat řešení podvozků za použití nápravnice. Toto řešení umožňuje umístění nízké podlahy mezi kola. Vzniklá ulička mezi koľy by měla být alespoň 600 mm široká. (1)

Další konstrukční problém je umístění synchronních a asynchronních motorů, které se starají o pohon vozidla. Motory nesmí bránit vytvoření nízké podlahy. Z toho důvodu se motory umísťují vně dvojkolí. Dále je nutné přesunout výzbroj tramvaje, která je u vysokopodlažních tramvajů na spodku vozu na střechnu vozu. S tím vzniká problém vedení kabeláže k trakčním motorům a řešení jejich délkové rezervy, v případě natáčení podvozku. (4)

2.4 Koncepte nízkopodlažních tramvajů

Od devadesátých let vznikla spousta variant koncepcí nízkopodlažních tramvajů. V dnešní době se vyrábějí především článkové tramvaje. Na článková vozidla je kladeno mnoho požadavků, z nichž nejdůležitější je průjezdnost horizontálními a vertikálními oblouky. Hlavní roli u článkových vozidel hraje podvozek. Ten je buď otočný, nebo neotočný. Podrobněji o podvozcích je pojednáváno v kapitole 3. Následující obrázek zobrazuje vybrané koncepte nízkopodlažních tramvajových vozidel. Koncepte jsou řazeny od a do o a číslo za tramvajů představuje procento nízké podlahy. (1)



Obrázek 2 Koncepte nízkopodlažních článkových tramvajů (1)

- a) Tříčlanková tramvaj s dvěma klasickými neotočnými podvozky pod krajními články a prostředním neseným. Nízká podlaha je nad prostřením článkem.
- aa) Tříčlanková tramvaj s dvěma nízkopodlažními neotočnými podvozky pod krajními články. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- b) Tříčlanková tramvaj s otočnými podvozky pod krajními články a prostředním kloubově spojeným článkem s neotočným podvozkem. Nízká podlaha je za otočnými podvozky.
- c) Tříčlanková tramvaj s otočným podvozkem pod krajním článkem a dvěma otočnými podvozky pod prostředním článkem. Nízká podlaha je mezi otočnými podvozky.
- d) Pětičlanková tramvaj s neotočnými podvozky pod krajními a prostředním článkem. Články bez podvozků jsou zavěšené. Nízká podlaha je mezi krajními podvozky.
- dd) Podobná koncepce jako v případě d, avšak tato tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- e) Pětičlanková tramvaj se dvěma otočnými podvozky pod krajními články a dvěma neotočnými podvozky pod krátkými články. Nízká podlaha je za krajními podvozky.
- f) Dvoučlanková kloubová tramvaj se třemi podvozky, kde všechny jsou trakční. Nízká podlaha je mezi podvozky.
- g) 100% nízkopodlažní vícečlanková tramvaj s jednonápravovými podvozky. Podvozky jsou umístěny v portálu mezi články.
- h) Tříčlanková tramvaj s dvěma otočnými podvozky pod krajními články a dvěma jednonápravovými podvozky pod prostředním článkem. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- i) Tzv. brémská tramvaj se třemi neotočnými podvozky pod každým článkem. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- j) Šestičlanková tramvaj s neotočnými podvozky pod každým článkem. Články jsou spojeny kloubově. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- k) Tříčlanková tramvaj se čtyřmi otočnými podvozky. Dva jsou pod čelem a dva pod kloubovým spojením článků. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- l) Čtyřčlanková tramvaj s dvěma otočnými podvozky pod čelem a jednonápravovými podvozky mezi portály. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- m) Sedmičlanková tramvaj s neotočnými trakčními podvozky pod krajním článkem a dvěma neotočnými podvozky pod vnitřními články. Tramvaj je 100% nízkopodlažní.
- n) Pětičlanková tramvaj se čtyřnápravovými moduly s otočnými podvozky pod krajními a prostředním článkem.
- o) Šestičlanková tramvaj s otočnými trakčními podvozky pod krajními články a dvěma neotočnými podvozky pod krátkým článkem a s prostředním otočným podvozkem spojujícím obě poloviny tramvaje. (1)

2.5 Vybrané nízkopodlažní tramvaje

2.5.1 Alstom

2.5.1.1 Tramvaj Alstom Citadis 302

Jedná se o pětičlankovou tramvaj se třemi neotočnými podvozky. Krajní jsou hnací a prostřední hnaný. Nízká podlaha má 100% délky vozu. Tramvaj Citadis 302 je obousměrná. Pohon

tramvaje zajišťují 4 trakční motory o výkonu 120 kW. Maximální rychlost je 70 km/h. Tramvaj Citadis 302 je v provozu např. v Lyonu. (1)

Tabulka 1 Parametry tramvaje Alstom Citadis 302 (1)

Hlavní parametry vozidla	Citadis 302
Uspořádání pohonu	Bo' + 2' + Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	32420 mm
Šířka skříně	2400 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	56
Maximální počet cestujících (4 os. /m ²)	201
Výkon trakčních motorů	4x120 kW
Maximální rychlost	70 km/h



Obrázek 3 Tramvaj Alstom Citadis 302 (12)

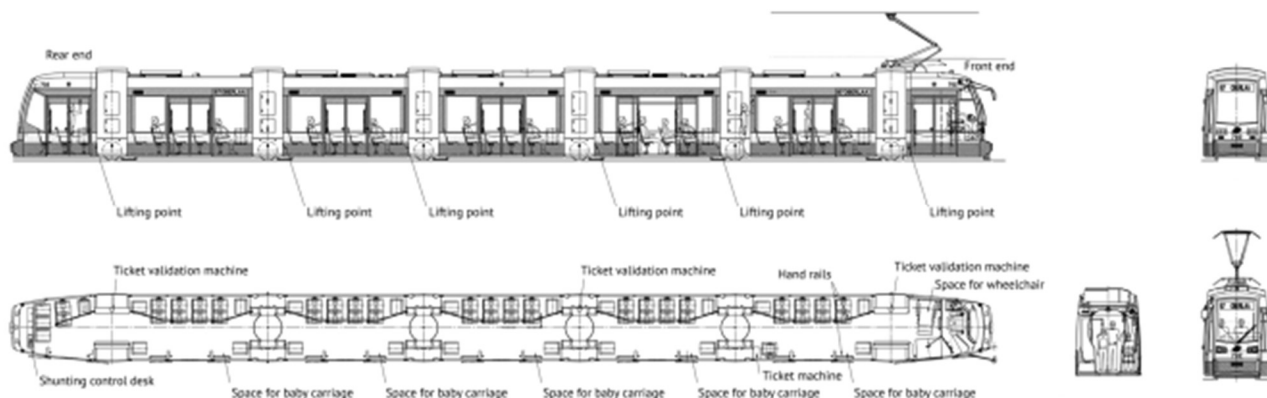
2.5.2 Siemens

2.5.2.1 Siemens ULF

Jedná se o vícečlánkové vozidlo s jednonápravovými podvozky umístěnými v portále mezi články. Tato koncepce podvozků umožňuje výšku nízké podlahy 197 mm od temene kolejnice. Přední a zadní článek je pevně spojen s portálem a ostatní články umožňují díky upevnění k portálu sférický pohyb. Tramvaj umožňuje díky své velmi nízké podlaze rychlou výměnu cestujících, ale v zimních obdobích kvůli své velmi nízké výšce může namrznat. Pohon zajišťují 4 popř. 8 trakčních motorů o výkonu 80 kW. Tato tramvaj jezdí např. ve Vídni. (1)

Tabulka 2 Parametry tramvaje Siemens ULF (1)

Hlavní parametry vozidla	ULF 197 - 4	ULF 197 - 6
Uspořádání pohonu	1' + A' + A' + A'	1' + A' + A' + A' + A' + 1'
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Délka přes spřáhlo	24 210 mm	35 470 mm
Šířka skříně	2400 mm	2400 mm
Podíl nízké podlahy	100%	100%
Počet sedadel	42	66
Maximální počet cestujících (4 os. /m2)	94	141
Výkon trakčních motorů	4x80kW	8x80kW
Maximální rychlost	70 km/h	70 km/h



Obrázek 4 Tramvaj Siemens ULF (13)

2.5.2.2 Tramvaj Siemens Combino Plus

Jedná se o vícečlánkovou tramvaj, která je tvořena 3 dvojicemi článků. Neotočné podvozky se nacházejí pod každým článkem. Nízká podlaha je v celé délce vozidla. Pohon tramvaje zajišťuje 8 trakčních motorů o výkonu 100 kW. Maximální rychlost je 70 km/h. Vozidla Siemens Combino plus jezdí např. Budapešti. (1)

Tabulka 3 Parametry tramvaje Siemens Combino Plus (1)

Hlavní parametry vozidla	Combino plus
Uspořádání pohonu	Bo' + 2' + Bo'+Bo'+2' + Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	53990 mm
Šířka skříně	2400 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	58 + 6 sklopných
Maximální počet cestujících (4 os./m2)	352
Výkon trakčních motorů	8x100 kW
Maximální rychlost	70 km/h



Obrázek 5 Tramvaj Siemens Combino Plus (14)

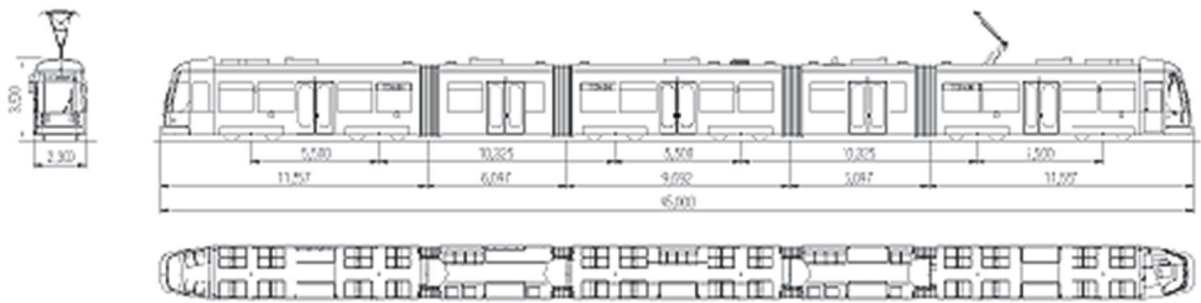
2.5.3 Bombardier

2.5.3.1 Bombardier Flexity Classic

Jedná se o pěti až sedmičlánkové vozidlo. V případě pětičlánkové verze má vozidlo tři čtyřnápravové moduly a dva zavěšené moduly. Podvozky jsou otočné. Tato tramvaj patří k nejdelším vozidlům. Všechna horní kloubová spojení umožňují pohyb do všech směrů tedy rotaci kolem svislé osy, vychýlení v podélném a příčném směru. Pohon tramvaje zajišťuje 8 trakčních motorů o výkonu 85 kW. Tato tramvaj je nízkopodlažní pouze z 68% a jezdí např. v Drážďanech. (1)

Tabulka 4 Parametry tramvaje Flexity Classic Dresden (1)

Hlavní parametry vozidla	Flexity Classic Dresden
Uspořádání pohonu	Bo + 2'2' + Bo'
Rozchod	1450 mm
Délka přes spřáhlo	45 000 mm
Šířka skříně	2300 mm
Podíl nízké podlahy	68%
Počet sedadel	68
Maximální počet cestujících (4 os./m ²)	221
Výkon trakčních motorů	8x85kW
Maximální rychlost	70 km/h



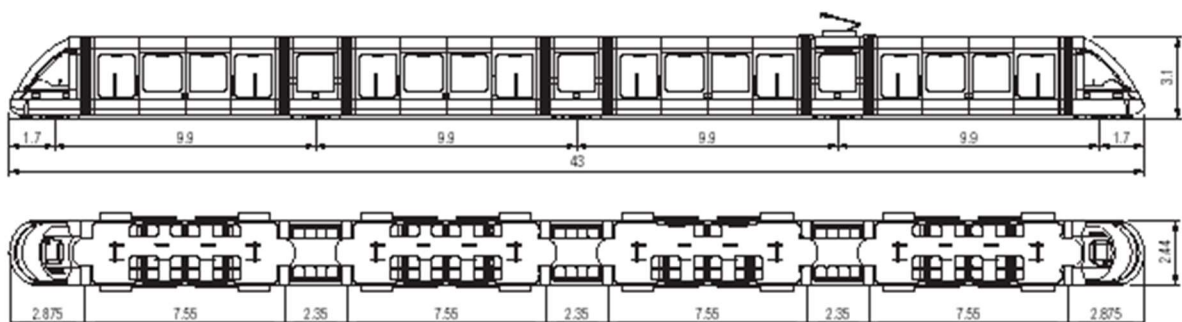
Obrázek 6 Tramvaj Bombardier Flexity Dresden (15)

2.5.3.2 Tramvaj Flexity Outlook

Jedná se o sedmičláňkovou tramvaj. V kapitole 2. 4 se jedná o koncepci m. Tramvaj disponuje pěti dvounápravovými neotočnými podvozky, z nichž dva krajní jsou trakční a tři vložené jsou běžné nebo i trakční. Krajní články jsou pouze kabinou řidiče. Zde může být vysoká podlaha, která je pro řidiče výhodná z hlediska výhledu z kabiny. Krátké vložené podvozkové články jsou nízkopodlažní. Podvozkové články jsou spojeny nízkopodlažním články pro cestující. (1)

Tabulka 5 Parametry tramvaje Bombardier Flexity Outlook pro Strasbourg (16)

Hlavní parametry vozidla	Flexity Outlook Strassbourg
Uspořádání pohonu	Bo + 2' + 2'+ 2' + Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	43000 mm
Šířka skříně	2440 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	92
Maximální počet cestujících (4 os./m2)	264
Výkon trakčních motorů	-
Maximální rychlost	65 km/h



Obrázek 7 Tramvaj Bombardier Flexity Outlook Stasbourg (16)

2.5.4 Škoda Transportation

2.5.4.1 Tramvaj Škoda 14T Porsche

Jedná se o pětičlánkovou jednosměrnou tramvaj s neotočnými podvozky. Tramvaj není v celé své délce nízkopodlažní. Nízká podlaha představuje 50% délky vozidla. Podvozek je umístěn vždy pod lichý článek. Pohon tramvaje zajišťuje dvojice paralelně spojených asynchronních trakčních motorů hnacího podvozku. Výkon jednoho motoru je 90 kW. Design této tramvaje navrhovali designéři z Porsche. Tramvaj jezdí v Praze a Brně. (5)

Tabulka 6 Parametry vozidla Škoda 14T (1)

Hlavní parametry vozidla	Škoda 14T
Uspořádání pohonu	Bo', Bo', Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	30 250 mm
Šířka skříně	2460 mm
Podíl nízké podlahy	50%
Počet sedadel	69
Maximální počet cestujících (4 os./m ²)	279
Výkon trakčních motorů	6x90 kW
Maximální rychlost	60 km/h



Obrázek 8 Tramvaj Škoda 14T (17)

2.5.4.2 Tramvaj Škoda 15T For City

Jedná se o tříčlánkovou tramvaj s dvěma otočnými podvozky, nacházející se pod kabinou řidiče a dvěma otočnými podvozky nacházejících se pod kloubovým spojením článků. Nízká podlaha je v celé délce vozidla. Hnací podvozky mají velmi malou výšku. Pohon kol je uskutečněn synchronními střídavými motory s permanentními magnety. Maximální rychlost je omezena na 60 km/h. Tato tramvaj jezdí v Praze. (1)

Tabulka 7 Parametry tramvaje Škoda 15T (1)

Hlavní parametry vozidla	Škoda 15T
Uspořádání pohonu	Bo', Bo', Bo', Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	31400 mm
Šířka skříně	2460 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	61
Maximální počet cestujících (4 os./m ²)	300
Výkon trakčních motorů	16x45 kW
Maximální rychlost	60 km/h



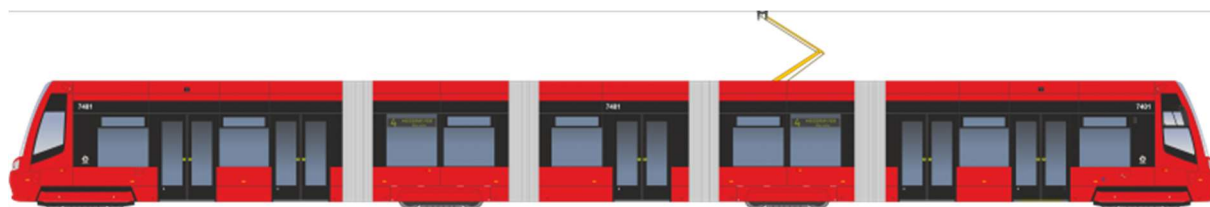
Obrázek 9 Tramvaj Škoda 15T (18)

