

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studie podvozku pro metro

Autor: **Bc. Martin VEJVODA**

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

Akademický rok 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin VEJVODA**
Osobní číslo: **S12N0029P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Studie podvozku pro metro**
Zadávající 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:

Studie trakčního podvozku pro vozidlo metra. Výkon trakčního motoru cca 170 kW. Hledat cesty pro nízkou hmotnost a dobré jízdní vlastnosti. Návrh nestandardního způsobu vypružení.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše současných podvozků pro vozidla metra.
2. Návrh vlastního koncepčního řešení.
3. Celková dispozice podvozku.
4. Pevnostní výpočet vybraného dílu.
5. Výrobní výkres vybraného dílu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla I.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2007

HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla II.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2009

HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla III.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2011

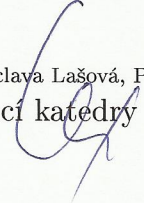
LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004

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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Petr Heller, CSc.**
Regionální technologický institut
Konzultant diplomové práce: **Ing. Robert Zemánek**
Konstrukční kancelář Ing. Robert Zemánek
Datum zadání diplomové práce: **23. září 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2014**


Doc. Ing. Jří Staněk, CSc.
děkan



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


V Plzni dne 23. září 2013

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:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. Ing. Petru Hellerovi, CSc. za cenné rady, odborné připomínky a metodické vedení práce. Také bych chtěl poděkovat konzultantovi mé diplomové práce panu Ing. Robertu Zemánkovi za veškeré poskytnuté podklady, dokumenty a informace z praxe. Nakonec bych chtěl také poděkovat celé své rodině a přátelům za jejich podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Vejvoda	Jméno Martin		
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Heller,CSc.	Jméno Petr		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Studie podvozku pro metro			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	18
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Práce pojednává o konstrukci trakčního podvozku pro vozidlo metra. Hlavním požadavkem a snahou při tvorbě návrhu bylo snížit hmotnost podvozku, zejména jeho rámu. Výsledkem je provedení primárního vypružení pomocí úhlové páky a tím výrazné zkrácení podélníků rámu. Práce dále obsahuje výpočty pro návrh a dimenzování některých dílů.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Trakční podvozek, metro, rám, úhlová páka, závěskový pohon, pneumatické vypružení, dvojkolí</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Vejvoda	Name Martin	
FIELD OF STUDY	2301T001 "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	Study of bogie for metro		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	18
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis deals with the design of traction bogie for Metro vehicle. The main requirement and effort in developing the proposal was to reduce the weight of the bogie, mainly its frame. The result is the primary suspension using a angled lever which cause significant shortening of the longitudinal of the frame. The thesis also includes calculations for the design and dimensioning of some parts of the bogie.
KEY WORDS	Traction chassis, metro, frame, angled lever, tow drive, air suspension, wheel set

Obsah

1	Úvod.....	4
1.1	Metro ve světě.....	4
1.2	Pražské metro.....	5
2	Rešerše podvozků vozidel metra.....	7
2.1	Podvozek vozidel pražského metra typ 81-71.....	7
2.2	Podvozek vozidel pražského metra typ M1.....	8
2.3	Trakční a běžný podvozek pro lehké metro SIEMENS SF 1000.....	9
2.4	Trakční a běžný podvozek pro lehké metro SIEMENS SF 1000 HS.....	10
2.5	Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2000.....	11
2.6	Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2100.....	12
2.7	Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2100 IB.....	13
2.8	Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 3000.....	14
2.9	Vývoj trakčního podvozku pro metro typu Syntegra – SIEMENS.....	15
2.10	Trakční a běžný podvozek pro metro C 20 – BOMBARDIER.....	16
2.11	Podvozek Flexible Frame Bogie – BOMBARDIER.....	17
2.12	Podvozek BM3000LIM - BOMBARDIER.....	18
3	Navržený trakční podvozek metra.....	20
3.1	Referenční vozidlo – pětivozová jednotka metra M1.....	20
3.2	Sestava navrženého podvozku.....	21
3.3	Dvojkolí.....	23
3.3.1	Kolo.....	23
3.3.2	Náprava.....	24
3.3.3	Nápravové ložisko.....	33
3.3.4	Výpočet nápravového ložiska (ložiskové jednotky CTBU).....	34
3.3.5	Uložení dvojkolí.....	36
3.4	Primární vypružení a vedení dvojkolí.....	36
3.4.1	Úhlová páka.....	37
3.4.2	Paralelní tlumič vypružení P80.....	38
3.4.3	Výpočet vypružení.....	39
3.5	Sekundární vypružení.....	43
3.5.1	Pneumatické pružiny a tlumiče.....	43
3.5.2	Torzní stabilizátor.....	44
3.6	Brzdy.....	45
3.7	Pohon.....	47
3.7.1	Motor.....	47
3.7.2	Převodovka.....	48
3.8	Vazba skříně a podvozku – tažně tlačná tyč.....	48
3.9	Rám podvozku.....	49
4	Pevnostní výpočet úhlové páky pomocí pevnostní analýzy metodou konečných prvků..	51
4.1.1	Okrajové podmínky.....	51
4.1.2	Konečnoprvkový model.....	52
4.1.3	Výsledky.....	53
5	Závěr.....	55

Seznam obrázků

Obrázek 1 Londýn - parní Metropolitan Railway [5].....	5
Obrázek 2 Třívozová souprava metra Ečs [6].....	5
Obrázek 3 Souprava metra 81-71 [6]	6
Obrázek 4 Schéma linek pražského metra [7]	6
Obrázek 5 Podvozek pražského metra typ 81-71 [3]	7
Obrázek 6 Podvozek pražského metra typ M1 [3].....	8
Obrázek 7 Podvozek lehkého metra SIEMENS SF 1000 [3]	10
Obrázek 8 Podvozek lehkého metra SF 1000 HS [3].....	11
Obrázek 9 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2000 [3]	12
Obrázek 10 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2100 [3].....	13
Obrázek 11 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2100 IB [3].....	14
Obrázek 12 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 3000 [3].....	15
Obrázek 13 Vývoj podvozku pro metro typ Syntegra – SIEMENS [3].....	16
Obrázek 14 Podvozek pro metro typ C20 - BOMBARDIER, boční pohled [3]	16
Obrázek 15 Podvozek pro metro C20 – BOMBARDIER [3].....	17
Obrázek 16 Podvozek Flexible Frame Bogie - BOMBARDIER, boční pohled [3]	17
Obrázek 17 Podvozek Flexible Frame Bogie – BOMBARDIER [3]	18
Obrázek 18 Podvozek BM3000LIM – BOMBARDIER [3]	19
Obrázek 19 Referenční vozidlo - pětivozová jednotka metra M1	21
Obrázek 20 Pohled na celkovou sestavu navrženého podvozku pro metro.....	21
Obrázek 21 Prostor vymezený pro přírodní kolejnice a jejich držáky a kryty zabezpečovacího zařízení.....	22
Obrázek 22 Vlevo rozstřel sestavy kola, vpravo řez sestavou kola od firmy Bonatrans	23
Obrázek 23 Naměřená hladina hluku, vlevo průjezd obloukem, vpravo jízda po přímé trati ..	23
Obrázek 24 Náprava	24
Obrázek 25 Schéma zatížení nápravy.....	25
Obrázek 26 Rozměry hnací nápravy	27
Obrázek 27 Kuželíková ložisková jednotka od firmy SKF CTBU	34
Obrázek 28 Schéma zatížení pro výpočet ložiska	34
Obrázek 29 Vysvětlení rozměrů vyskytujících se ve výpočtu.....	35
Obrázek 30 Řez uložením dvojkolí	36
Obrázek 31 Primární vypružení	37
Obrázek 32 Úhlová páka.....	38
Obrázek 33 Přepočtené vychylení.....	39
Obrázek 34 Řez vypočtenou vinutou pružinou	43
Obrázek 35 Sekundární vypružení	44
Obrázek 36 Torzní stabilizátor.....	45
Obrázek 37 Integrované kotouče v kolech	46
Obrázek 38 Brzdová jednotka DAKO	46
Obrázek 39 Motor od firmy Škoda Electric.....	47
Obrázek 40 Převodovka.....	48
Obrázek 41 Tažně tlačná tyč.....	49
Obrázek 42 Rám podvozku.....	49
Obrázek 43 Okrajové podmínky	52
Obrázek 44 Konečnoprvkový model úhlové páky	52
Obrázek 45 Rozložení napětí podle von Misesovy hypotézy v tělese úhlové páky	53
Obrázek 46 Špička napětí o velikosti 224 MPa	53
Obrázek 47 Napětí na spodku úhlové páky, nejvyšší hodnota napětí 178 MPa	54
Obrázek 48 Posunutí v příčném směru x	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Dovolená napětí.....	27
Tabulka 2 Výsledné hodnoty	33
Tabulka 3 Vypočtené hodnoty pružiny	42
Tabulka 4 Otáčky dvojkolí a motoru v při jednotlivých rychlostech vozidla	48
Tabulka 5 Síly zatěžující úhlovou páku.....	51

1 Úvod

Co je to vlastně metro? „Metro je rychlodráha se samostatným, od ostatních dopravních prostředků odděleným drážním tělesem (kolejovým svrškem), s mimoúrovňovým křížováním s ostatní dopravou a chodci, s nástupišti v úrovni podlah vagonů a jezdí v oddílech na signály. Sdělovací a zabezpečovací zařízení a řízení metra jsou automatické. Křížení linek je mimoúrovňové, ve společné křížovací stanici. Trasy metra mohou být v tunelech, povrchové, nebo na vyvýšených tělesech. Provoz metra je bezpečný, jistý, pohodlný, nezávislý na událostech na ulicích. Oproti tramvaji s jízdou na dohled, s křížováním v úrovni je cestovní rychlost metra zhruba dvojnásobná.“ [3, Heller, 2011, str. 103]

Po celém světě přibývá měst s počtem obyvatel nad 1 milion. Aby se v takovémto městě ulevilo povrchové dopravě, je potřeba vybudovat nějaký dopravní prostředek v jiné úrovni. Jedná se buď o nadzemní, nebo podzemní dráhu, tedy metro. [3]

Nejčastěji je metro budováno jako koncepční systém nesení a vedení, tedy kola s kolejnicí. Díky tomu, že se metro pohybuje v tunelu, nemají na tuto dopravu výrazný vliv klimatické podmínky na povrchu. Poměrně čisté a stálé prostředí zaručuje čisté koleje a tím také vysoký součinitel adheze až 0,6. Naopak stinnou stránkou takto vysokého součinitele je, že se při jízdě v oblouku více opotřebovávají kola i kolejnice a také je vyšší nebezpečí vykolejení. Proto se okolky kol vozů metra mažou. Teplotní podmínky jsou v tunelech stálé, v Praze je to kolem 18° C, proto metro v našich podmínkách nepotřebuje vytápění. Jiné je to samozřejmě v severských městech. Naproti tomu v tropech je zase třeba klimatizace. [3]

Vozy metra jsou závislé trakce. Napájení je buď z třetí kolejnice (i v Praze) stejnosměrným proudem o napětí 750 V. Nebo je použito napětí 1500 V, potom je vůz napájen z horní troleje přes sběrač na střeše. [3]

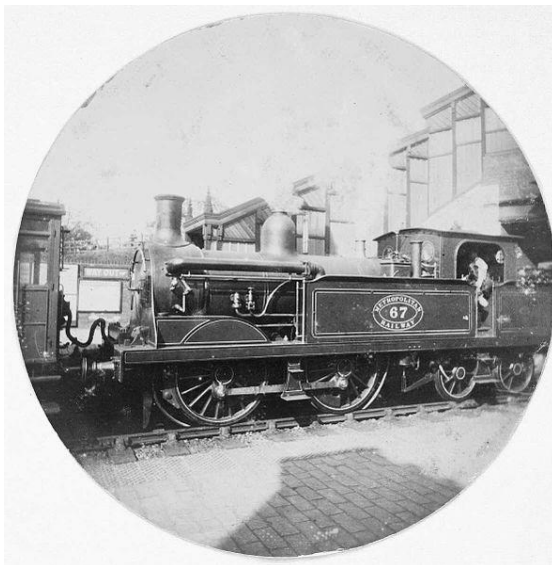
Jelikož je obvyklá výška nástupiště 1100 mm, nemusí se řešit problémy nástupu, jako je tomu např. u tramvají. Naopak je pod vozidlem dostatek místa a tak je tam uložena veškerá pneumatická i elektrická výzbroj plus další komponenty potřebné pro jízdu a brzdění. Veškerý prostor vozů je proto k dispozici přepravě cestujících. [3]

1.1 Metro ve světě

Název Metro vznikl zkrácením názvu Metropolitan Railway, což znamená v překladu metropolitní železnice. Toto označení proniklo i do českého jazyka. V některých zemích se metru říká také podzemní dráha, např. v Německu je pojmenováno U-Bahn. [5]

Historie metra se začala psát roku 1863 v Londýně, konkrétně 10. ledna, kdy mezi stanicemi Paddington a Farrington vyjel na trať první vůz poháněný parou. Parní trakce však byla docela problematická a navíc britský parlament vydal zákon zakazující parní pohon v těchto podmínkách. Proto se přemýšlelo o zavedení jiného druhu pohonu. Uvažovalo se například o tažení lanem a dalších nekonvenčních systémech, ale nakonec se přistoupilo k elektřině. V kontinentální Evropě bylo poprvé zbudováno metro v Budapešti roku 1896. Zde byl provoz již od počátku plně elektrifikován. V dalších letech pak ke zbudování podzemní dráhy přistoupilo mnoho dalších velkoměst a to z důvodu přeplnění povrchové dopravy. [5]

Nejrozsáhlejší síť tratí na celém světě se nachází v Šanghaji. Její délka byla v roce 2010 420 km a stále se rozrůstá. V roce 2020 by měla přesáhnout délku 800 km. Největší počet stanic má metro v New Yorku, konkrétně je to 469 stanic a nejvytíženější jsou pak moskevské dráhy, po kterých se denně přepraví 8 až 9 miliónů cestujících. [5]