2.5.4.3 Škoda 29T pro Bratislavu

Škoda 29T je pětičlánkové vozidlo. Krajní články jsou na otočných podvozcích. Tramvaj odpovídá dle kap. 2.4 konceptu e. Podvozky pod krátkými články jsou neotočné. Tři podvozky jsou trakční a jeden běžný. Podíl nízké podlahy je 88% u jednosměrné verze a 92% u obousměrné verze. Pohon zajišťuje 6 asynchronní vodou chlazených motorů o výkonu 100 kW. Maximální rychlost je omezena na 65 km/h. Tramvaj je navržena pro Bratislavu. (19),(20)

Tabulka 8 Parametry tramvaje Škoda 29T (19), (20)

Hlavní parametry vozidla	Škoda 29T
Uspořádání pohonu	Bo', 2', Bo', Bo'
Rozchod	1435 mm
Délka přes spřáhlo	32 495 mm
Šířka skříně	2480 mm
Podíl nízké podlahy	88%, 92%
Počet sedadel	69
Maximální počet cestujících (5 os./m ²)	241
Výkon trakčních motorů	6x100 kW
Maximální rychlost	65 km/h



Obrázek 10 Tramvaj Škoda 29T (20)

2.5.5 Končar

2.5.5.1 Tramvaj TMK 2200

Jedná se o pětičláňkovou tramvaj se třemi neotočnými podvozky pro rozchod 1000 mm. Tramvaj je jednosměrná. Neotočné podvozky jsou umístěny pod lichými články. Tramvaj TMK 2200 je 100% nízkopodlažní. Celkový výkon tramvaje je 390 kW. Maximální rychlost je omezena na 70 km/h. Tramvaj TMK 2200 jezdí např. Záhřebu. (21)

Tabulka 9 Parametry tramvaje Končar TMK 2200 (21)

Hlavní parametry vozidla	TMK 2200
Uspořádání pohonu	Bo', Bo', Bo'
Rozchod	1000 mm
Délka	32000 mm
Šířka skříně	2300 mm
Podíl nízké podlahy	100%
Počet sedadel	46
Maximální počet cestujících (4 os./m ²)	202
Výkon trakčních motorů	6x65 kW
Maximální rychlost	70 km/h



Obrázek 11 Tramvaj Končar TMK 2200 (22)

3 Podvozky nízkopodlažních tramvají

3.1 Základní charakteristika nízkopodlažních tramvajových podvozků

Konstrukce nízkopodlažních tramvajových podvozků je dosti obtížná. Je nutné splnit nárok na umístění nízké podlahy. K docílení nízké podlahy se použije buď podvozek s klasickým dvojkolím, nebo podvozek s nápravnicemi s volně otočnými koly. Rozvor kol je nejčastěji v rozmezí 1800-1900 mm a průměr kol do 600 mm. Podvozek musí umožňovat projetí kolejových oblouků o poloměru menším než i 20 m. Zatížení jedné nápravy musí být do 11 t. (1)

3.2 Dělení podvozků pro nízkopodlažní tramvaje

3.2.1 Neotočné podvozky

Neotočný podvozek je vázán se skříní vozidla tak, aby se mohl vychylovat směrově o 1° až 2° , a to z důvodu, pozvolně narůstající řídicí síly na nabíhající dvojkolí při jízdě v oblouku. Podvozek na přímém úseku tratě nekopíruje nerovnosti. Vhodnou koncepcí je možné neotočný podvozek použít i pro 100% nízkopodlažní tramvaje např. za použití nápravnic a uložení motoru vně dvojkolí. Výhoda je více prostoru pro nízkou podlahu než u otočného podvozků. Značná nevýhoda neotočného podvozků je opotřebenosti okolku kola a kolejnice a s tím i vznikající vyšší hluk za jízdy tramvaje. (1)

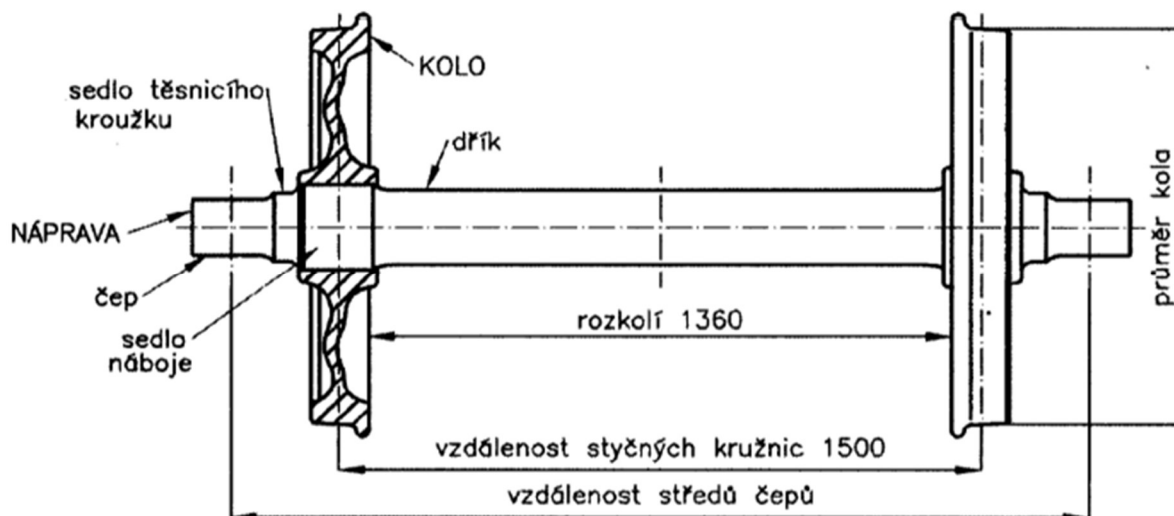
3.2.2 Otočné podvozky

Otočné podvozky jsou připojeny ke skříní vozidla zpravidla otočnými čepy. Otočný čep je buď pevně zalisovaný v podvozku, nebo v rámu skříně. Při jízdě v oblouku je podvozek zcela otočný vůči skříní vozidla. Výhoda otočného podvozků je, že nedochází v takové míře k opotřebenosti kol a kolejnice jako u neotočného podvozků. Nevýhodou je, že z důvodu velkého příčného pohybu kol při jízdě v oblouku je nutné vytvořit v podlaze zvýšenou část, která omezuje šířku uličky. Tento problém se dá omezit vysunutím podvozků co nejvíce k čelu skříně a střed otáčení excentricky situovat mimo střed podvozků, tak aby dvojkolí mělo při průjezdu obloukem co nejmenší příčný pohyb. (1) (6)

3.3 Konstruktivní řešení podvozků nízkopodlažních tramvají z hlediska dvojkolí

3.3.1 Podvozky nízkopodlažních tramvají se standardním dvojkolím

Při použití podvozků se standardním dvojkolím, kde kola jsou pevně nalisována na hřídeli, je nutné zmenšení průměru kol, např. u podvozků S1000 firmy Bombardier mají kola průměr 560 mm. To má však za následek větší namáhání kol, větší odpor při jízdě obloukem a tím snížení jejich životnosti. Pro zajištění delší životnosti je nutné snížit nápravové zatížení na maximálně 85kN. Nad takto řešeným podvozkem není možné docílit výšky nízké podlahy 350 mm, ale cca. 450 mm. Pokud se vytvoří šikmá rampa, která umožní bezbariérový průchod uličkou, lze takovýto podvozek použít i pro 100% nízkopodlažní vozidlo. Trakční motor pohání jedno dvojkolí. (1) (4)



Obrázek 12 Standardní dvojkolí (23)

3.3.2 Podvozky nízkopodlažních tramvají s nápravnicí a volně otočnými koly

Tento koncept podvozku s nápravnicemi umožňuje zajištění více místa pro nízkou podlahu oproti konceptu se standardním dvojkolím i za použití tramvajových kol větších průměrů, který je nejčastěji 660 mm. Na čepích nápravnice jsou nasazena volně otočná kola. Každé kolo je poháněno individuálním trakčním motorem.(4)



Obrázek 13 Nápravnice s volně otočnými koly (Vlastní zdroj)

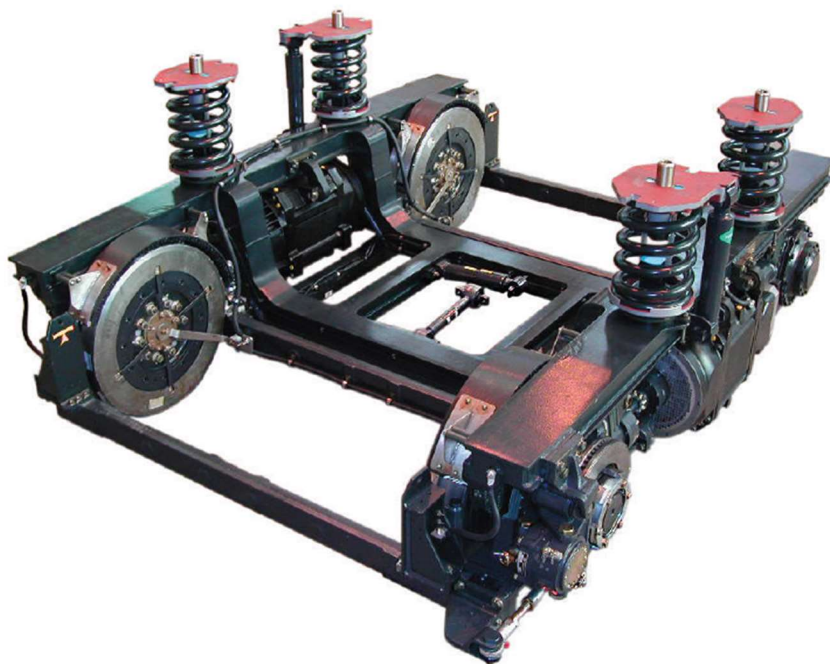
3.4 Popis vybraných neotočných podvozků

3.4.1 Podvozek Corège (Alstom)

Tento podvozek je navržen pro 100% nízkopodlažní tramvaj s rozchodem 1435 mm. Podvozek je neotočný. Výrobce podvozku je firma Alstom. Podvozek je použit např. na tramvaji Citadis 302 pro Rotterdam. Kola podvozku jsou uložena na nápravnicí. Volně otočná kola disponují protihlukovou izolací. Průměr kol je 610/530 mm. Rozvor kol je 1900 mm. K rámu podvozku je namontován podélný trakční motor. Výkon motoru je 120 kW. Podvozek disponuje v případě trakčního podvozku dvěma kotoučovými brzdami a jednou elektrodynamickou brzdou. U běžného podvozku mohou být dvě nebo čtyři kotoučové brzdy a jedna elektrodynamická. Hlavní vlastnosti podvozku jsou shrnuty v následující tabulce. Primární vypružení je zajištěno primárními silentbloky a sekundární helikoidálními pružinami. (24) (25)

Tabulka 10 Parametry podvozku Corege (25)

Hlavní parametry podvozku	Trakční	Běžný
Max. rychlost	70 km/h	70 km/h
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Rozvor kol	1900 mm	1900 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	11 t	11 t
Hmotnost	4,2 t trakční	3,1 t
Typ kola	Složené	Složené
Typ primárního vypružení	Pryžové silenbloky	Pryžové silenbloky
Typ sekundárního vypružení	Helikoidální pružiny	Helikoidální pružiny
Průměr kola nové/opotřebované	610/530 mm	610/530 mm



Obrázek 14 Trakční podvozek Corege (25)

3.4.2 Combino plus SF 30 C TFW/LFW

Tento podvozek je konstruován pro 100% nízkopodlažní tramvaj s rozchodem 1435 mm. Podvozek je neotočný. Výrobce je firma Siemens. Nízká podlaha je ve výšce 350 mm. Podvozek nepoužívá standardního dvojkolí, ale volně otočných kol uložených na nápravnici. Podvozek je instalován v ose skříně a je vertikálně pohyblivý o ca. 4.5°. Kola disponují protihlukovou izolací a mají průměr 600/520 mm. Rozvor kol je 1800 mm. Vedení kol a zároveň primární vypružení zajišťují pryžové silenbloky. Sekundární vypružení obstarávají 4 pryžové silenbloky s paralelními tlumiči. Krátkou tažně tlačnou tyčí jsou přenášeny podélné síly z rámu podvozku na skříň vozidla. Ta je na obou koncích uložena v silenblocích. Podvozek TFW je trakční a podvozek LFW je běžný. TFW podvozek disponuje kotoučovou brzdou

v hnacím agregátu vedle motoru, jehož výkon je 100 kW. LFW podvozek má brzdový kotouč kola vně podvozku. Brzdová jednotka se nachází na rámu podvozku a je orientována dovnitř podvozku. Výhodou podvozku je jednoduchá údržba bez potřeby montážní jámy. Například trakční jednotka může být odmontována a znova namontována bez nutnosti zvedání vozidla či odmontování podvozku. Maximální rádius oblouku, který je podvozek schopen projet je 15 m.
(1)

Tabulka 11 Parametry podvozku Combino plus SF 30 C TFW/LFW (26)

Hlavní parametry podvozku	TWF	LWF
Max. rychlost	70 km/h	70 km/h
Rozchod	1000/1435 mm	1000/1435 mm
Rozvor kol	1800 mm	1800 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	10 t	10 t
Hmotnost	4,3 / 4,5 t	3 / 3,2 t
Typ kola	Složené	Složené
Typ primárního vypružení	Pryžové silenbloky	Pryžové silenbloky
Typ sekundárního vypružení	Pryžové silenbloky s paralelními tlumiči	Pryžové silenbloky s paralelními tlumiči
Průměr kola nové/opotřebované	600/520 mm	600/520 mm



Obrázek 15 Podvozek Siemens Combino plus SF 30 C LFW (26)

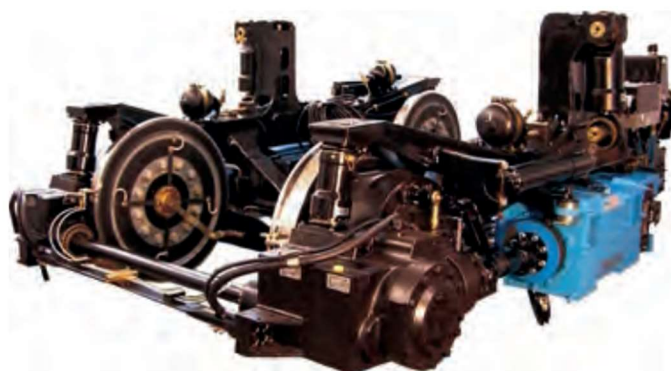
3.4.3 DG 1000 (Končar – Sames)

Podvozek je navržen pro 100% nízkopodlažní tramvaj TMK 2200. Podvozek je neotočný. Výrobce podvozku je firma Sames. Zvláštností podvozku je řešení prostoru mezi koly.

Podvozek nepoužívá standardní dvojkolí ani nápravnici. Kola jsou uložena v ložiskových skříních, které tvoří rám. Ložiskové skříně slouží také jako kývačka s hydropneumatickým primárním vypružením. Tento rám je jednostranně uložen v rámu podvozku. Přes kuželové převodovky jsou kola spojena hřídelí, kterou je nahrazena náprava. Tím se docílí stejných vlastností jako u standardního dvojkolí. Sekundární vypružení je stejně jako primární zajištěno hydropneumatickými pružinami a složí k regulaci výšky podlahy, když vozidlo jede po nerovné koleji. Krátká tažně tlačná tyč přenáší podélnou sílu mezi rámem podvozku a skříní vozidla. Asynchronní trakční motor o výkonu 2 x 65 kW je podélně uložen vně rámu podvozku, aby byl dostatek místa pro nízkou podlahu. (1)

Tabulka 12 Parametry podvozku Končar Sames DG 1000 (28)

Hlavní parametry podvozku	TWF	LWF
Max. rychlost	70 km/h	70 km/h
Rozchod	1000/1435/1524 mm	1000/1435/1524 mm
Rozvor kol	1850/2000 mm	1850/2000 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	10-12t	10-12t
Hmotnost	4,5 – 5 t	3,5 t
Typ kola	-	-
Typ primárního vypružení	Hydropneumatické pružiny	Hydropneumatické pružiny
Typ sekundárního vypružení	Hydropneumatické pružiny	Hydropneumatické pružiny
Průměr kola nové/opotřebované	682/602 mm	682/602 mm



Obrázek 16 Podvozek Končar Sames DG 1000 (27)

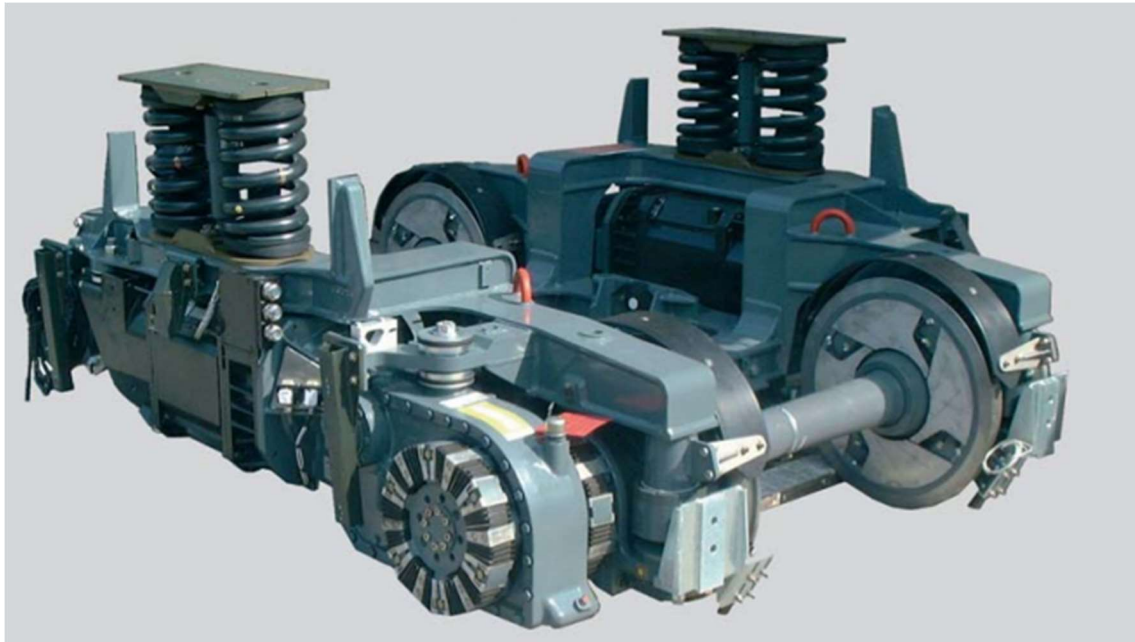
3.4.4 S 1000 (Bombardier)

Tento neotočný podvozek je se standardním dvojkolím. Podvozek je navržen pro 100% nízkopodlažní tramvaj. Z důvodu použití standardního dvojkolí musí být snížen průměr kol.

Průměr kol je 560/500 mm. Kola jsou opatřeny tlumiči hluku. Kola jsou poháněna podélným trakčním motorem umístěným kolmo k ose nápravy a ležícím vně rámu podvozku. Motor pohání vždy jedno dvojkolí. Primární vypružení zajišťují čtyři pryžokovové pružící prvky na nápravě. Primární vypružení slouží zároveň jako vedení dvojkolí. Dvě dvojice flexi-coilových pružin slouží jako sekundární vypružení. Z důvodu zajištění nízkopodlažnosti vozidla je nad podvozky šikmá rampa. Nízká podlaha je přibližně ve výšce 450 mm. (1) (29)

Tabulka 13 Parametry podvozku S 1000 Bombardier (29)

Hlavní parametry podvozku	Trakční	Běžný
Max. rychlost	70 km/h	70 km/h
Rozchod	1000/1435 mm	1000/1435 mm
Rozvor kol	1850 mm	1850 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	10 t	10 t
Hmotnost	4,7 t	3,3 t
Typ kola	Složené	Složené
Typ primárního vypružení	Pryžokovové pružiny	Pryžokovové pružiny
Typ sekundárního vypružení	Flexi-coil pružiny	Flexi-coil pružiny
Průměr kola nové/opotřebované	570/500 mm	570/500 mm



Obrázek 17 Trakční podvozek S 1000 Bombardier (29)

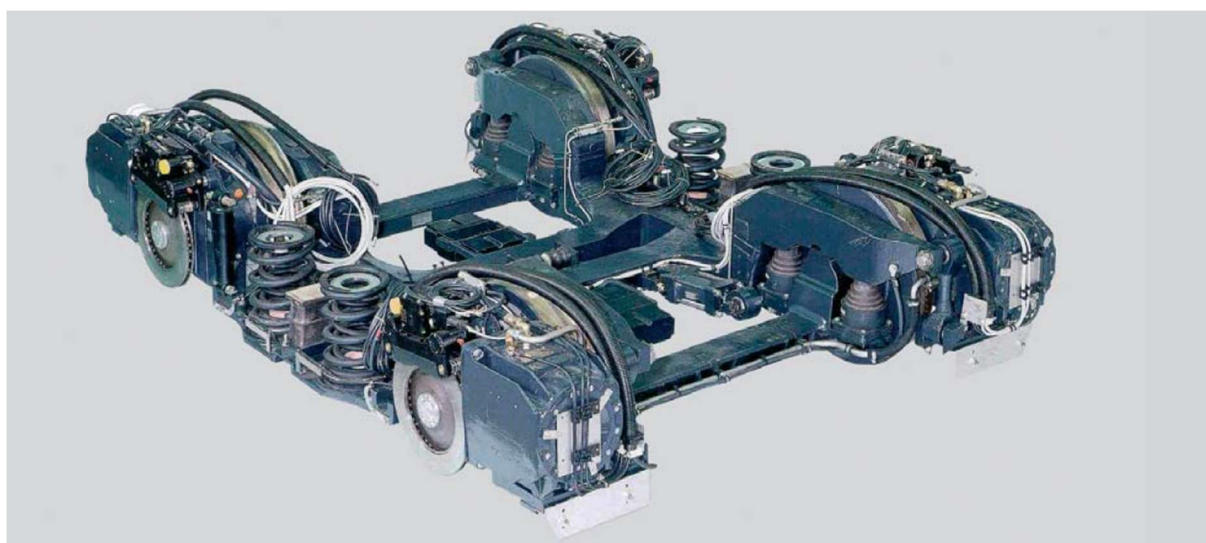
3.4.5 S 1100 Incentro (Bombardier)

Podvozek je navržen pro 100% nízkopodlažní tramvaj. Nízká podlaha je ve výšce 350 mm. Podvozek je navržen pro rozchod koleje 1435 mm. Kola jsou uložena na nápravnicích. Rozvor kol je 1800 mm. Kola jsou opatřena tlumiči hluku. Průměr kola je 660/580 mm. Primární

vypružení je zajištěno pryžovými kuželovými pružinami. Pružiny jsou umístěny na nápravnici. Duplexní šroubové pružiny slouží jako sekundární vypružení. Každé kolo je poháněno jedním elektromotorem o výkonu 45 kW. Hlavní brzda je elektrodynamická a k dobrzdování slouží kotoučové brzdy montované vně motoru. (30)

Tabulka 14 Parametry podvozku S1100 Incentro (30)

Hlavní parametry podvozku	Trakční	Běžný
Max. rychlost	80 km/h	80 km/h
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Rozvor kol	1800 mm	1800 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	10 t	10 t
Hmotnost	4,8 t	3,5 t
Typ kola	Složené	Složené
Typ primárního vypružení	Pryžokovové pružiny	Pryžokovové pružiny
Typ sekundárního vypružení	Duplexní šroubové pružiny	Duplexní šroubové pružiny
Průměr kola nové/opotřebované	660/580 mm	660/580 mm



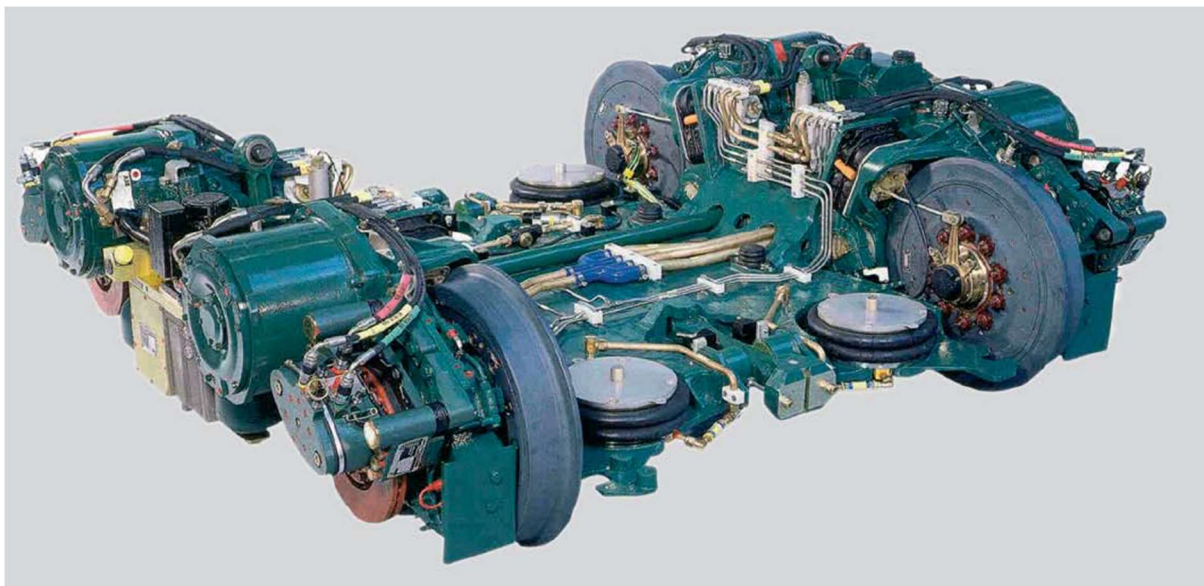
Obrázek 18 Trakční podvozek S 1100 Bombardier (30)

3.4.6 S 3400 Eurotram (Bombardier)

Tento podvozek byl vyvinut pro 100% nízkopodlažní tramvaj Flexity Outlook. Rozchod podvozku je 1435 mm. Rozvor kol je 1400 mm. Podvozek má velice zajímavou konstrukci. Rám disponuje plochami pro vzduchové měchy. Vzduchové měchy jsou čtyři a slouží jako sekundární vypružení. Primární vypružení zajišťují pryžové silentbloky. Podvozek používá kola s tlumícími prvky. Každé kolo je poháněno svým elektromotorem. Průměr kol je 550/505 mm. Na podvozku je použito tří brzd. První brzda je motorová s možností rekuperace energie. Druhá brzda je elektrodynamická a třetí kotoučová. (31)

Tabulka 15 Podvozek S 3400 Eurotram (31)

Hlavní parametry podvozku	Trakční	Běžný
Max. rychlost	80 km/h	80 km/h
Rozchod	1435 mm	1435 mm
Rozvor kol	1400 mm	1400 mm
Typ podvozku	neotočný	neotočný
Max. zatížení na nápravu	11 t	11 t
Hmotnost	3,6 t	3 t
Typ kola	Složené	Složené
Typ primárního vypružení	Pryžokovové pružiny	Pryžokovové pružiny
Typ sekundárního vypružení	Vzduchové měchy	Vzduchové měchy
Průměr kola nové/opotřebované	550/505 mm	550/505 mm



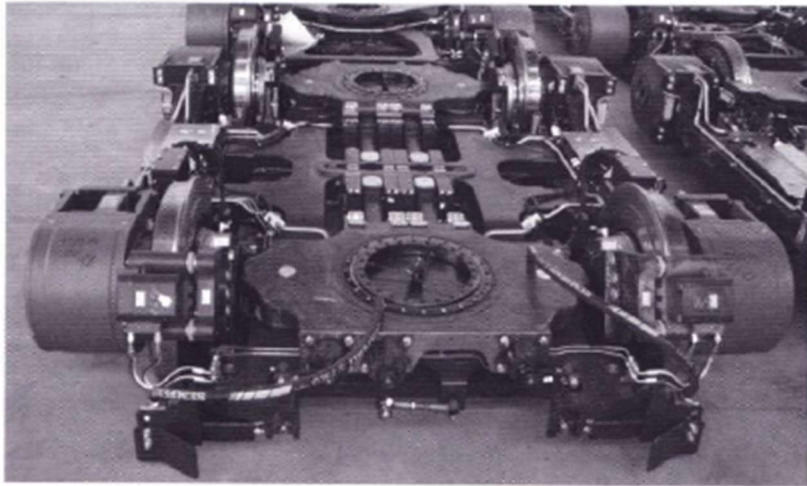
Obrázek 19 Trakční podvozek S 3400 Bombardier (31)

3.5 Popis vybraných otočných podvozků

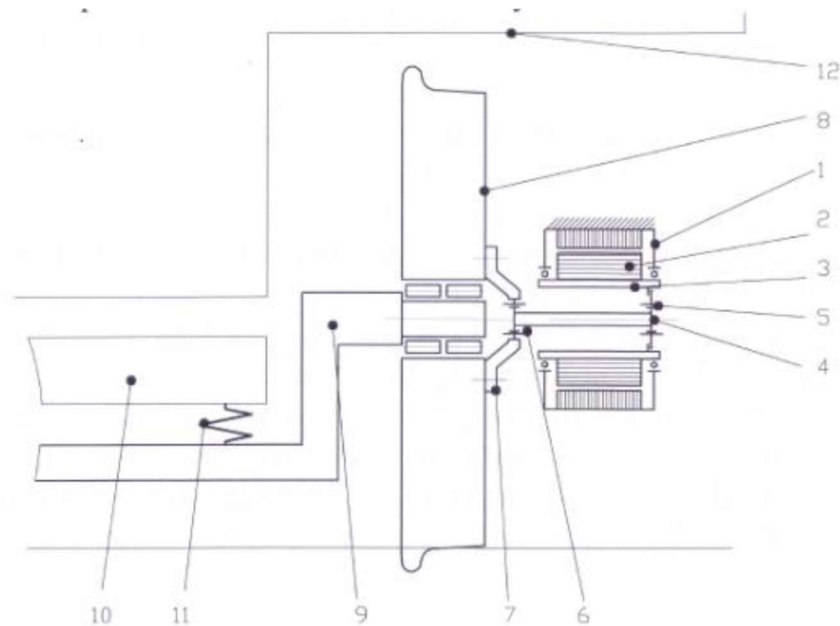
3.5.1 Podvozek tramvaje Škoda 15T For City

Podvozek je navržen pro 100% nízkopodlažní tramvaj Škoda 15T For City. Podvozek je otočný. Výrobce je firma Škoda. Podvozek je velmi nízký. Podvozek nevyužívá klasického dvojkolí, ale nápravnice, na které jsou uložena volně otočná kola. Nápravnice má 4 zahloubení pro pružiny primárního vypružení a konzoly pro kotoučové brzdy. Primární vypružení představují pryžové silentbloky. Na primárním vypružení je uložen velmi nízký rám podvozku. Na rámu spočívá kolébka s ložiskem pro montáž skříně, která je uložena přes sekundární vypružení. V případě vnitřního podvozku jsou kolébky 2, protože na nich spočívají dva články skříně vozidla. Kolébky jsou s rámem podvozku spojeny 2 páry ojnicek. Ty slouží pro přenos podélné síly mezi rámem podvozku a kolébkou zároveň slouží jako torzní tlumiče. Každé volné kolo je

poháněno zvláště samostatným synchronním trakčním motorem s permanentními magnety. Motory jsou přišroubovány k rámu podvozku. (1)



Obrázek 20 Podvozek Škoda 15T (1)



Obrázek 21 Pohon volně otočného kola kloubovou hřídelí v dutině motoru (1)

Obrázek 21 zobrazuje schéma pohonu volně otočného kola tramvaje Škoda 15t. K rámu podvozku je upevněn trakční synchronní motor 1 s permanentními magnety 2. Zubová spojka 4 je upevněna k dutému hřídeli 3. Ozubení zubové spojky 5 a 6 je na obou koncích spojky. Unašečem 7 je levá část zubové spojky spojena s volně otočným kolem 8. Kolo je nasazeno přes ložiska k nápravnici 9. Primární vypružení 11 je vloženo mezi rámem 10 a nápravnicí. Pozice 12 je nízká podlaha. (1)

4 Dvojkolí nízkopodlažní tramvaje s nápravnicí

4.1 Nápravnice

Důvodem vzniku nápravnic je získání více prostoru pro instalaci nízké podlahy. Nápravnice je nerotační součást. Na čepy nápravnice jsou přes ložiska uložena volně otočná kola. Nápravnice disponuje dosedacími plochami pro uložení primárního vypružení. Dále může mít konzoly pro kotoučovou brzdou. (1) (3)



Obrázek 22 Nápravnice tramvaje Škoda 15T (23)

4.2 Kola nízkopodlažní tramvaje

4.2.1 Tlumení hluku

Tramvajová doprava na rozdíl od železniční vyžaduje větší ohledy na hlučnost vozidel. Důvodem je, že tramvaje jezdí převážně v hustě obydlených oblastech. Snížení hluku je možné, buď použitím tlumiče hluku, nebo použitím složeného kola. (2)