Obrázek 1 Londýn - parní Metropolitan Railway [5]

1.2 Pražské metro

Jedná se o jedinou síť podzemní dráhy v České republice. V současné době má tři linky značené písmeny a barvami: A (zelená), B (žlutá), C (červená). Do budoucna se plánuje s výstavbou nové linky D (modrá). Celková délka sítě je 59,3 km a má 57 stanic. [6]

O potřebě podzemní dráhy se začalo mluvit už v 19. století, další plány se chystaly za první republiky a počátkem druhé světové války již probíhaly přípravné práce. Během války byly však práce přerušeny a myšlenka opět ožila až v 60. letech 20. století. Nejprve se počítalo se stavbou podpovrchové tramvaje, ale projekt byl nakonec změněn na metro, které je na tramvajích nezávislé. Velká část všech tratí byla vyráběna hloubením, tunely v oblasti Pankráce jsou pak ražené. První vůz vyjel do kolejiště 9. května 1974 a bylo to na prvním dostavěném úseku linky C. Nejstarší část linky A byla uvedena do provozu roku 1978 a linka B byla spuštěna roku 1985. [6]



Obrázek 2 Třívozová souprava metra Ečs [6]

Do provozu na lince C byly nasazeny nové třívozové soupravy typu Ečs vyráběné Mytiščínským strojírenským závodem. Tyto vozy zde byly provozovány až do roku 1997. Vozy byly vyvíjeny speciálně pro pražské metro. Měly čtyři dveře po každé straně, každý svou vlastní kabinu řidiče (neexistovali tedy vložené vozy), složené z rámu ze svařovaných ocelových profilů, ke kterým byly připevněny stropnice pokryté ocelovým plechem a

přivařeny vnější boční stěny. Celkem zde bylo v této době provozováno 12 takovýchto souprav, které jezdili v intervalu 180 s. [6]

Roku 1979 vyjeli na linku C poprvé pětivozové soupravy, také typu Ečs. Pětivozová souprava je nejdelší, kterou je v pražském metru možno provozovat. [6]



Obrázek 3 Souprava metra 81-71 [6]

Dalšími vozy, které jezdily v pražském metru, jsou soupravy 81-71 vyráběné také Mytiščinským strojírenským závodem. Poprvé vjely do kolejiště roku 1978 a jezdili až do roku 2009. Mezi léty 1996 až 2011 bylo 93 těchto pětivozových souprav modernizováno na typ 81-71M. Tyto modernizované soupravy jsou provozovány do dnešní doby a to na linkách A a B. [7]

Po modernizaci zabezpečovacího zařízení na lince C byly nakoupeny vozy M1 vyráběné konsorciem ČKD Praha, ADtranz a Siemens (později Siemens kolejová vozidla). S prvním cestujícím vyjela tato souprava na trať poprvé 27. ledna 2000. Dnes je linka C obsluhována výhradně těmito vozy. [7]

V současnosti se pražským metrem přepraví denně v průměru 1,6 milionu lidí, za rok 2012 to bylo tedy celkem 589 miliónů cestujících. Tuto kapacitu zajišťuje 107 vozových souprav nebo jednotek, které jsou aktuálně v provozu. Při nejvyšší špičce (ranní) jezdí na lince A 17 souprav, linku B obsluhuje 34 souprava a linku C 33. Nejkratší interval na lince A v této době činí 150 s, na lince B 140 s a na lince C 115 s (dle jízdních řádů platných od 1.9.2010). [7]



Obrázek 4 Schéma linek pražského metra [7]

2 Rešerše podvozků vozidel metra

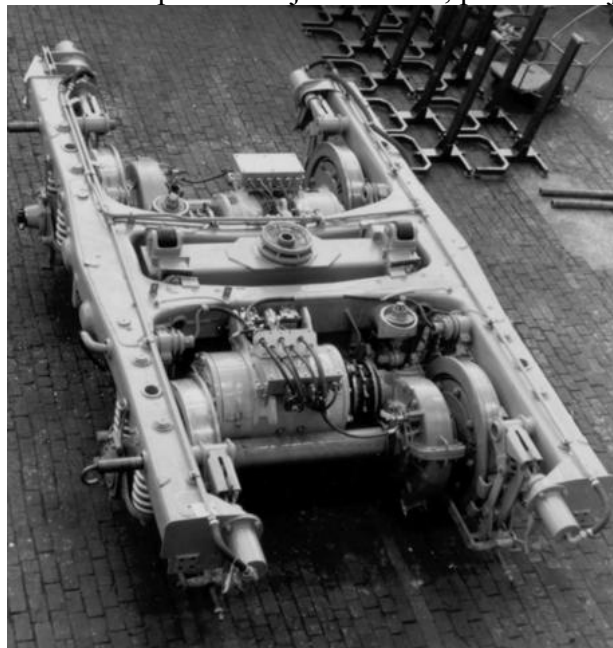
Podvozky vozidel metra mají vzhledem k tomu, že se pohybují v tunelu, příznivější provozní podmínky, než je tomu u ostatních železničních vozidel. Zejména je to vyšší součinitel adheze a s ním spojené výhody a nevýhody. Dalšími okolnostmi, které ovlivňují konstrukci podvozků, jsou např. zvýšená podlaha (obvykle kolem 1150 mm nad temenem kolejnice), napájení obvykle z třetí kolejnice a proto nutnost sběrače proudu nebo požadavek na konstantní výšku podlahy bez závislosti na zatížení.

Dalším požadavkem na konstrukci těchto podvozků je nutnost splnění příslušných částí norem. V Česku je to norma ČSN 281310 Vozy metra pro přepravu cestujících – Technické požadavky a zkoušky. V zahraničí jsou to pak příslušné místní normy.

Podvozky lze rozdělit na trakční a běžné. Mají obecně menší rozměry než železniční podvozky, tj. rozvor od 2100 mm do 2300 mm, průměr dvojkolí do 850 mm. Nápravové zatížení pak bývá kolem 13,5 t, o něco vyšší pak pro asijský trh. [3]

2.1 Podvozek vozidel pražského metra typ 81-71

Tyto podvozky byly vyráběny v ruském Mytiščinském strojírenském závodě. Jedná se o podvozek trakční, v původní ruské koncepci s rozchodem 1520 mm, pro potřeby pražského metra upravený na 1435 mm. Rozvor podvozku je 2100 mm, průměr dvojkolí je 780 mm.



Obrázek 5 Podvozek pražského metra typ 81-71 [3]

Jedná se o podvozek s otevřeným rámem tvaru H, tedy bez čelníků, s dvěma příčnicí a dvěma podélníky. Primární vypružení je provedeno dvojicí šroubových pružin. Vedení nápravového ložiska je plochými pásy. Dvojkolí bylo ve své původní podobě s pryží vypruženými koly a plnou nápravou. Pohon je závěškový se stejnosměrným trakčním motorem o výkonu 110 kW, který je zavěšený na rámu podvozku, tedy zcela vypružený. Motor má vlastní ventilátor. Převodovka byla jednostupňová, mezi ní a motorem byla kardanová spojka ruské výroby. Sekundární vypružení je řešeno kolébkou, na které se v její horní části uprostřed nachází kulová torna, na jejím konci jsou pak dvě rolny. Na těchto prvcích spočívá skříň vozu. Kolébka je na šroubových pružinách, se kterými je paralelně

šikmý hydraulický tlumič. Přenos podélných sil mezi rámem podvozku a skříní je pomocí kluznic na konci kolébky.

Brzdění je zajištěno oboustranně špalíkovou brzdou, která je na každém kole. Každé kolo má také svůj vlastní brzdový válec, jeden je pak ještě vybaven pružinou střídačové brzdy. Sběrač proudu je ne boku podvozku, umístěný na trámci ze sibiřské břízy, který je uložen mezi dvěma ložiskovými skříněmi.

Tyto podvozky byly mezi léty 1994 až 1996 rekonstruovány a modernizovány. Práce zajistila firma ŠKODA. Modernizace byla zejména ve výměně vedení nápravového ložiska plochými pásy za vedení čepy. Dále pak byla nahrazena původní kardanová spojka za zubovou spojku firmy KWD. Rekonstrukce se pak dotkla také konzole závěsky převodovky. [3]

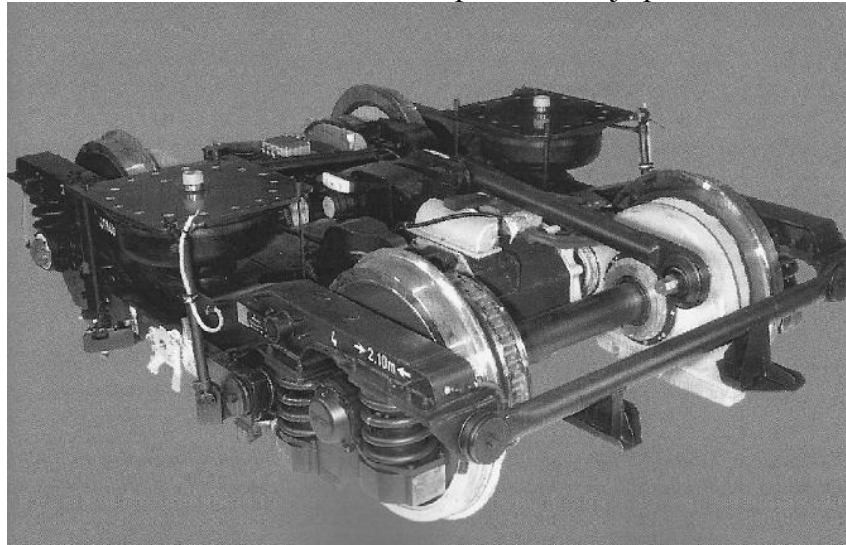
2.2 Podvozek vozidel pražského metra typ M1

Tyto podvozky vyráběla firma ADtrans, později Bombardier. Jedná se o podvozky na současné světové úrovni. Byly použity na jednotkách metra M1 dodávaných do pražského metra. Tyto jednotky vyráběla firma ČKD Dopravní systémy, později Siemens.

Konstrukce rámu je tvaru H, jedná se tedy o otevřený rám se dvěma prohnutými podélníky a jedním příčnickem. Rám je torzně poddajný, svařovaný, průřezů skříňových.

Kola dvojkolí jsou průměru 850 mm a jsou monobloková. Na vnitřní straně kol je tlumič hluku. Rozchod dvojkolí je 1435 mm a rozvor náprav potom 2100 mm. Primární vypružení je Flexiguide. To znamená, že je složeno ze šroubovitých ocelových pružin a vedení nápravového ložiska je zajištěno pomocí dvojice paralelně řazených pryžokovových vodících prvků. Díky tomuto systému primárního vypružení mohou kola při jízdě v oblouku zaujímat částečně radiální polohu a tím se snižuje jejich opotřebení.

Sekundární vypružení je zajištěno dvojicí pneumatických pružin a dále pomocí sériově řazené kónické pružiny z elastomeru. Ta má navíc také funkci nouzového vypružení, kdyby došlo k závadě v pneumatickém systému sekundárního vypružení. Vzduchové měchy zajišťují téměř konstantní výšku podlahy vozu metra nad temenem kolejnice a to nezávislou na velikosti zatížení vozu. Pryžová pružina navíc umožňuje natáčení podvozku v oblouku. Dále je zde paralelně umístěný torzní stabilizátor. Útlum případného kmitání je zajištěn pomocí svislých a příčného tlumiče. Přenos sil mezi skříní a podvozkem je pomocí tažně-tlačné tyče.



Obrázek 6 Podvozek pražského metra typ M1 [3]

Pohon je závěskový, složený z plně odpruženého trakčního motoru o výkonu 160 kW. Mezi převodovkou a spojkou se nachází zubová spojka, která umožňuje svislé pohyby motoru vůči převodovce. Převodovka je jednostupňová, zavěšená na svislé závěsce. Sběrač proudu je uložen na trámci spojujícím přední a zadní ložiskovou skříň a je po obou stranách podvozku. Každé dvojkolí je dále brzděno jednou kotoučovou brzdou. Kotouč je nalisován na nápravě, brzdová jednotka je připevněna na konzole vyčnívající z rámu. Jedna z jednotek je navíc vybavena střídačovou brzdou. [3]