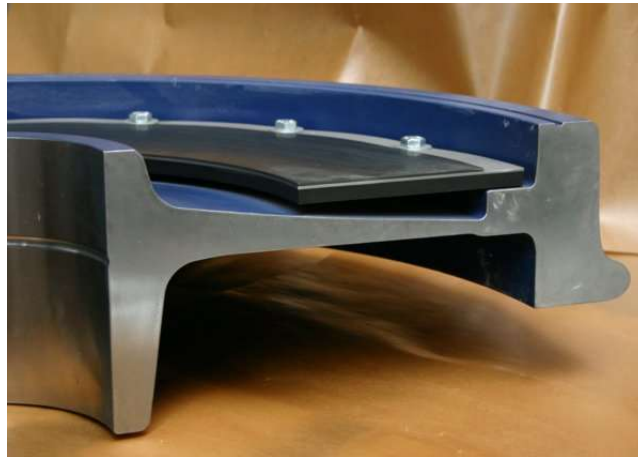
4.2.2 Celistvé kolo s tlumičem hluku

Tlumič hluku a vibrací se připevní k věnci celistvého kola. Nejjednodušší řešení je tlumící kroužek z nerezové oceli o průměru 10 mm, který se oboustranně vloží do drážek na vnitřní straně věnce. Konce drátku se svaří. Kroužek má funkci třecího tlumiče, který transformuje mechanickou energii vibrací na tepelnou energii. (2)



Obrázek 23 Celistvé kolo tlumené ocelovými drátky (23)

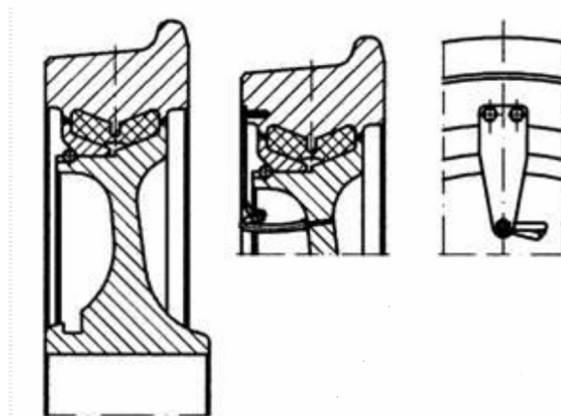
Dalším provedením je diskový širokopásmový tlumič hluku a vibrací ve tvaru mezikruží. Tlumič je složen s několika různých materiálů. Tlumič se buď vkládá do drážky na vnitřní straně věnce, nebo lze sešroubovat s diskem kola. Výrobce tlumičů je např. firma Bonatrans a.s. (2)



Obrázek 24 Celistvé kolo s kompozitním tlumičem hluku (32)

4.2.3 Složené kolo

Složené kolo se skládá z obruče, kotouče a pryžových segmentů. Pryžové segmenty se umísťují mezi obruč a kotouč kola. Výhodou pryžových kol je především snížení hlučnosti a to až 3 dB. Další výhody jsou zvýšený komfort jízdy pro cestující a zvýšení životnosti vozidla, neboť pryžové segmenty tlumí rázové síly mezi kolem a kolejnicí. Nevýhodou je zvýšený jízdní odpor. Pryž se cyklicky zatěžuje a energie, která je nutná pro stlačení se při odlehčení zcela nevrátí. Důvodem proto je vzniklé vnitřní tření v pryži. V neposlední řadě je i cena složeného kola přibližně o 50% vyšší než u celistvého. (2) (3)



Obrázek 25 Složené kolo s pryží Bonatrans (23)

4.3 Primární vypružení

Pružiny primární vypružení slouží k vypružení dvojkolí s rámem podvozku a vedení dvojkolí. Pružiny primární vypružení podvozku tvoří nejčastěji pryžokovové silentbloky. Pryžokovové pružiny se získají díky schopnosti pryže se během vulkanizace spojovat s kovy. Primární vypružení může být dále např. hydropneumatické. Pryžový silenblok je dobře vidět na podvozku S1100 na obrázku 18 na dosedacích plochách nápravnice. (1) (2) (7)

4.4 Brzdy

Hlavní brzda u tramvajových vozidel je brzda elektrodynamická. Ta se používá pro brždění do 4 km/h, kdy znatelně ztrácí svoji účinnost. Pro brždění přibližně od 4 km/h do klidu se používá nejčastěji mechanická brzda kotoučová. Kotoučová brzda se také ihned zapíná při selhání elektrodynamické brzdy. Často se dnes kotoučová brzda u trakčního podvozku umísťuje v hnacím agregátu vedle motoru. Další možností je na nápravnici vytvořit konzolu pro kotoučovou brzdu. Takto je řešen např. podvozek tramvaje Škoda 15T. (1) (8) (23)



Obrázek 26 Brzdová jednotka DAKO (Obrázek převzat z (7))

4.5 Pohon volně otočných kol

U tramvají s klasickým dvojkolím je pohon nejčastěji uložen na ose dvojkolí. U nízkopodlažních tramvají je však většinou použito volně otočných kol a tedy na hnacím podvozku musí mít každé kolo buď svůj vlastní pohon, nebo skupinový pohon pohánějící dvě kola na každé straně podvozku. Nejčastěji bývá použito asynchronních nebo synchronních

trakčních motorů umístěných vně kol. U tramvaje Škoda 15T je použit vodou chlazený synchronní motor. (7)



Obrázek 27 Trakční motor Škoda (33)

5 Konstrukční návrh

5.1 Požadavky na konstrukci

Požadavky na konstrukci ze zadání jsou, nápravnice musí obsahovat otvory pro primární vypružení a konzoly pro kotoučovou brzdu. Nápravnice je určena pro rozchod koleje 1435 mm. Dvojkolí bude konstruováno pro běžný podvozek. Další požadavky, které by bylo dobré dodržet, jsem určil sám.

Tabulka 16 Doplnkové požadavky na konstrukci

Druh výroby	Malosériová
Mechanická odolnost	Vysoká

5.2 Možné způsoby výroby nápravnice

5.2.1 Odlitek

Jedna z možných metod výroby je celý tvar nápravnice vyrobít jako odlitek. Technologie slévání umožňuje vyrobení složitých tvarů. Zapotřebí je však velmi složitá forma pro odlévání. Očekávat se dají horší mechanické vlastnosti u příčníků. Dále je nutné horší mechanické vlastnosti kompenzovat větším množstvím materiálu, přičemž narůstá hmotnost součásti. Cenově může být tato technologie výhodná pro středně či velkosériovou výrobu.

5.2.2 Výkovek

Kováním lze dosáhnout velmi dobrých mechanických vlastností. V případě klasického dvojkolí za použití osy je tato technologie výroby velmi výhodná, protože je možné použít volného kování. V případě nápravnice však metoda volného kování je prakticky nerealizovatelná. Z toho důvodu lze vyrobit nápravnici kováním do zápustky. Nápravnice není možné vyrobit na jednu operaci, takže je zapotřebí postupová zápustka. Postupová zápustka musí být ovšem hodně složitá a z toho důvodu bude drahá. Výrobní postup bude pracný a energeticky náročný. Pro kusovou či malosériovou metodu je kování do zápustky nevýhodné. Z hlediska ekonomičnosti je tato metoda výhodná pro středně a velkosériovou výrobu.

5.2.3 Odlitek + svařenec

Tato technologie výroby nápravnice je dnes nejvíce používaná. Složitý tvar krajní části nápravnice se vyrobí jako odlitek. Příčnick je vyroben jako svařenec vhodného profilu z ocelového plechu. Při použití kombinace odlitek a svařenec je nutné dbát na svařitelnost obou materiálů. Výhoda této metody je úspora hmotnosti, snazší a levnější výroba. Nevýhodou je vznik nebezpečného místa v okolí svaru.

5.2.4 Výkovek + svařenec

Výroba nápravnice výkovek + svařenec je použita např. u nápravnic v podvozcích Combino plus SF 30 TFW/LFW. Krajní části nápravnice se vykovávají do zápustky a svaří s příčnickem z ocelového plechu vhodného profilu. (26)

5.3 Porovnání jednotlivých technologií výroby

Pro výběr vhodné výrobní varianty nápravnice je použita porovnávací tabulka. V prvním sloupci jsou kritéria a v dalších sloupcích bodové ohodnocení pro jednotlivé varianty. Bodové hodnocení je od 1 do 5 bodů, kdy 1 je nejhorší a 5 nejlepší.

Tabulka 17 Hodnocení výrobních variant

Kritérium	Odlitek	Výkovek	Odlitek + Svařenec	Výkovek + svařenec
Cena	2	1	3	3
Hmotnost	2	2	3	3
Náročnost na výrobu	2	2	4	3
Mechanická odolnost	3	5	2	2
Malosériovost	1	1	4	3
Suma	10	11	16	14

Dle tabulky je nejlepší variantou Odlitek + Svařenec. V praxi je toto řešení také nejvíce používané.

5.4 Součásti nápravnice a jejich možné konstrukční řešení

5.4.1 Příčník

Jedná se o svařenec dvou plechů. První plech je ohnut do U tvaru a druhý má klasický obdélníkový profil. Plechy jsou spojeny svarovým spojem. Svarový spoj je možné provést, buď bez přípravy svarových ploch koutovým svarem, nebo připravit svarovou plochu 1/2 V svar a následně z vnějšku provést koutový svar.

5.4.2 Odlitek

Na nápravnici jsou tyto odlitky dva, každý z jedné strany. Odlitek musí obsahovat dvě díry pro primární vypružení. Plocha pro svarový spoj odlitku s příčníkem musí být opracována. Odlitek je možné vyrobit buď s čepem, nebo bez čepu. V druhém případě se musí v odlitku vyrobit díra s přesahem pro nalisování čepu. Součástí odlitku může být i konzola pro uchycení kotoučové brzdy. Další možností je spojení konzoly s odlitkem svarovým spojem.

5.4.3 Sestava volně otočného kola

Volně otočné kolo je uloženo ve valivých ložiscích na čepu nápravnice. Nejčastěji používaná jsou kuželíková ložiska. Důvodem je možný přenos velkých osových sil.

Z důvodu požadavku konzole pro kotoučovou brzdu je nejvhodnější řešení brzdový kotouč přímo na věnci kola. Dalším parametrem pro volbu volně otočného kola je hlučnost. Na první pohled by bylo ideální variantou složené kolo s pryží Bonatrans s brzdovým kotoučem. Nevýhoda tohoto řešení je, že v důsledku brždění se kolo velmi zahřívá a pryž brzy se zdegeneruje. Další variantou je použít celistvé kolo s tlumiči hluku a brzdovým kotoučem. Toto řešení nebude mít z hlediska hlučnosti ideální vlastnosti, ale životnost kola bude podstatně vyšší. Následující varianta je volně otočné kolo s brzdovým kotoučem přišroubovaným z vnějšku ke kolu. Zde by bylo možné použít i složené kolo s pryží Bonatrans. V tomto případě však je nutné vést konzolu okolo kola. Problém může být nedostatek místa pro takovou konzolu a také nebezpečí prasknutí konzoly.

Prostor ložisek je nutné z obou stran dobře utěsnit, aby se nemohl do prostoru ložisek dostat prach. Nejlepší variantou bude použít bezkontaktní těsnění. Další variantou je možné použití gufera, ale vzhledem k nízkým tlakům se mi zdá toto řešení zbytečné.

5.5 Shrnutí konstrukčního provedení nápravnice

Vzhledem k požadavku na dobré mechanické vlastnosti volím příčník spojen 1/2V svarem s koutovým svarem z venku. Protože se jedná o malosériovou výrobu, je odlitek z ekonomického hlediska nejlepší zhotovit rovnou s čepem a konzolou pro kotoučovou brzdu. Volně otočné kolo z hlediska životnosti volím celistvé s tlumičem hluku a brzdovým kotoučem vyhotoveným na věnci kola. Volně otočné kolo bude uloženo ve dvou kuželíkových ložiscích. Prostor ložisek bude utěsněn bezkontaktním těsněním.

5.6 Materiál

Výrobní varianta byla zvolena Odlitek + Svařenec. Materiál navrhuji jen pro nápravnici ne pro volně otočné kolo. Volně otočné kolo se nakupuje. Vybrané materiály musí být z technologického hlediska svařitelné a dobře obrobitelné. S klesající teplotou klesá vrubová houževnatost. Vrubová houževnatost nesmí být nižší než 27 J/cm².

5.6.1 Materiál odlitku

Materiál odlitku byl zvolen GS 20Mn5. Jedná se o ocel na odlitky. Svařitelnost oceli je zaručená do tloušťky 25 mm. Obrobitelnost oceli je velmi dobrá. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulkách. (9)

Tabulka 18 Chemické složení oceli GS 20Mn5 (9)

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu
0,17 – 0,25	0,90 – 1,40	0,20 – 0,50	Max. 0,04	Max. 0,04	Max. 0,04	Max. 0,04	Max. 0,04

Tabulka 19 Mechanické vlastnosti GS 20Mn5 (9)

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	500 - 650
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	≥ 280
Vrubová houževnatost KCU [J/cm ²]	≥ 50
Tvrdość dle Brinella [HB]	140 - 183

5.6.2 Materiál příčnicku

Materiál příčnicku byl zvolen S 355 J2G3. Ocel je zaručeně svařitelná. Je vhodná pro výrobu plechů válcovaných za studena. Následující tabulky platí pro plechy do tloušťky 16 mm. (10)

Tabulka 20 Chemické vlastnosti oceli S355 J2G3 (10)

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% N
0,20–0,23	1,6 – 1,7	0,55 – 0,60	0,025 – 0,035	0,025 – 0,035	Neuvedeno

Tabulka 21 Mechanické vlastnosti oceli S355 J2G3 (10)

Charakteristika	Hodnota
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	470-630
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	≥ 355
Vrubová houževnatost KV [J]	≥ 27

5.6.3 Materiál součástí volně otočného kola

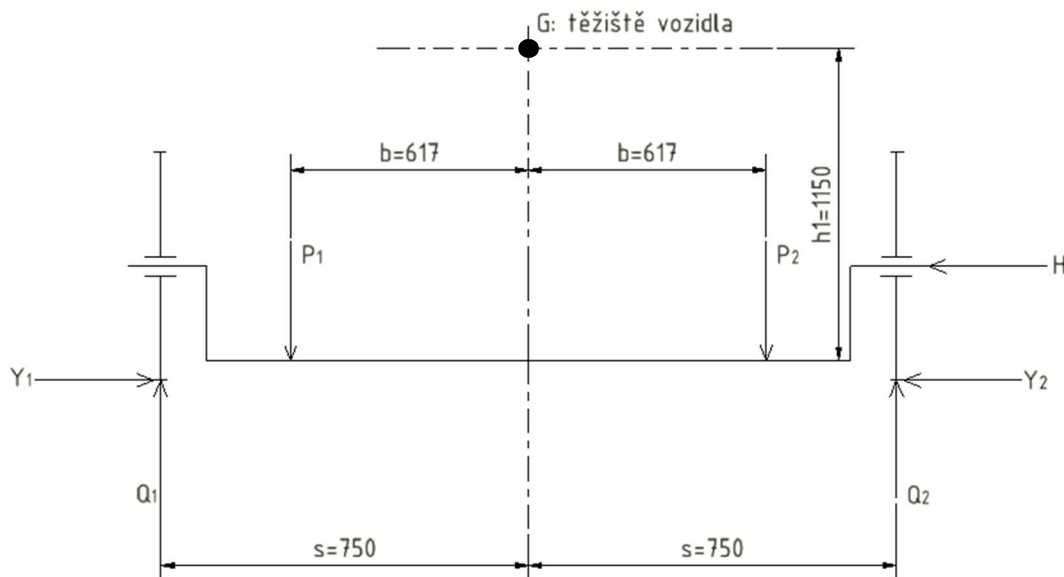
Samotné kolo je nakupovaná součást, tudíž jeho materiál nebude navrhovat. Rovněž ložiska jsou nakupovaná součást. Vyrábět se budou jen disky z obou stran, které slouží k zakrytí kola a kroužek sloužící k vymezení vůlí. Tyto součásti bude stačit vyrobít z běžných konstrukčních ocelí.

6 Výpočty

6.1 Norma ČSN EN 13103

Síly jsou vypočteny dle normy ČSN EN 13103. Tato norma platí pro standardní dvojkolí. Po konzultacích s vedoucím práce byla upravena pro dvojkolí s nápravnicí. Navrhované dvojkolí je běžné, tudíž byly použity vzorce pro výpočet sil na nápravu pro nevodící dvojkolí.

6.1.1 Schéma působících sil



Obrázek 28 Schéma sil působících na nápravnici dle normy ČSN EN 13103 (Vlastní zdroj)

- h_1 mm – výška těžiště nad středem nápravy
- $2b$ mm – příčná rozteč primárního vypružení
- R mm – poloměr volně otočného kola
- $2s$ mm – vzdálenost styčných kružnic

6.1.2 Síly působící na nápravnici

P_1 N – svislá reakce na přitížené straně nápravnice

P_2 N – svislá reakce na odlehčené straně nápravnice

Y_1 N – Vodorovná příčná síla kolmá na osu kolejnice v přitíženém styku kolo – kolejnice

Y_2 N – Vodorovná příčná síla kolmá na osu kolejnice v odlehčeném styku kolo – kolejnice

H N – Rozdíl Y_1 a Y_2

Q_1 N – síla svislého účinku koleje na přitíženou stranu nápravnice

Q_2 N – síla svislého účinku koleje na odlehčenou stranu nápravnice

6.1.3 Výpočet sil působících na nápravnici

Před výpočtem sil je nutné stanovit hmotnost zatěžující čepy ložisek. Hmotnost m_1 se stanoví ze vzorce:

$$m_1 = m - m_2 = 9000 - 390 = 8610 \text{ kg}$$

kde:

- m kg - hmotnost působící na kolejnice
- m_2 kg je hmotnost neodpružených hmot. Po konzultaci s vedoucím práce se jako neodpružená hmota bude počítat hmotnost volně otočných kol. Hmotnost jednoho volně otočného kola je cca. 195 kg. Hmotnost byla odečtena ze softwaru Autodesk Inventor.