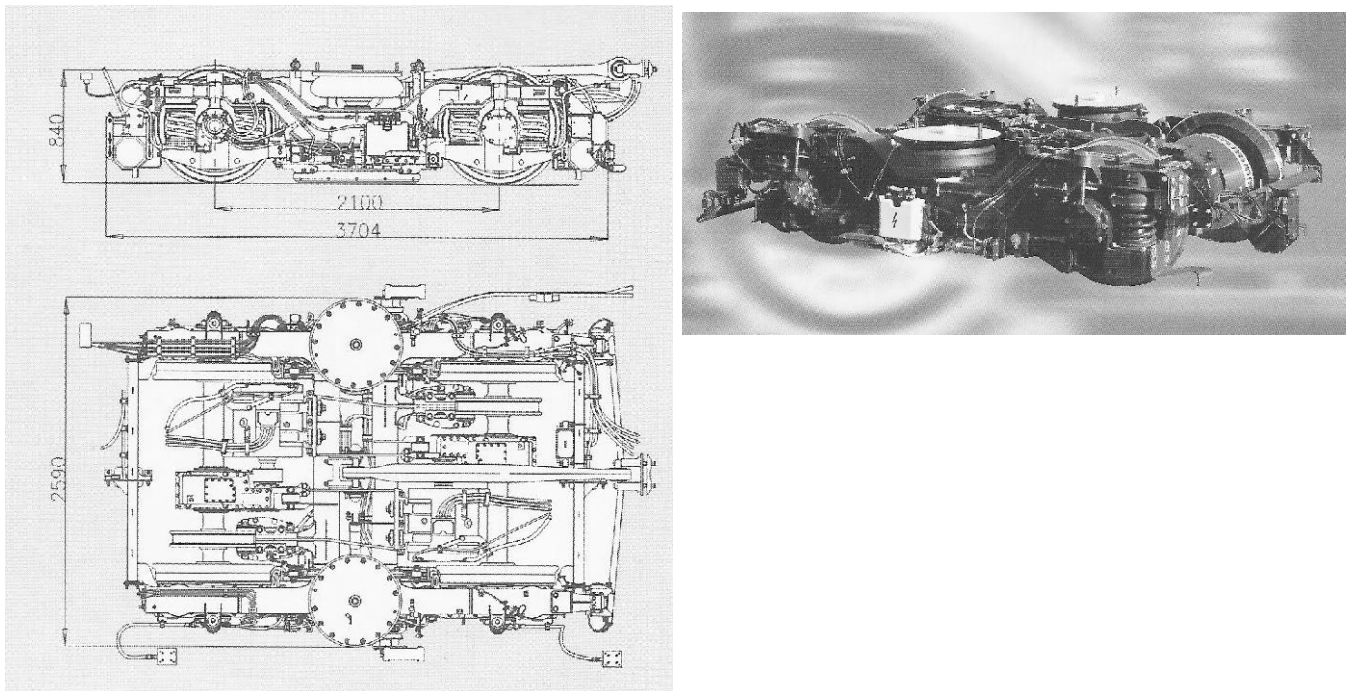
2.3 Trakční a běžný podvozek pro lehké metro SIEMENS SF 1000

Tento podvozek od firmy Siemens byl konstruován vzhledem k požadavkům na moderní metro co nejjednodušší, pro rychlosti do 80 km/h a nápravové zatížení 13 t na nápravu. Jednotky s těmito podvozky jezdí v Norimberku a Oslu. Je vhodný pro jednotky metra, které nemají všechny podvozky trakční, protože běžný podvozek je shodný s trakčním, akorát jsou vynechány části pohonu. Takováto modulární koncepce pak redukuje počet různých dílů ve výrobě, skladování takovýchto dílů a i usnadňuje následné opravy.

Průměr nového dvojkolí je u tohoto modelu 850 mm. Rozvor je 2100 mm, podle výrobce je takovýto rozvor vhodný pro průjezdy menšími oblouky a tím se snižuje opotřebení trati. Primární vypružení je zde řešeno koncepcí Flexiguide, což je dvojice ocelových šroubovitých pružin s pryžokovovými prvky pro vedení nápravového ložiska. Navíc je připojen paralelní hydraulický tlumič. Rám je otevřený tvaru H se dvěma prohnutými podélníky a jedním hlavním příčnickem. Je torzně pružný. Přes pružné elementy jsou k němu pak přidělané dva čelníky, které mají pouze funkci nesení pomocných zařízení.

Sekundární vypružení je opět pneumatické pomocí dvojice měchů. Je tak zajištěna možnost natáčení podvozku v oblouku a také udržení konstantní výšky podlahy nad temenem kolejnice, bez ohledu na velikost zatížení. Přenos sil mezi skříní a podvozkiem je opět pomocí tažně-tlačné tyče.

Pohon je u hnacích podvozků pomocí dvojice trakčních motorů o výkonu 140 nebo 190 kW. Motor je plně odpružený, přes zubovou spojkou připojen k převodovce, která je opět zavěšena na svislé závěsce. Brzdy jsou kotoučové, na každé nápravě jedna. Brzdová jednotka je upevněna na konzole hlavního příčnicku. Sběrač proudu z třetí kolejnice je umístěn na boku rámu. V případě potřeby je možná i montáž kolejnicové brzdy. [3]



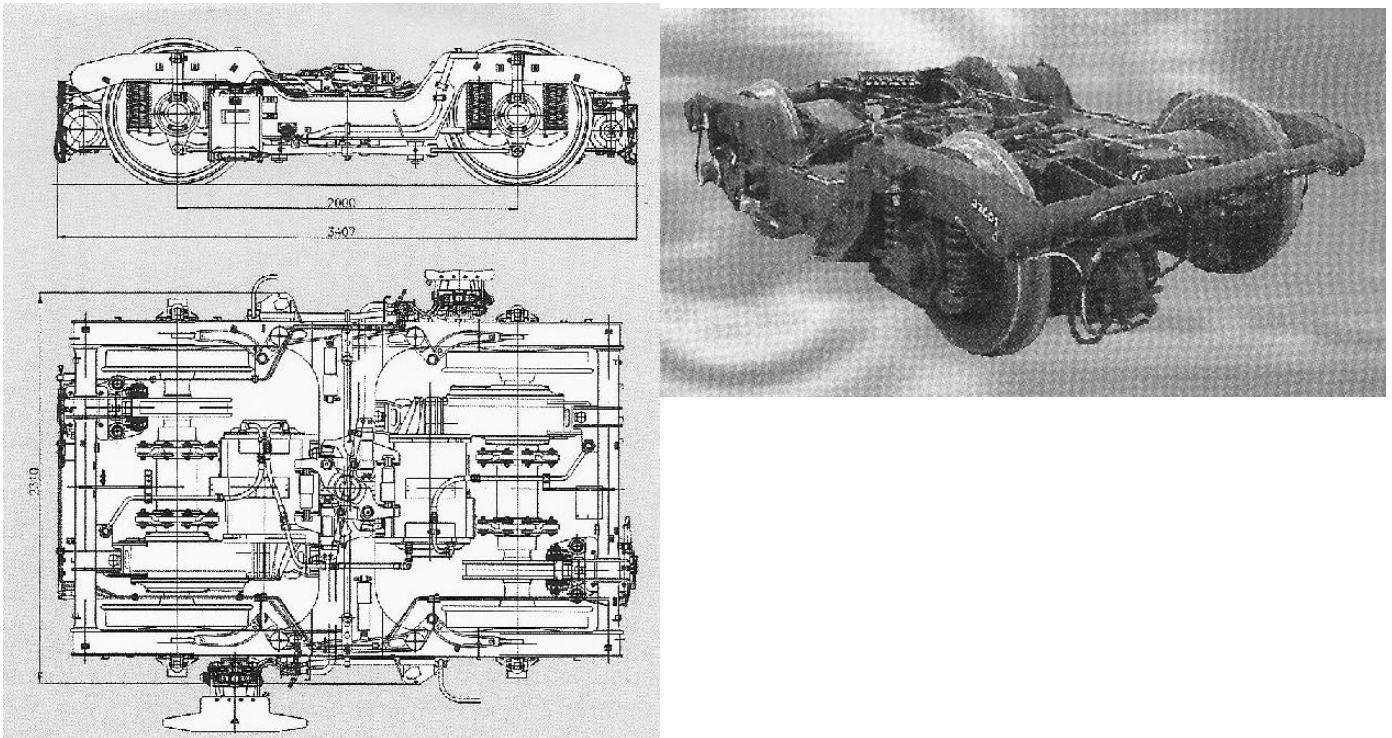
Obrázek 7 Podvozek lehkého metra SIEMENS SF 1000 [3]

2.4 Trakční a běžný podvozek pro lehké metro SIEMENS SF 1000 HS

Tyto podvozky byly vyráběny pro metro Vídeň. Jsou konstruovány na maximální rychlost 80 km/h. Pro vídeňské metro byl požadavek na nízké nápravové zatížení, které je na tomto podvozku 11,5 t na nápravu. Další požadavek byl možnost radiálního stavění dvojkolí v oblouku a tím snížení opotřebení koleje i kol. Tyto potřeby jsou splněny mechanismem, který funguje přes pákový systém, kde přední dvojkolí je vodící a zadní je přes pákový mechanismus nastaveno do radiální polohy.

Primární vypružení je pomocí dvojice šroubových pružin pro každé kolo. Pružiny jsou uloženy mezi skříní nápravového ložiska a rámem podvozku a mají jak funkci vypružení, tak i vedení. Paralelně s nimi je situován taky hydraulický tlumič. Rozvor podvozku je 20000 mm, což je opět výhodné pro průjezd obloukem malého poloměru. Podvozek je tedy šetrnější ke koleji, méně ji opotřebovává. Rám je uzavřený, tvořený dvěma podélníky, příčnickami a čelníky tvaru trubky. Sekundární vypružení je opět pomocí pneumatických pružin, které zajišťují konstantní výšku podlahy nad temenem kolejnice. Podélné síly jsou přenášeny ze skříně na podvozek přes otočný čep a nízko položeným mechanismem.

Pohon zajišťuje asynchronní trakční motor s vlastní ventilací o výkonu 160 kW pro každou nápravu. Na výstupu z motoru je upevněna převodovka ze které se přenáší kroutící moment na nápravu pomocí duté kloubové hřídele kolem nápravy. Na každém dvojkolí je pak také kotoučová brzda. U trakčních podvozků jedna, u běžných pak dvě na každé nápravě. Jednotka kotoučové brzdy je upevněna na čelníku. Sběrač proudu z třetí kolejnice je připevněn na každé straně na jedné skříní nápravového ložiska. [3]



Obrázek 8 Podvozek lehkého metra SF 1000 HS [3]

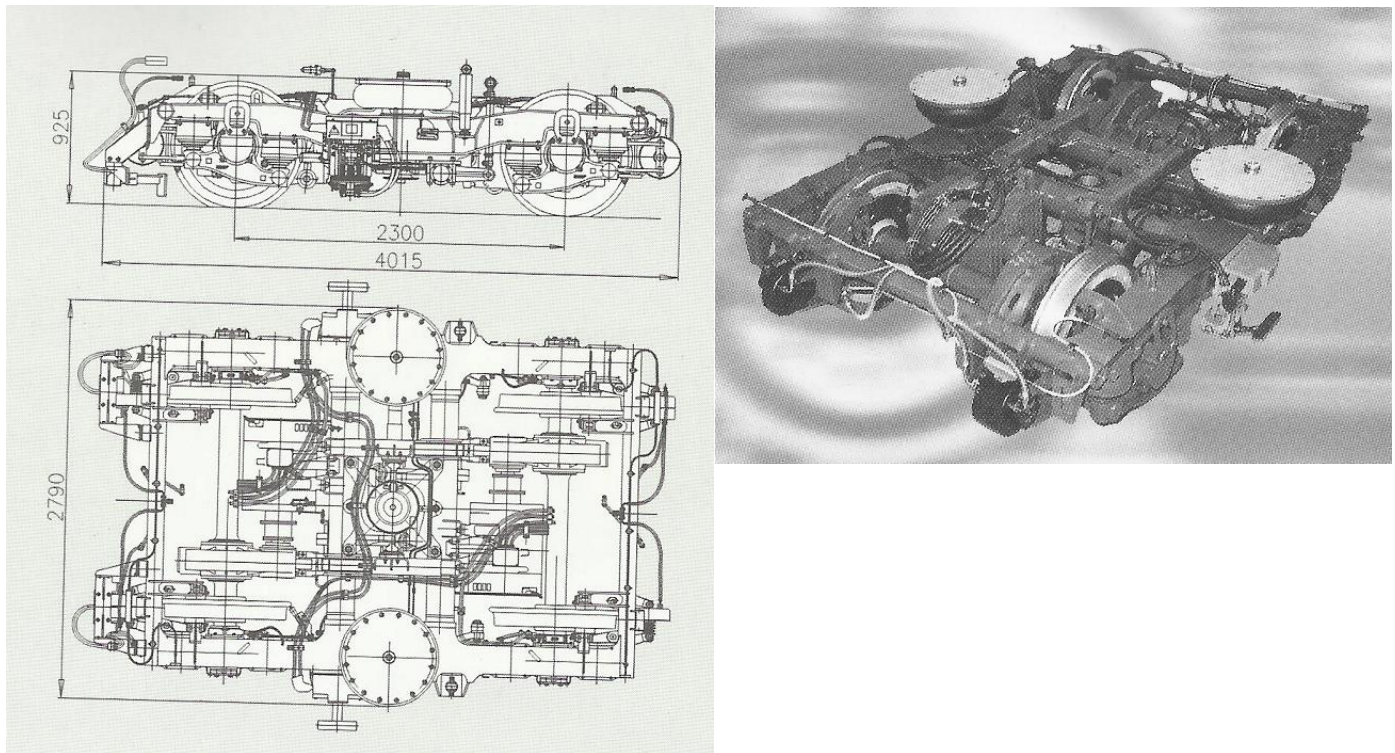
2.5 Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2000

Jedná se o podvozky, které jezdí v Bangkoku a Taipei. Tyto podvozky jsou určeny jak pro metro, tak pro městské rychlodráhy (S-Bahn). Jsou určeny pro maximální hmotnosti 65 t. Nejvyšší dovolené nápravové zatížení je 16,2 t a maximální rychlost 80 km/h. Rozvor dvojkolí je 2300 mm, zde je vidět nárůst délky podvozku oproti podvozkům pro lehké metro. Podvozky jsou jak trakční, tak běžné. U běžných jsou pouze vynechány komponenty pohonu. To má za výhodu snížení počtu rozdílných dílů ve výrobě tak i snížení počtu skladovaných náhradních dílů.

Primární vypružení a současně i vedení dvojkolí zajišťují dvojice kuželových vrstvených silentbloků na každém kole. Ty jsou umístěné klasicky mezi skříní nápravového ložiska a rámem podvozku. Na základě optimálního dimenzování těchto pružin odpadá nutnost použití paralelního hydraulického tlumiče. Výhodou takovýchto pružin je také jejich nízká konstrukce. Proto může být rám podvozku plochý.

Rám se skládá ze dvou podélníků, dvou příčníků a dvou čelníků. Je svařovaný. Sekundární vypružení je pomocí vzduchových pružin, čímž je umožněno udržet konstantní výšku podlahy nad temenem kolejnice a to bez ohledu na velikost zatížení vozu.