6.1.3.1 Výpočet svislých sil působících na primární vypružení:

$$P_1 = \left(0,625 + 0,075 \cdot \frac{h_1}{2b}\right) \cdot m_1 \cdot g = \left(0,625 + 0,075 \cdot \frac{1110}{1234}\right) \cdot 8610 \cdot 9,81 = 58,44 \text{ kN}$$

$$P_2 = \left(0,625 - 0,075 \cdot \frac{h_1}{2b}\right) \cdot m_1 \cdot g = \left(0,625 - 0,075 \cdot \frac{1110}{1234}\right) \cdot 8610 \cdot 9,81 = 47,14 \text{ kN}$$

kde:

g m/s² – gravitační konstanta

6.1.3.2 Výpočet svislých sil:

$$Y_1 = 0,3 \cdot m_1 \cdot g = 0,3 \cdot 8610 \cdot 9,81 = 25,34 \text{ kN}$$

$$Y_2 = 0,15 \cdot m_1 \cdot g = 0,15 \cdot 8610 \cdot 9,81 = 12,7 \text{ kN}$$

$$H = 0,15 \cdot m_1 \cdot g = 0,15 \cdot 8610 \cdot 9,81 = 12,7 \text{ kN}$$

6.1.3.3 Výpočet svislých reakcí:

$$Q_1 = \frac{1}{2s} [P_1 \cdot (b + s) - P_2 \cdot (b - s) + (Y_1 - Y_2) \cdot R - F_i \cdot (2s - Y_1)] =$$

$$Q_1 = \frac{1}{1500} [P_1 \cdot (610 + 750) - P_2 \cdot (610 - 750) + (Y_1 - Y_2) \cdot 340 - 0 \cdot (2 \cdot 750 - Y_1)]$$

$$Q_1 = 60,3 \text{ kN}$$

$$Q_2 = \frac{1}{2s} [P_2 \cdot (b - s) - P_1 \cdot (b + s) - (Y_1 - Y_2) \cdot R - F_i \cdot Y_1] =$$

$$Q_2 = \frac{1}{1500} [P_2 \cdot (610 - 750) - P_1 \cdot (610 + 750) - (Y_1 - Y_2) \cdot 340 - 0 \cdot Y_1] = 45,5 \text{ kN}$$

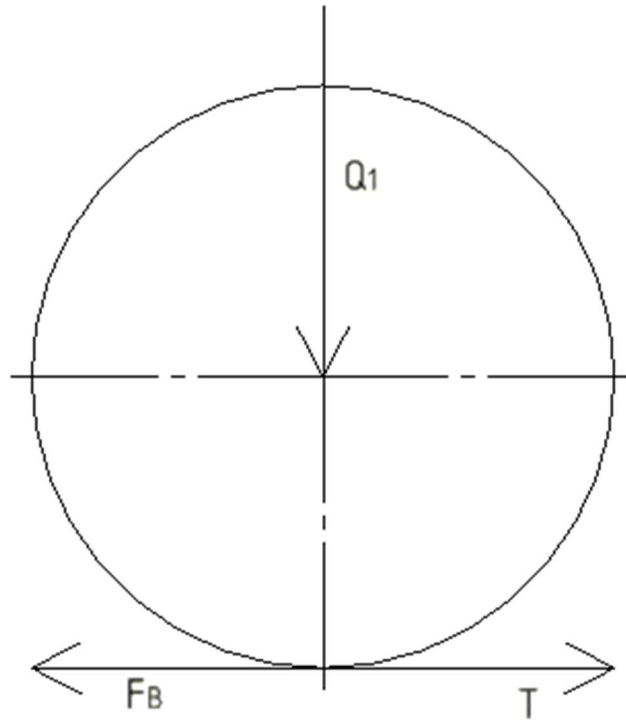
$$Q_2 = 45,27 \text{ kN}$$

F_i - síla na nápravu od neodpružených hmot [N]. Z důvodu, že na nápravnici nepůsobí žádné neodpružené hmoty je síla $F_i = 0$ N.

6.2 Výpočet brzdě síly

6.2.1 Výpočet celkové brzdě síly

Maximální brzdě síla působící na kolo musí být rovna tečné síle, jinak by kolo prokluzovalo. Pro výpočet byl použit adhezní součinitel $\mu = 0,3$ a větší svislá reakce Q_1 .



Obrázek 29 Určení brzdě síly (Vlastní zdroj)

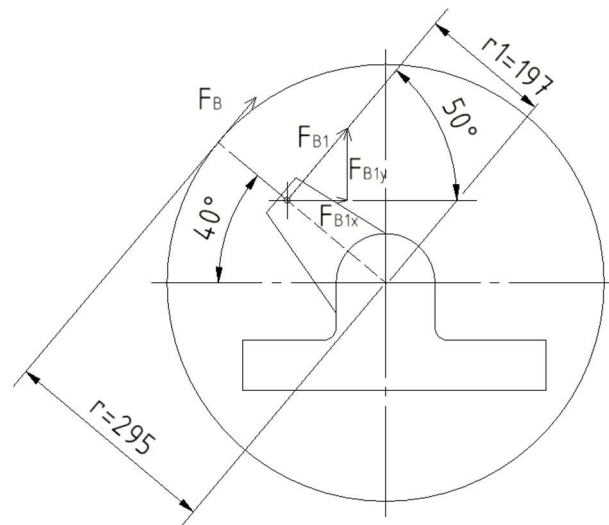
$$F_B = T = \mu \cdot Q_1$$

$$F_B = 0,3 \cdot 60,3$$

$$F_B = 18,1 \text{ kN}$$

- T - tečná síla jednotka N
- μ - součinitel adheze

6.2.2 Výpočet brzdné síly na konzoly nápravnice



Obrázek 30 Schéma brzdné síly (Vlastní zdroj)

Z brzdného momentu se M_B vypočte síla F_{B1} :

$$M_B = F_B \cdot r = 18110 \cdot 0,295 = 5342,45 \text{ Nm}$$

$$F_{B1} = \frac{M_B}{r_1} = \frac{5342,45}{0,197} = 27119 \text{ N}$$

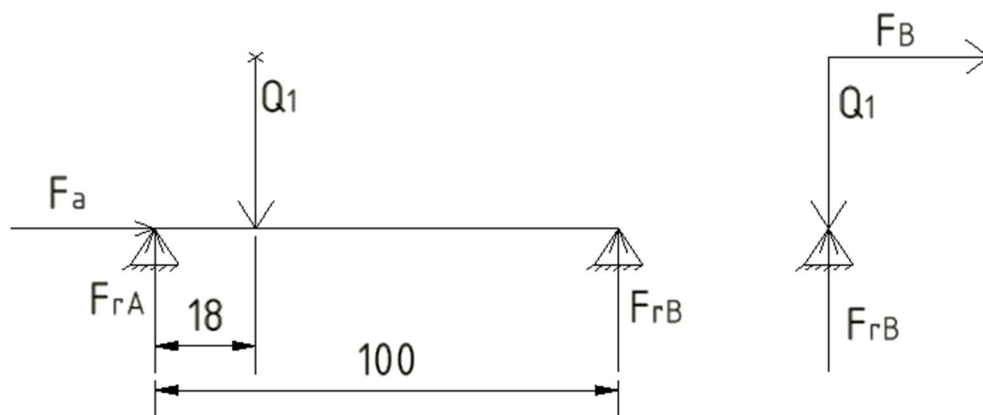
$$F_{B1X} = F_{B1} \cdot \cos 50 = 27119 \cdot \cos 50 = 17432 \text{ N}$$

$$F_{B1Y} = F_{B1} \cdot \sin 50 = 27119 \cdot \sin 50 = 20774 \text{ N}$$

Tyto vypočtené síly budou použity v pevnostní analýze provedené metodou MKP.

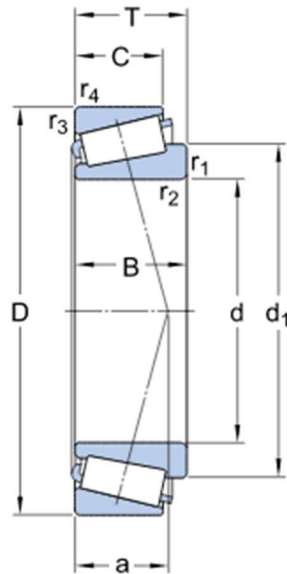
6.3 Výpočet kolových ložisek

Dle konstrukčního návrhu byla zvolena dvojice kuželíkových ložisek. Rozložení sil a vzdálenosti jejich působišť je zřejmý z obrázku 29.



Obrázek 31 Schéma sil pro výpočet ložisek (Vlastní zdroj)

6.3.1 Kuželíkové ložisko SKF 33220



Obrázek 32 Ložisko SKF 33220 (34)

d	100	mm
D	180	mm
T	63	mm
d ₁	≈ 139.98	mm
B	63	mm
C	48	mm
r _{1,2}	min. 3	mm
r _{3,4}	min. 2.5	mm
a	45	mm

Obrázek 33 Rozměrové parametry ložiska SKF 33220 (34)

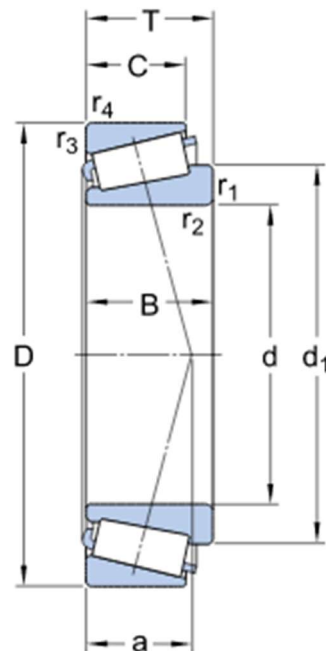
Parametry pro výpočet:

Dynamická únosnost $C = 428 \text{ kN}$

Parametr $e = 0,4$

Součinitel, přepočítávající axiální zatížení na radiální $Y = 1,5$

6.3.2 Kuželíkové ložisko SKF 32218 J2/Q



Obrázek 34 Ložisko SKF 32218 J2/Q (35)

d	90	mm
D	160	mm
T	42.5	mm
d ₁	≈ 121	mm
D ₁	999.99	mm
B	40	mm
C	34	mm
C ₁	999.99	mm
r _{1,2}	min. 2.5	mm
r _{3,4}	min. 2	mm
a	36	mm

Obrázek 35 Rozměrové parametry ložiska SKF 32218 J2/Q (35)

Parametry pro výpočet:

Dynamická únosnost $C = 451 \text{ kN}$

Parametr $e = 0,4$

Součinitel, přepočítávající axiální zatížení na radiální $Y = 1,4$

6.3.3 Kontrola ložisek na kilometrovou životnost L_s

$$F_r = \sqrt{Q_1^2 + F_B^2}$$

$$F_r = \sqrt{60,3^2 + 18,1^2}$$

$$F_r = 62,9 \text{ kN}$$

$$F_a = 12,7 \text{ kN}$$

kde:

F_r kN – radiální síla působící na ložiska

F_a kN – axiální síla působící na ložiska

Následně se z momentové podmínky vypočítají reakce od F_r ve vazbách A a B:

$$F_{rA} = \frac{82}{100} \cdot F_r = \frac{82}{100} \cdot 62,9 = 51,8 \text{ kN}$$

$$F_{rB} = \frac{18}{100} \cdot F_r = \frac{18}{100} \cdot 62,9 = 10,9 \text{ kN}$$

Výpočet axiálních sil ve vazbách A a B (36):

$$\frac{F_{rA}}{Y_A} \geq \frac{F_{rB}}{Y_B}$$

$$\frac{51,8}{1,4} \geq \frac{10,9}{1,4}$$

$$K_a \geq 0,5 \cdot \left(\frac{F_{rA}}{Y_a} - \frac{F_{rB}}{Y_B} \right) \geq 0,5 \cdot \left(\frac{51,8}{1,4} - \frac{10,9}{1,4} \right)$$

$$25,5 \geq 14,6 \Rightarrow$$

$$F_{aA} = F_{aB} + F_a = 3,8 + 12,7 = 16,6 \text{ kN}$$

$$F_{aB} = \frac{0,5 \cdot F_{rB}}{Y_B} = \frac{0,5 \cdot 10,9}{1,4} = 3,8 \text{ kN}$$

Nakonec se určí ekvivalentní zatížení F_{eX} :

$$e_X = \frac{F_{aX}}{F_{rX}}$$

$$\text{Pokud: } e_X \leq 0,4 \rightarrow F_{eX} = F_{rX}$$

$$\text{Pokud: } e_X \geq 0,4 \rightarrow F_{eX} = 0,4 \cdot F_{rX} + Y_X \cdot F_{aX}$$

$$e_A = \frac{F_{aA}}{F_{rA}} = 0,32$$

$$e_A \leq 0,4 \rightarrow F_{eA} = F_{rA}$$

$$F_{eA} = 51,7 \text{ kN}$$

$$e_B = \frac{F_{aB}}{F_{rB}} = 0,36$$

$$e_B \leq 0,4 \rightarrow F_{eB} = F_{rB}$$

$$F_{eB} = 10,9 \text{ kN}$$

Kilometrová životnost ložiska L_s musí být minimálně 1 500 000 km. (2)

$$L_{sA} = \left(\frac{C}{F_{eA}}\right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{\pi \cdot 2R}{1000} = \left(\frac{428}{51,7}\right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,34}{1000} = 2,45 \times 10^6 \text{ km}$$

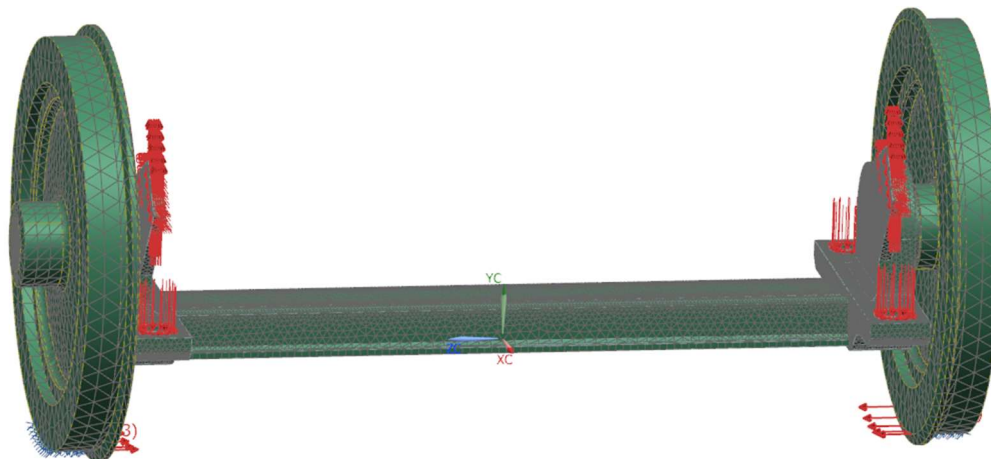
Ložisko A životnost splňuje.

$$L_{sB} = \left(\frac{C}{F_{eA}}\right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{\pi \cdot 2R}{1000} = \left(\frac{462}{6,7}\right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{\pi \cdot 2 \cdot 0,34}{1000} = 74,4 \times 10^6 \text{ km}$$

Ložisko B životnost splňuje.

6.4 Pevnostní analýza metodou konečných prvků

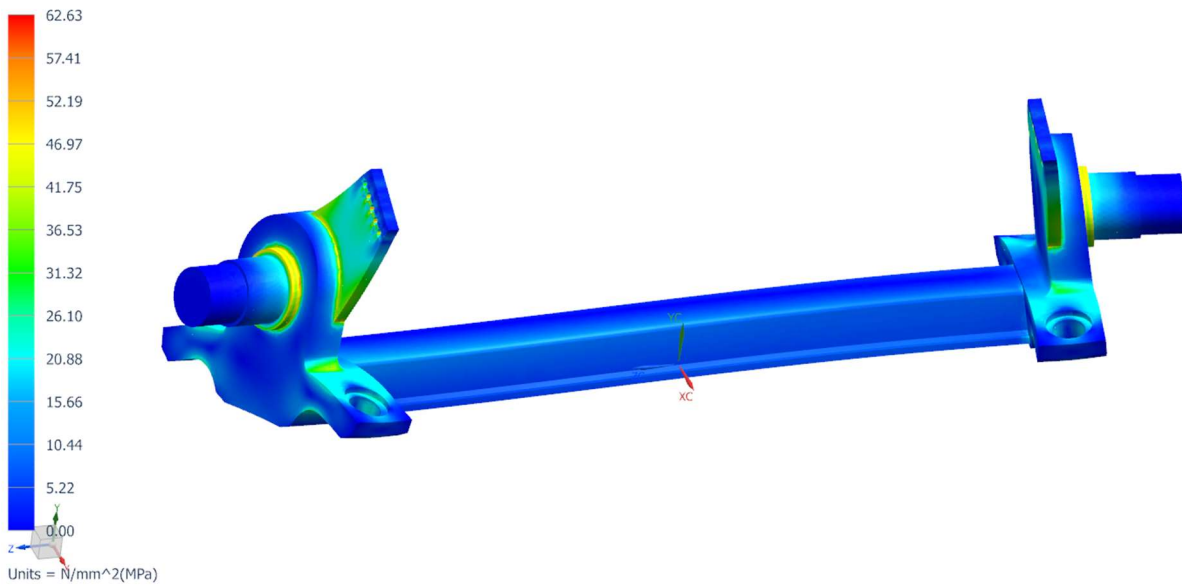
Pevnostní analýza byla provedena z hlediska statiky v Siemens NX Advance Simulation Nastran. Pro pevnostní analýzu byla použita síť 3D Tetraedral Mesh Centra (CTETRA10). V kritických místech bylo provedeno zjemnění sítě. Metoda konečných prvků ověří pevnost a tuhost navržené konstrukce. Pro potřeby analýzy se vymodeloval zjednodušený model volně otočného kola. Kola slouží pro vložení vazeb a simulování příčné síly. Uchycení a zatížení nápravnice je patrné z obrázku 35. Síla P_1 , jejíž hodnota je 58,44 kN, působí v místech primárního vypružení, která jsou dvě na odlitek. Proto byla rozdělena na půl a tudíž hodnota síly P_1 v jednom místě je 29,22 kN. Stejně byla rozdělena síla P_2 (47,14 kN) na druhém odlitku na 23,57 kN. Příčné síly Y_1 (25,34 kN) a Y_2 (12,7 kN) působí v místě kol. Dále na nápravnici působí síly F_{B1X} (17,432 kN) a F_{B1Y} (20,774 kN), které jsem definoval v dírách na konzoly.



Obrázek 36 Uchycení a zatížení nápravnice (Vlastní zdroj)

Následující obrázek 36 ukazuje rozložení napětí dle Von-Mises v nápravnici:

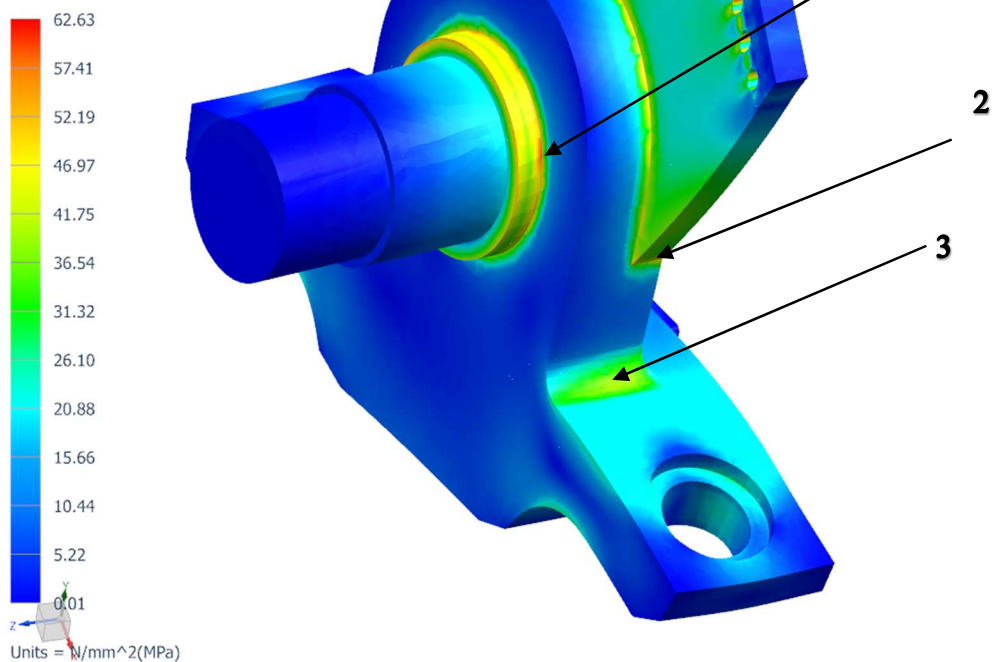
bp_vypocet_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 110.56, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



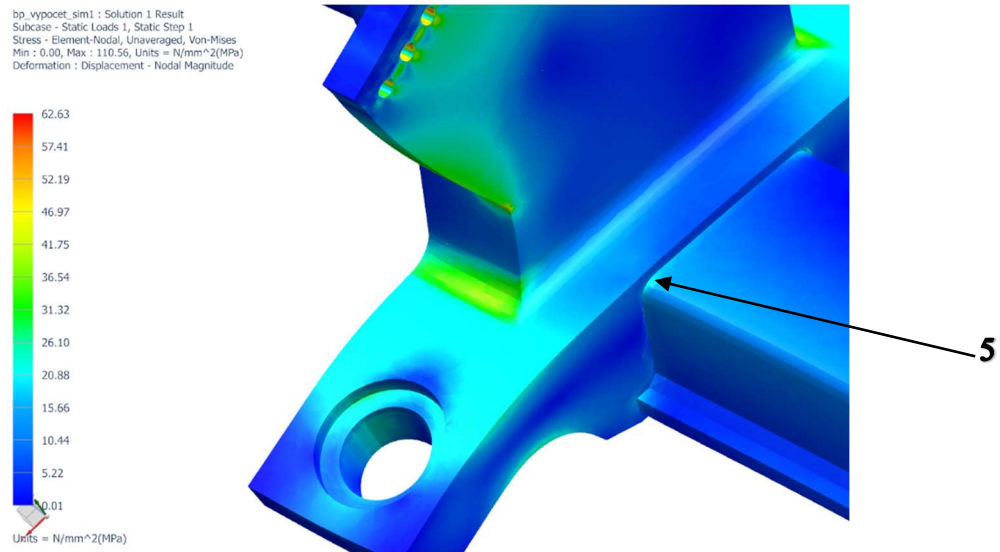
Obrázek 37 Celkový pohled na rozložení napětí (Vlastní zdroj)

Maximální napětí bylo zjištěno v místě čepu místo 1 62,63 MPa, dále na konci konzoly místo 2 47,2 MPa. V místě 3 působí napětí 37,6 MPa. V místě šroubů na konzole (místo 4) odlitku je napětí 58,9 MPa.

bp_vypocet_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 110.56, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



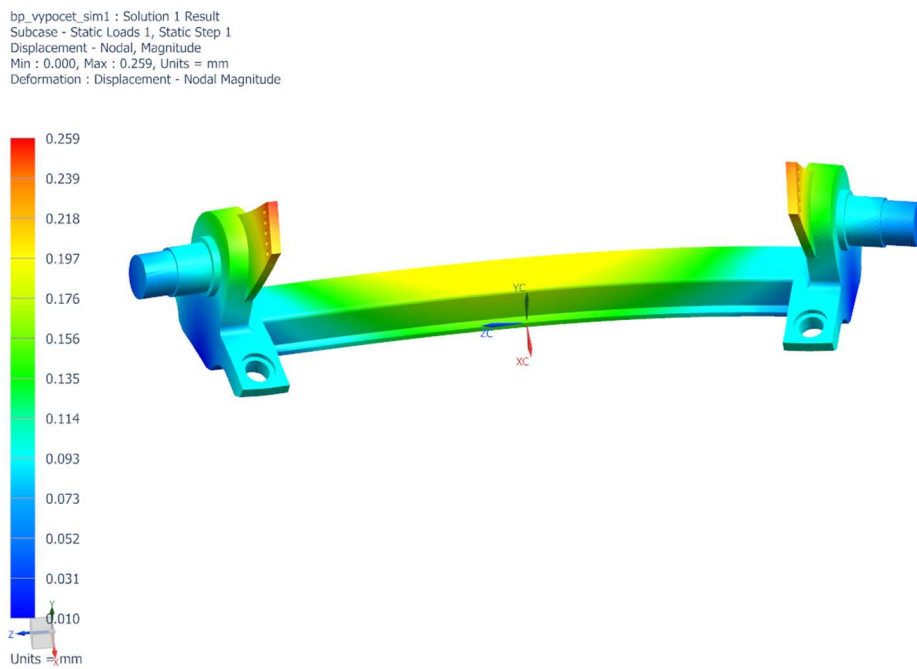
Obrázek 38 Rozložení napětí na přitížené straně nápravnice (Vlastní zdroj)



Obrázek 39 Spojení odlitku s příčnickem (Vlastní zdroj)

V místě svaru je napětí 22,9 MPa. Bezpečnost je odvozena od meze kluzu materiálu GS 20Mn5, která je 280 MPa. Z toho vyplývá bezpečnost rovna 4,47.

Výsledné posunutí nápravnice je na obrázku 39.



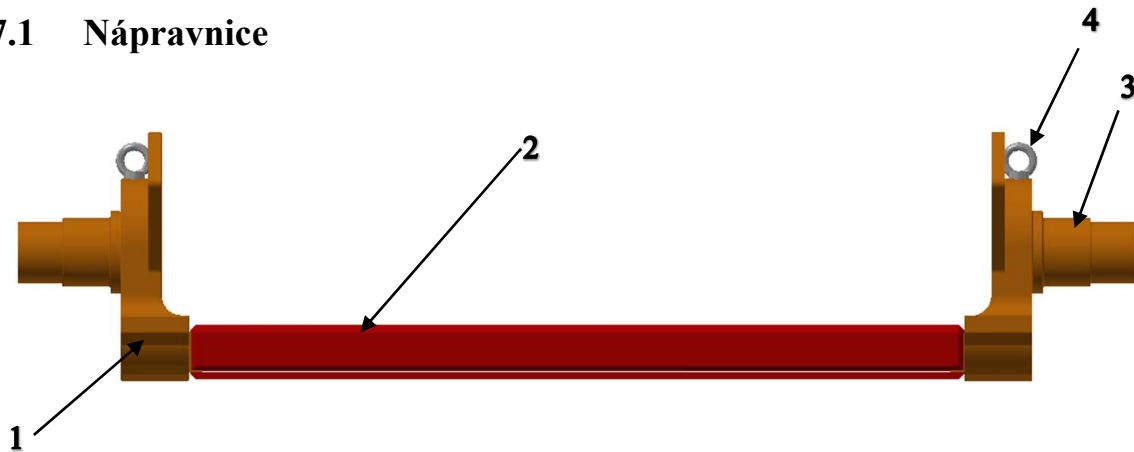
Obrázek 40 Výsledné posunutí nápravnice (Vlastní zdroj)

Maximální hodnota posunutí je 0,259 mm. Největší posunutí je na konzole.

7 Zhodnocení konstrukčních uzlů

S ohledem na výpočty, kapitolu 5.5, MKP a v neposlední řadě mnohá doporučení vedoucího bakalářské práce byl zhotoven návrh nápravnice v CAD systému Autodesk Inventor Professional 2016.

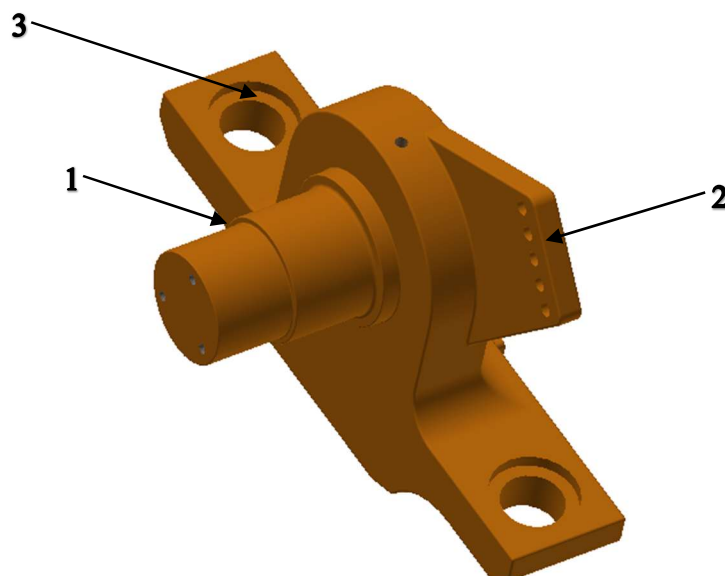
7.1 Nápravnice



Obrázek 41 Nápravnice (Vlastní zdroj)

Nápravnice se skládá ze dvou odlitků Poz. 1 a Poz. 3. Oba odlitky jsou rozměrově stejné, ale zrcadlově převrácené. Odlitky jsou spojeny svařencem příčnicku Poz. 2. Pouze pro manipulaci jsou k nápravnici přišroubovány závěsné šrouby Poz. 4. Šrouby byly navrženy na nosnost celkového dvojkolí, tedy 530 kg. Po manipulaci se závěsné šrouby vyjmou a díry se zaslepí podle přiloženého výkresu sestavy nápravnice 11-1111.

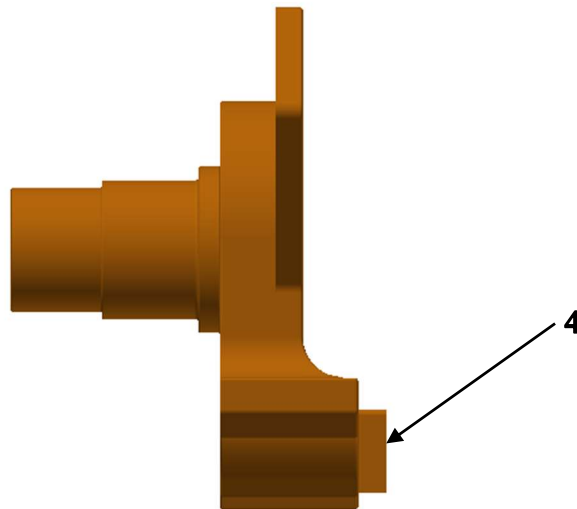
7.1.1 Odlitek



Obrázek 42 Odlitek pohled s perspektivy (Vlastní zdroj)

Odlitek je odlit společně s čepem pro nasazení kola 1 a konzolou pro kotoučovou brzdu 2. Na odlitku jsou dále vyrobeny 2 díry pro uložení primárního vypružení 3. Rozměry čepu byly

navrženy s ohledem na výpočty ložisek a MKP. Axiální zajištění menšího kuželíkového ložiska je zajištěno pomocí koncové desky, která je sešroubována s čepem nápravnice. Proto byly na konci čepu vyrobeny tři díry se závitem. Konec konzoly pro kotoučovou brzdou je připraven pro sešroubování s ramenem hydraulické brzdové jednotky. Díra na horní části odlitku slouží k přišroubování závěsného šroubu pro manipulaci.



Obrázek 43 Odlitek pohled z boku (Vlastní zdroj)

Na obrázku 36 je vidět bokorys odlitku. Funkcí osazení 4 je zajistit správné svaření odlitku se svařencem příčnicků.

7.1.2 Svařenec příčnicku



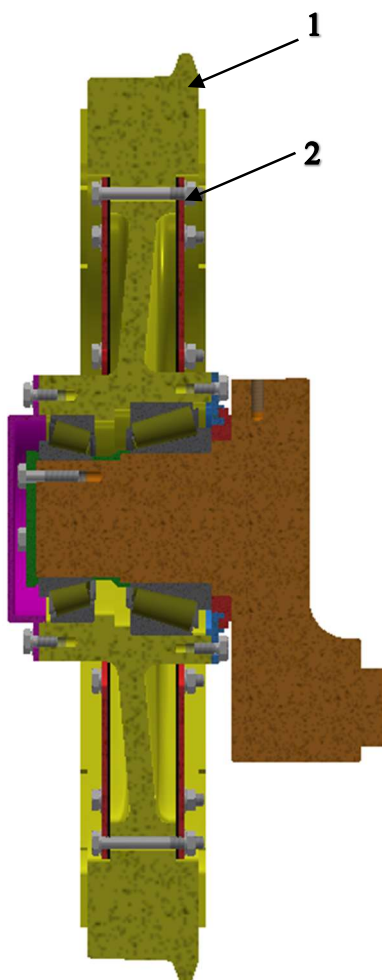
Obrázek 44 Svařenec příčnicku (Vlastní zdroj)

Svařenec příčnicku byl proveden na základě konstrukčního návrhu z plechu U-profilu Poz. 1 a plechem Poz. 2. Na Poz. 1. je provedena příprava pro půl V svar ze všech stran. Poz. 2 má úkosy pro půl V svar z obou konců. To je vidět na obrázku 37, na kterém je pro názornost i část odlitku.