Pohon je zajištěn dvojicí trakčních motorů upevněných celou svojí vahou na rámu podvozku a tedy kompletně odpružených. Motory jsou na podvozku dva, každý pro jedno dvojkolí a mají výkon 230 kW. K převodovce jsou připojeny přes zubovou spojku, která umožňuje vzájemný svislý pohyb motoru vůči převodovce. Převodovka je jednostupňová, zavěšená na svislé závěsce. Zubovou spojku je možné rozdělit a tím oddělit trakční motor od převodovky a tak následně motor, nebo dvojkolí samostatně vyvázat, což je vhodné při možných opravách. Brzdy jsou zde kotoučové, kotouče jsou namontovány v kolech a brzdová jednotka každého kola je zavěšena na čelníku. Hmotnost těchto podvozků je 7700 kg pro trakční a 5500 kg pro běžný. [3]



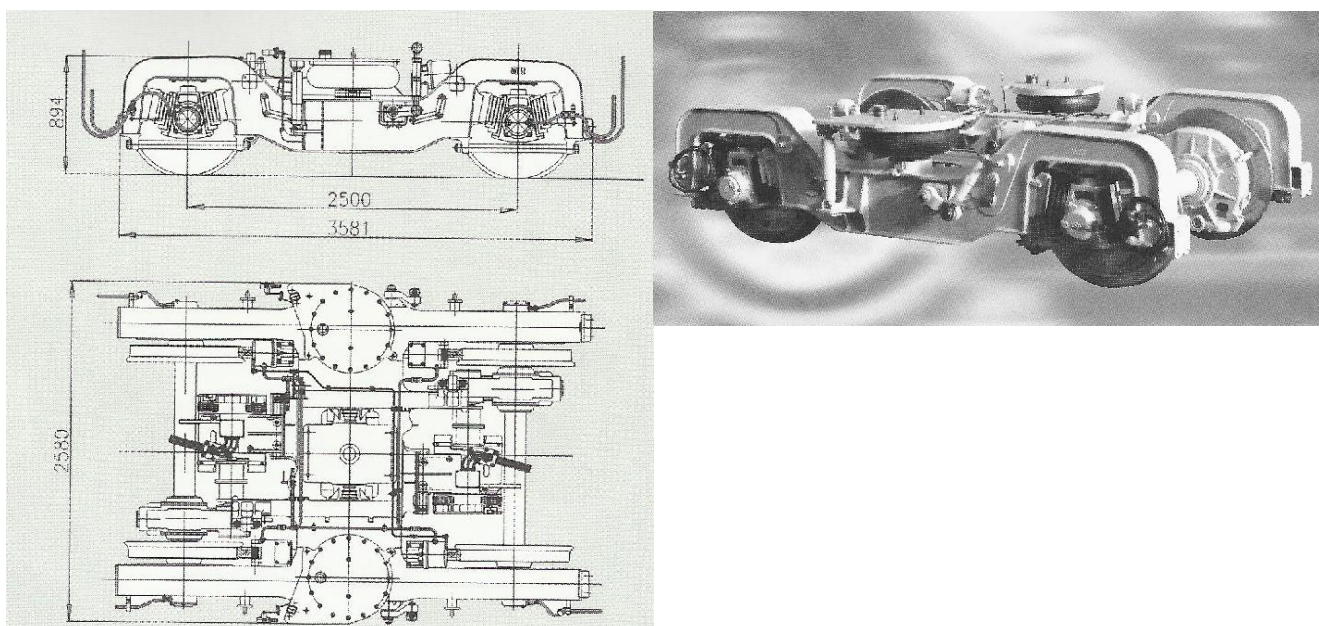
Obrázek 9 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2000 [3]

2.6 Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2100

Metro s těmito podvozky jezdí ve městech Shanghai, Singapore, Hongkong a Guangzhou. Maximální dovolená rychlost je 80 km/h a maximální hmotnost vozu 64 t. Těchto podvozků je v provozu více než 4 tisíce kusů. Jedná se opět o modulární koncepci se stejnými výhodami, jaké byly popsány u předchozích podvozků. Rozvor podvozku je 2500 mm. Hmotnost trakčního podvozku je 7500 kg, běžného potom 5200 kg. Maximální nápravové zatížení činí 16 t. Průměr nového dvojkolí je 850 mm, opotřebeného 775 mm.

Primární vypružení je a zároveň i vedení dvojkolí je řešeno pomocí pryžokovových pružin Megi, které jsou šípovitého tvaru. Tyto pružiny mají vlastní tlumení, odpadá tedy nutnost použití paralelního hydraulického tlumiče, navíc mají podélnou i příčnou elasticitu. Rám podvozku je otevřený tvaru H s jedním hlavním příčným a dvěma podélnými. Konstrukce rámu je svařovaná, podélníky jsou složitějšího tvaru kvůli primárnímu vypružení Megi, navíc jsou uprostřed prohnuté kvůli sekundárnímu vypružení. To je řešeno pomocí dvojice pneumatických měchů. Tyto plynové pružiny jsou ještě doplněny svislými hydraulickými tlumiči a torzním stabilizátorem. Přenos podélných sil ze skříně na podvozek je přes otočný čep, který je vyveden co nejnižší k temeni kolejnice. Tímto uspořádáním je pak zajištěno jen nepatrné odlehčení dvojkolí.

Pohon je řešen pomocí dvojice trakčních motorů o výkonu 140 nebo 190 kW. Motor je celou svojí vahou připevněn k rámu podvozku a je tedy plně odpružený. Přes zubovou spojku potom přenáší krouticí moment na jednostupňovou převodovku, která je zavěšena na svislé závěse. Brzdy zde nejsou kotoučové, jak je obvyklé, ale jednostranné špalíkové na každém kole. Sběrač proudu z třetí kolejnice se zde vůbec nevyskytuje, protože metro v těchto městech má přívod proudu shora přes trolej, stejně, jako je tomu u tramvají. [3]