Obrázek 45 Příprava pro 1/2 V svar (Vlastní zdroj)

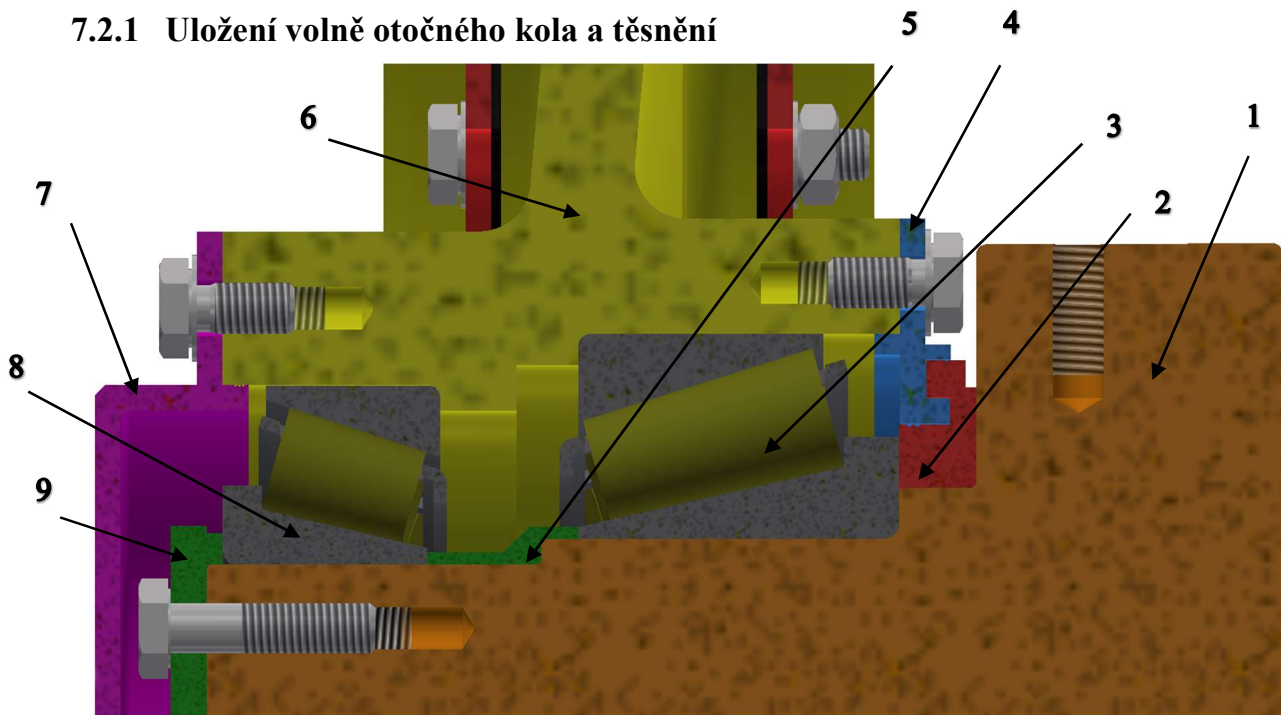
7.2 Volně otočné kolo



Obrázek 46 Řez volně otočným kolem (Vlastní zdroj)

Volně otočné kolo Poz. 1 bylo navrženo jako celistvé s brzdovými kotouči, které se vyrobí na věnci kola. Průměr kola je 680 mm. Tlumení hluku je zajištěno kompozitními tlumiči Poz. 2, které jsou z obou stran kola.

7.2.1 Uložení volně otočného kola a těsnění



Obrázek 47 Uložení volně otočného kola a těsnění prostoru ložisek (Vlastní zdroj)

Na nápravnici Poz. 1 je uloženo volně otočné kolo Poz. 6 na kuželíkových ložiskách SKF 33220 Poz. 3 a SKF 32218 J2/Q Poz. 8. Uložení ložisek na nápravnici i volně otočném kole bylo navrženo s ohledem na katalog ložisek SKF. Kroužek Poz. 5 slouží k vymezení vůle ložisek. Byl navržen s ohledem na katalog ložisek SKF. Poz. 8 je axiálně zajištěna koncovou deskou Poz. 9. K utěsnění prostoru ložisek z vnitřku slouží labyrintové těsnění. Labyrintové těsnění je tvořeno statorem těsnění Poz. 2, který je nalisován na nápravnici a rotorem Poz. 4. Rotor je sešroubována s kolem 6 šrouby M10. Vůle mezi součástmi je 0,5 mm. Z vnějšku je prostor ložisek zakrytován víkem Poz. 7. Víko je sešroubováno s kolem 6 šrouby M10.

8 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval návrhem nápravnice s volně otočnými koly pro nízkopodlažní tramvajové vozidlo. Nápravnice byla navržena pro rozchod koleje 1435 mm a respektuje rozkolí 1385, které je u tramvají jezdících v Plzni. Nápravnice obsahuje konzoly pro kotoučovou brzdu a otvory pro primární vypružení. Vzhledem k tomu, že je přímo brzděno volně otočné kolo, bylo volně otočné kolo navrženo jako celistvé s kompozitními tlumiči hluku. Brzdové obložení je zhotoveno na věnci kola. Průměr kola je 680 mm. Výpočet sil působících na dvojkolí byl proveden dle normy ČSN EN 13 103. Nápravnice je navržena pro běžný podvozek. Z vypočtených hodnot byla vypočítána brzdná síla a kolová ložiska. Dle výpočtu kolových ložisek byly navrženy rozměry čepu. Pevnost a tuhost nápravnice byly zkontrolovány metodou konečných prvků. Nápravnice dle MKP vykazuje dostatečnou pevnost a tuhost, kdy nejvyšší zjištěné napětí bylo 62,63 MPa, což odpovídá bezpečnosti 4,47 stanovené od meze kluzu materiálu odlitku GS 20Mn5. Výsledné posunutí bylo zjištěno na konzoly kotoučové brzdy a to 0,259 mm. Materiál nápravnice byl zvolen s ohledem na navrženou technologii výroby svařenec + odlitek. Materiál odlitku byl výš zmíněný GS 20Mn5 a materiál příčnicku byl zvolen S 355 J2G3. Materiály byly zvoleny s ohledem na jejich vzájemnou svařitelnost. Výsledná hmotnost nápravnice je 141 kg. Výsledná hmotnost jednoho kola je 195 kg. Celková hmotnost dvojkolí je 530 kg. Vzdálenost nejnižší části nápravnice od TK je 152,5 mm.

9 Zdroje

Knížní zdroje

- (1) HELLER, Petr; DOSTÁL, Josef. *Kolejová vozidla III*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-261-0028-7.
- (2) DOSTÁL, Josef; HELLER, Petr. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010, ISBN 978-80-7043-960-9.
- (3) ZÍMA, R.; JANOŠ, P.. Dvojkolí. Bohumín: Bonatrans Group a.s., 2012.

Internetové zdroje

- (4) KOLÁŘ, Josef. Vývojové trendy v řešení nízkopodlažních článkových tramvají [online]. [cit. 11.11.2015]. Dostupný na WWW: <http://intranet.cvut.cz/informace-pro-zamestnance/habilitace/hp/hp2007>
- (5) VŠETEČKA, Roman. Porsche, kterým se svezte opravdu každý. Jak se vyrábí tramvaj nejen pro Prahu [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://technet.idnes.cz/porsche-kterym-se-svezte-opravdu-kazdy-jak-se-vyrabi-tramvaj-nejen-pro-prahu-1b7-/tec_reportaze.aspx?c=A071015_154003_tec_reportaze_vse
- (6) Mityška, Marcel. Podvozky železničních vozidel. STROJARNA.jecool.net. [Online] [Citace: 11. 11 2015.] <http://www.strojarina.jecool.net/wp-content/uploads/Data/MZV/Podvozky.pdf>.
- (7) Říha, J. Návrh dvojkolí pro tramvajové vozidlo - Diplomová práce. Plzeň : ZČU - KKS, 2011
- (8) Skupová, D. Analýza zpomalování tramvají a vyhodnocení jeho účinků na stojící cestující - Diplomová práce. Brno : VUT - Ústav soudního inženýrství, 2012.
- (9) Slévárna Chomutov a.s. Nízkolegované a střednělegované oceli. [Online] 2008. [Citace: 24. 2. 2016.] <http://www.slevarna-cv.cz/cz/odlitky/nizkolegovane.php>.
- (10) Bohdan Bolzano s.r.o. Katalog oceli S355 J2. [Online] [Citace: 2016. 24.2. 2016.] http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP-%20Prehled%20vlastnosti_S355J2.pdf.
- (11) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES. Delivering New Urban Transportation Systems that Are Safer, More Comfortable, and Friendlier to the Environment [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <https://www.mhi-global.com/finance/ar2013/feature/traffic/index.html>
- (12) RAILWAY TECHNOLOGY. Barcelona Spain [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.railway-technology.com/projects/barcelona/barcelona4.html>
- (13) SIEMENS AG. Tram System - ULF Vienna, Austria [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/trams-and-light-rail/ultra-low-floor/ulf-strassenbahnsystem-en.pdf>
- (14) WELLIGE, Wolfgang. Almada Metro Sul do Tejo [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.railfocus.de/stadtverkehr/almada/index.html#oben>
- (15) BOMBARDIER 1997 - 2016. FLEXITY Classic – Dresden, Germany [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.flexity-dresden-germany.html>

- (16) BOMBARDIER 1997 - 2016. FLEXITY Outlook – Strasbourg, France [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.flexity-strasbourg-france.html
- (17) ŠKODA TRANSPORTATION A.S.. TRAMVAJ ELEKTRA PRAHA [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/elektra/tramvaj-14-t/>
- (18) PRAŽSKÉ TRAMVAJE A UVEDENÍ AUTOŘI. Škoda 15T ForCity se představuje....[online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: www.prazsketramvaje.cz/view.php
- (19) ŠKODA TRANSPORTATION A.S.. Nízkopodlažní tramvaje Forcity Plus Inspired by move [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-29-t/Contents.3/0/72EB67C394546F67CBBF59CA3E498226/resource.pdf>
- (20) IMHD.SK. Škoda 29T ForCity Plus [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/743/Skoda-29T-ForCity-Plus>
- (21) KONČAR - ELECTRIC VEHICLES INC.. TMK 2200 Low-floor Tramcar [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.koncar-kev.hr/docs/koncarkevEN/documents/17/2_1/Original.pdf
- (22) KONČAR ELECTRIC VEHICLES INC.. TRAMCARS [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.koncar-kev.hr/products_and_services/tramcars
- (23) HELLER, Petr. ZSDM - Dvojkolí kolejových vozidel [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://home.zcu.cz/~pheller/ZSDM/ZSDM%20Dvojkoli.pdf>
- (24) KOLÁŘ, Josef. Design of Wheelset [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.transonelong.org/2015/20151c.pdf>
- (25) ALSTOM 2015. Bogie Catalogue [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.alstom.com/cs/products-services/product-catalogue/rail-systems/components/bogies/>
- (26) SIEMENS TRANSPORTATION SYSTEMS. First Class Bogies [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-en.pdf>
- (27) IBS SAMES ENGINEERING GMBH. Download [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.sames.org/english/download/>
- (28) Niederflur-Fahrwerke: DG 1000 / DG 1435. 2006.
- (29) BOMBARDIER INC.. S-Size Bogies S1000 [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.bogieoperatorforum.com/fileadmin/Downloads_Member/BT_Datasheets/S_S1000_BM1000_04-09_EN_web.pdf
- (30) BOMBARDIER INC.. S Size Bogie S1100 [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.bogieoperatorforum.com/fileadmin/Downloads_Member/BT_Datasheets/S_S1100_Incentro_04-02_EN_web.pdf
- (31) BOMBARDIER INC.. S Size Bogie S3400 [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.bogieoperatorforum.com/fileadmin/Downloads_Member/BT_Datasheets/S_S3400_Eurotram_03-12_EN_web.pdf

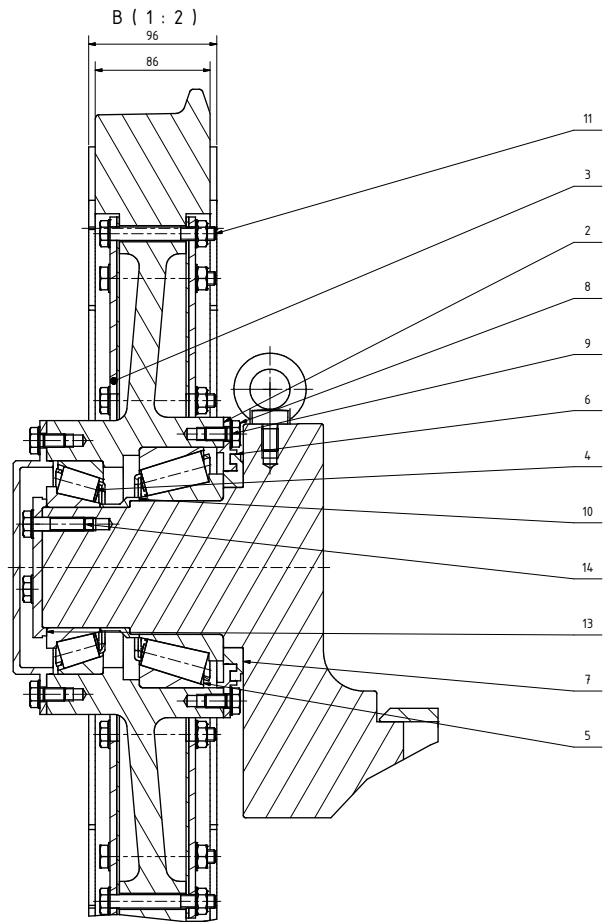
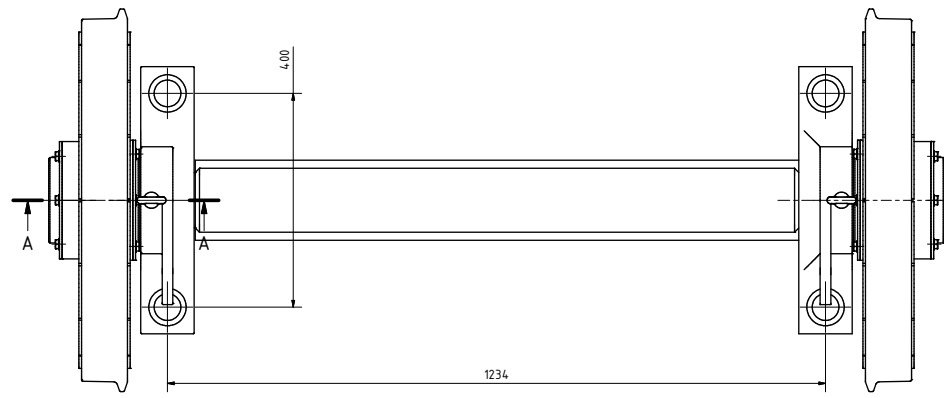
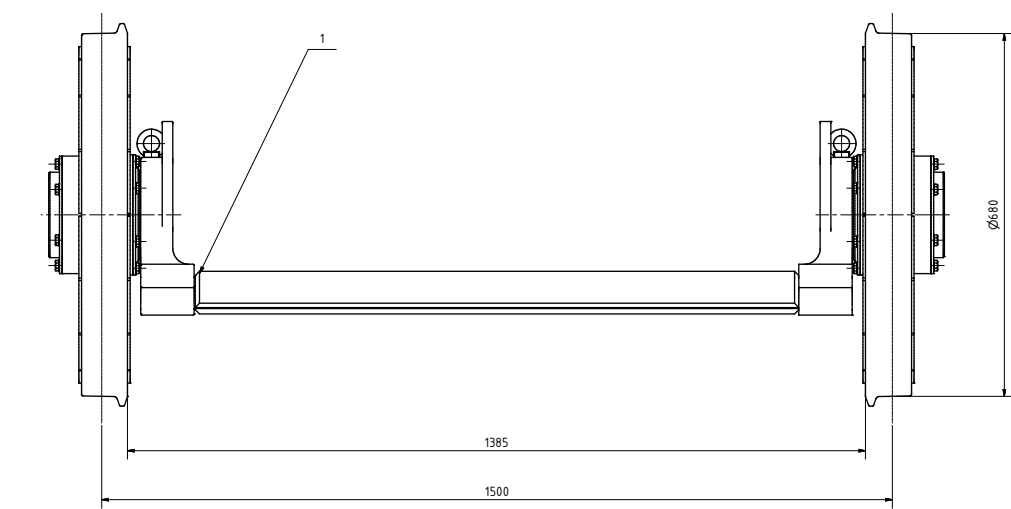
- (32) BONATRANS GROUP A.S.. Kola, nápravy [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.bonatrans.cz/cs/vyrobky/pro-osobni-dopravu/kola-napravy>
- (33) ŠKODA TRANSPORTATION A.S.. TRAKČNÍ MOTORY PRO TRAMVAJE [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://skoda.cz/cs/produkty/trakcni-motory/trakcni-motory-pro-tramvaje/>
- (34) SKF. Kuželíková ložiska, jednořadá 33220 [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/single-row/index.html?designation=33220&unit=metricUnit>
- (35) SKF. Kuželíková ložiska, jednořadá 32218 J2/Q [online]. [cit. 11.5.2016]. Dostupný na WWW: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/single-row-tapered-roller-bearings/single-row/index.html?designation=32218%20J2/Q&unit=metricUnit>
- (36) SKF. Kuželíková ložiska [online]. [cit. 13.5.2016]. Dostupný na WWW: http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_05_Kuzelikova%20loziska.pdf

Software

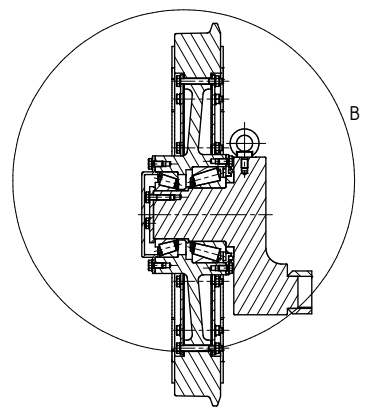
Siemens NX 9® - © 2016 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.

Inventor Professional 2016® - © 2016 Autodesk Inc.

Microsoft Office 365® - © 2016 Microsoft

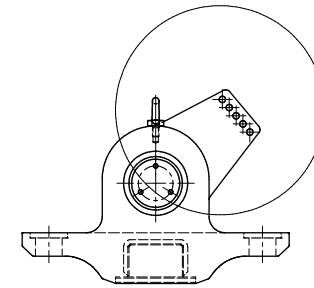
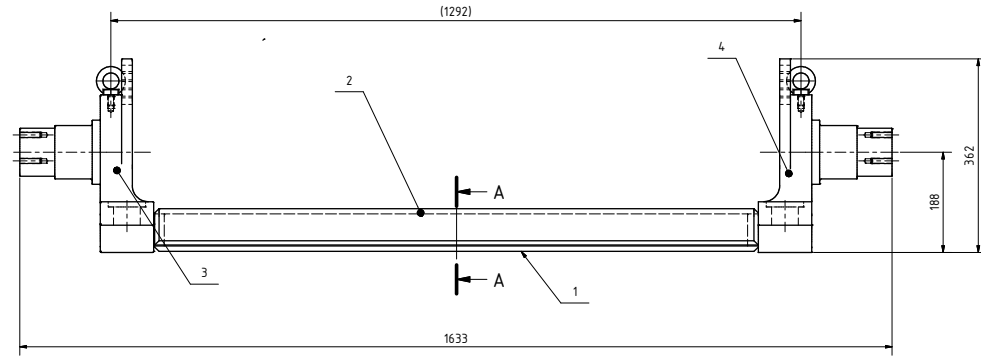


A-A (1 : 5)

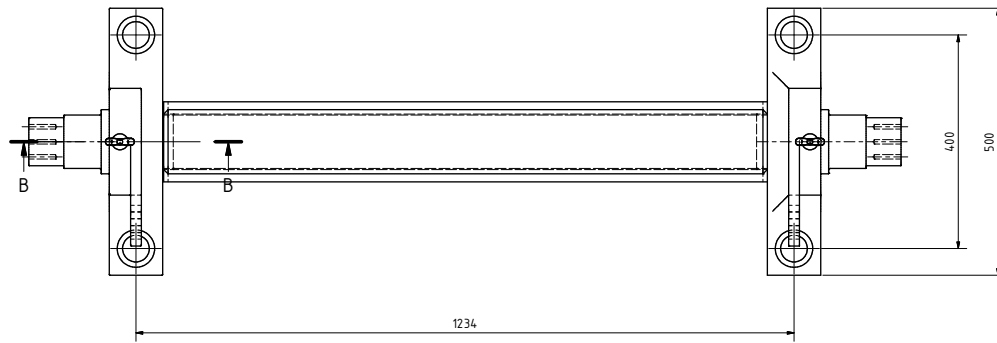
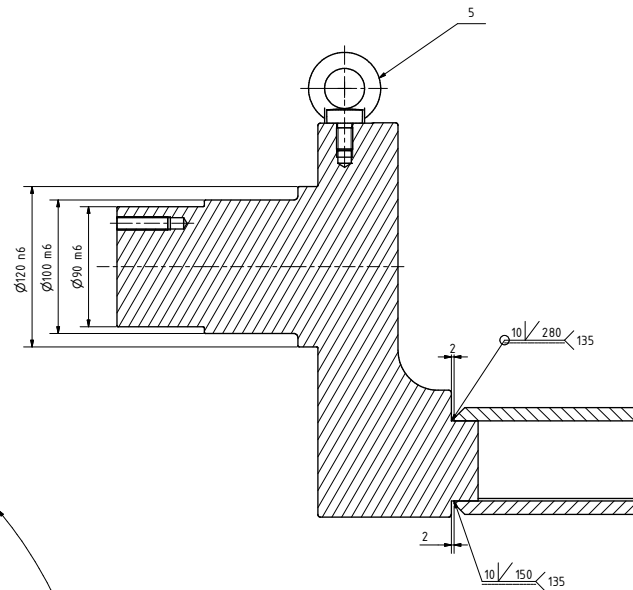


POZICE	POPIS	ČÍSLO SOUČÁSTI	MATERIÁL	HMOTNOST	KS
14	Šestihranný šroub	DIN 931-1 - M10 x 40		0,037 kg	6
13	Koncová deska	31-1113	1.0314	0,510 kg	2
12	Šestihranná matice	DIN 934 - M10		0,012 kg	24
11	Šestihranný šroub	DIN 931-1 - M10 x 80		0,061 kg	24
10	Vymezovací kroužek	41-1113	1.0314	0,234 kg	2
9	Pružná podložka	DIN 137 - B10		0,002 kg	78
8	Šestihranný šroub	DIN 933 - M10 x 20		0,024 kg	24
7	Štator těsnění	31-1114	1.0314	0,942 kg	2
6	Rotor těsnění	31-1112	1.0314	0,9 kg	2
5	Kuželíkové ložisko	33220		6,715 kg	2
4	Kuželíkové ložisko	32218 J2/Q		3,331 kg	2
3	Kompozitní tlumič			8,926 kg	4
2	Volně otočné kolo			162,612 kg	2
1	Nápravnice	11-1111		14,1238 kg	1

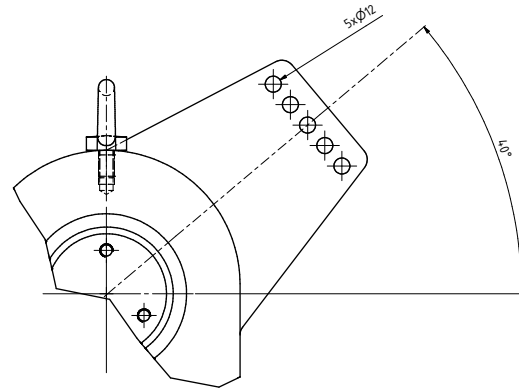
Mřížka	1:5	Měřítko (kg)	530	Prostředí		Formát	A1
	Kreslil	VJK	13.5.2016	Nápravnice s volně otočnými koly			
	Datum						
KKS	Schválil			Číslo dokumentu: 11-0001			
	Datum						
KATEDRA KONSTRUKČNÍHO STROJÁŘSTVÍ		Druh dokumentu		VÝKRES SESTAVY		list 1 z celk. 1	



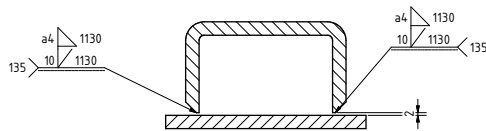
B-B (1 : 2)



C (1 : 2)



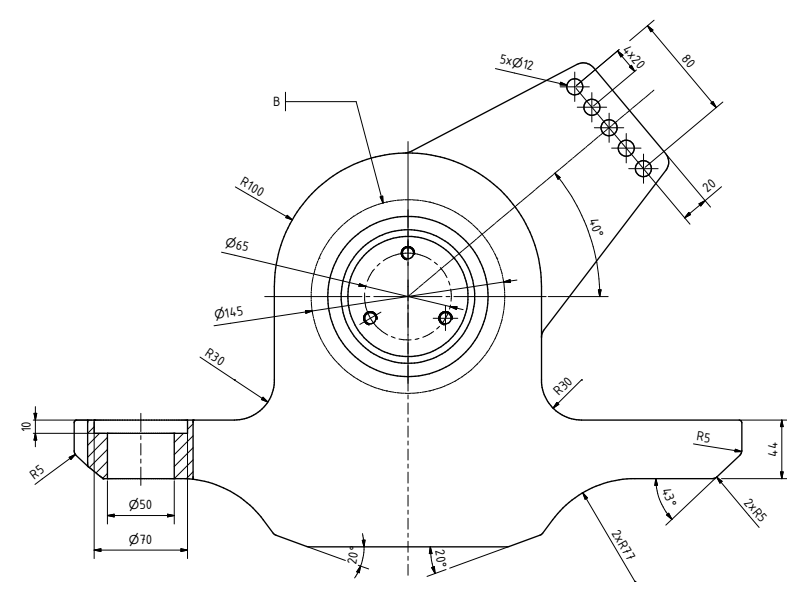
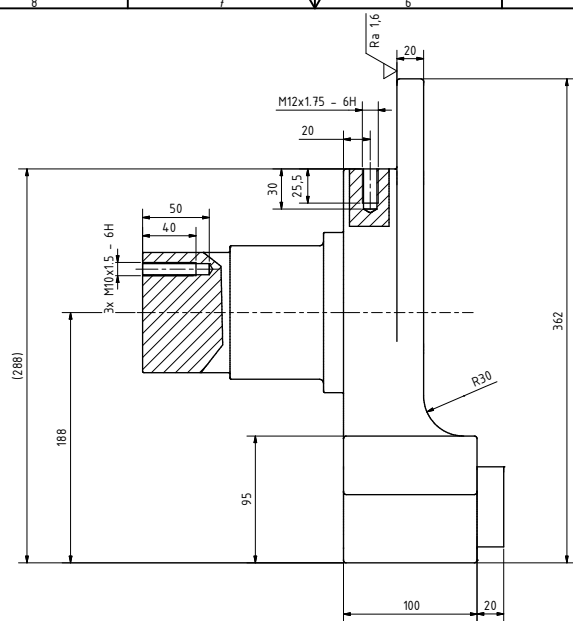
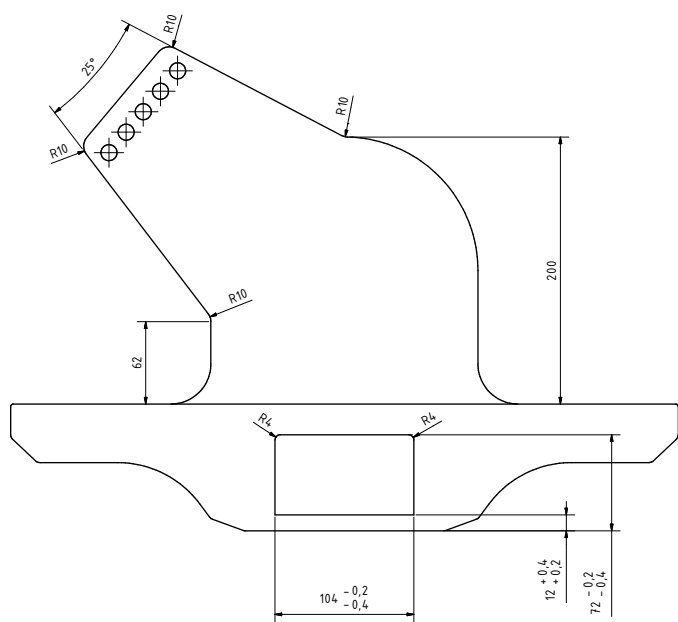
A-A (1 : 2)



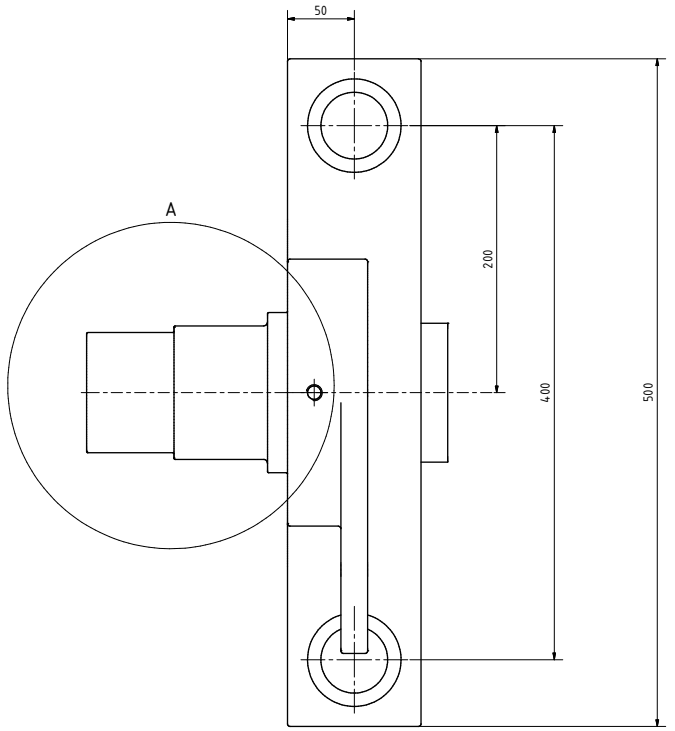
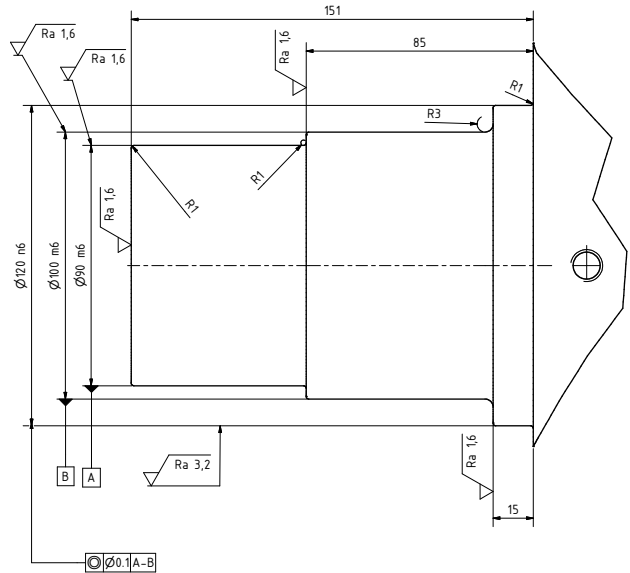
ZÁVĚSNÝ ŠROUB POZ. 5 SLOUŽÍ PRO MANIPULACI. PO VYJMUTÍ POZ. 5 POUŽÍT ŠROUB POZ. 6 K ZASLEPENÍ OTVORU. ZÁVIT LEPIT LEPIDLEM LOCTITE 243.

POZICE	POPIS	ČÍSLO SOUČÁSTI	MATERIÁL	HMOTNOST	KS
1	Příčník	31-4444	S355 J2G3	13,23 kg	1
2	Průčník U-profil	31-3333	S355 J2G3	19,57 kg	1
3	Odlitek 1	Z1-6666	GS 20Mn5	54,03 kg	1
4	Odlitek 2	Z1-5555	GS 20Mn5	54,05 kg	1
5	Závěsný šroub	DIN 580 - M12		0,18 kg	2
6	Stavěcí šroub s vnitřním šestihranem	CNS 4482 - M12 x 16		0,01 kg	2

Mřížka	1:5	Měřítko (kg)	14,1	Prostředí		Formát	A1
	Kresil	Vik	13.05.2016	Návrh		Nápravnice	
	Datum	Schválil		Číslo dokumentu		11-1111	
KKS	KATEDRA KONSTRUKOVÁNÍ STROJŮ	Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	11-1111		str. 1 z celk. 1	



A (1:1)



B) ZAROVNAT DOSEDACÍ PLOCHU PRO STATOR TĚSNĚNÍ
NEKOTOVANÉ POLOMĚRY R2

Textura papíru	Hwang ISO 15175	PDF číslo	1.2	Průřez	ISO 2768 - mK
$\sqrt{Ra 6,3}$ (✓)	$-0,4$ $+0,4$	Velikost listu	54	Toleranci	ISO 8015
Materiál - Pásovec	Odlitek - GS 20Mm5	Formát	A1	Průřez	
Fakulta Strojní Západočeské Univerzity v Plzni	Kreslil Vik 13.05.2016	Název	Odlitek 1		
Katedra Konstruování Strojů	Schválil Datum	Číslo dokumentu	21-6666		
Druh dokumentu		VÝROBNÍ VÝKRES			