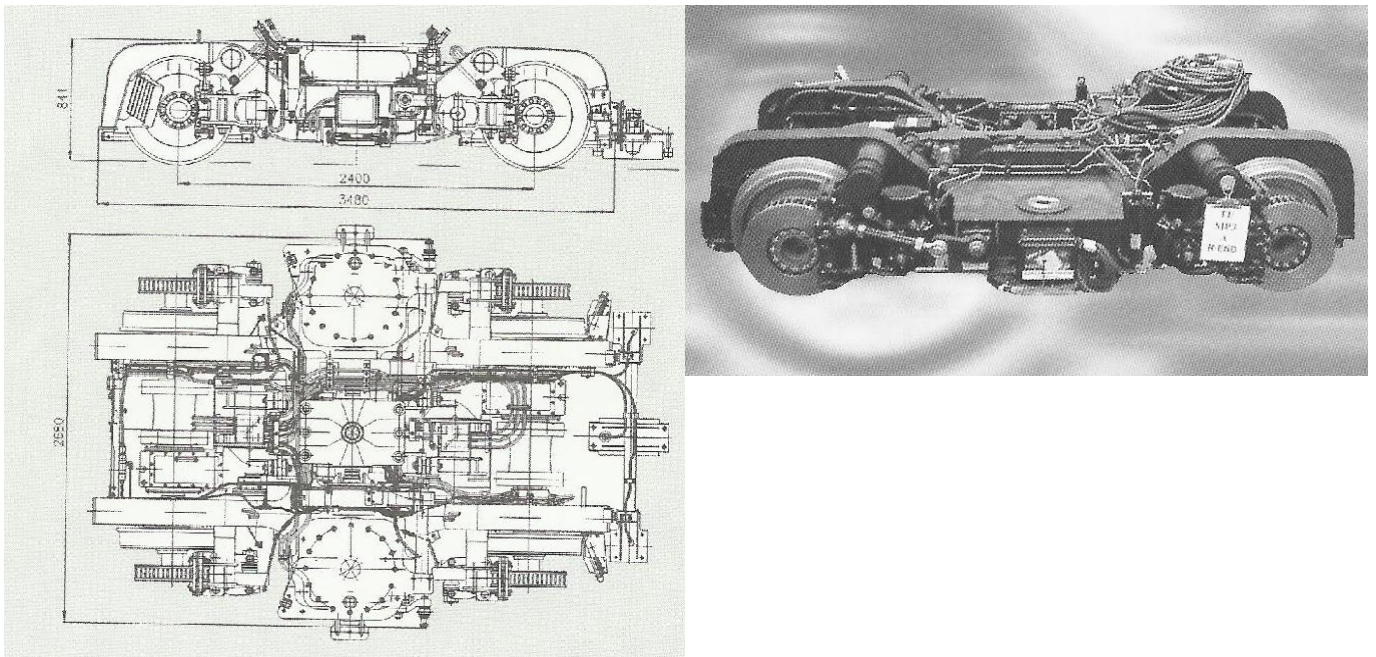
Obrázek 10 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2100 [3]

2.7 Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 2100 IB

Jedná se o podvozky vyráběné pro metro v Puerto Ricu. Řešení podvozku je dosti neobvyklé. Rozvor je 2400 mm, průměr nového dvojkolí 740 mm, ojetého 635 mm. Hmotnost trakčních podvozků 6800 kg, běžných 4800 kg. Maximální dovolené zatížení na nápravu je 14 t a maximální rychlost 80 km/h.

Koncepce tohoto podvozku je dosti neobvyklá. Je zde použito dvojkolí s vnitřními ložisky a tím i celý rám je vnitřní. Primární vypružení a zároveň i vedení dvojkolí je pryžokovovými pružinami Megi. Ty mají vlastní tlumení a příčnou i podélnou elasticitu. Rám podvozku je otevřený, tvaru H, s tvarově komplikovanými podélníky, jedním hlavním příčným a balkony pro sekundární vypružení. To je pneumatické, čímž je zajištěna konstantní výška podlahy nad temenem kolejnice. Paralelně k plynovým pružinám je zde ještě svislý hydraulický tlumič a torzní stabilizátor. Přenos podélných a příčných sil mezi skříní vozidla a rámem podvozku je přes otočný čep, který je vyveden co nejbližší k temeni kolejnice, čímž je dosaženo malého odlehčení dvojkolí.

Pohon je pomocí dvojice trakčních motorů o výkonu 150 kW, které jsou připevněny na rámu podvozku. Dále je přenos krouticího momentu přes převodovku na dutou kloubovou hřídel kolem nápravy. [3]



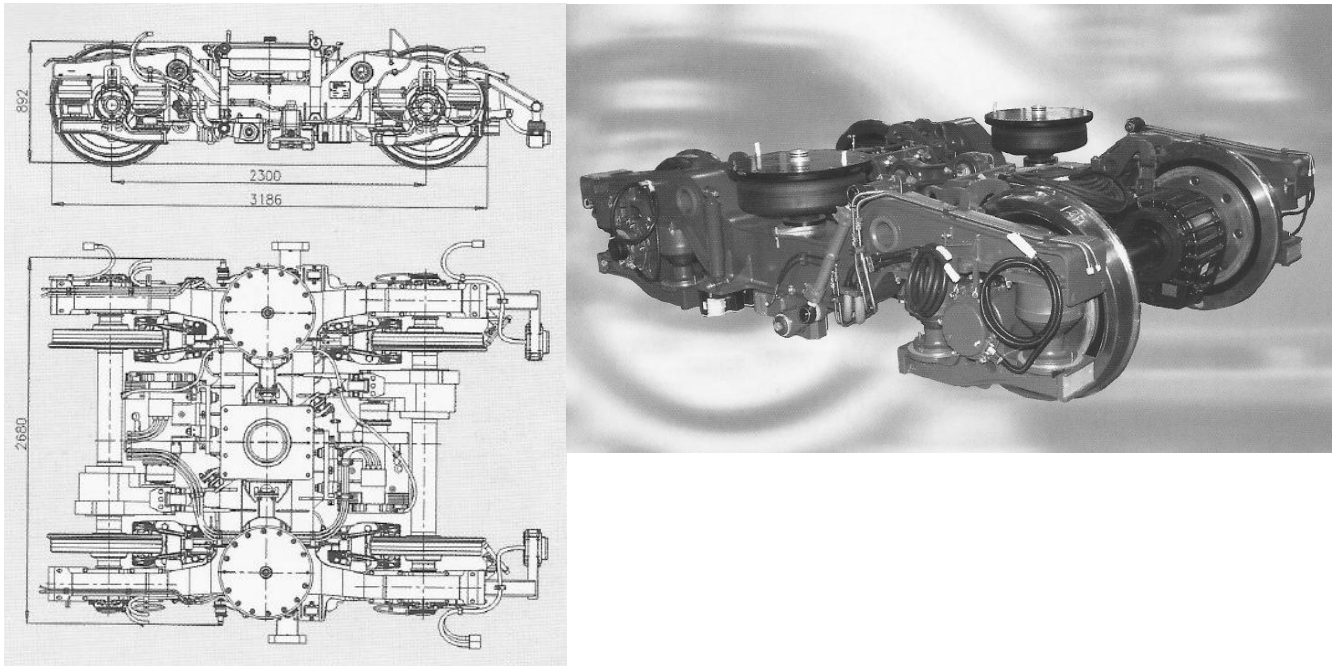
Obrázek 11 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 2100 IB [3]

2.8 Trakční a běžný podvozek pro těžké metro SIEMENS SF 3000

Podvozky SF 3000 byly vyrobeny pro Tchaj-wanské město Kaohsiung, kde jsou provozovány na dvou zdejších linkách. Jsou vyráběny opět ve dvou variantách a to jak podvozky běžné, tak trakční. Jde o podvozek, který splňuje požadavky na moderní těžké metro s maximální rychlostí 80 km/h a nápravovým zatížením 17 tun na nápravu. Rozvor podvozku je 2300 mm, díky čemuž dochází k menšímu opotřebením kolejí zejména při jízdě v oblouku. Trakční i běžný podvozek jsou shodné, liší se pouze montáží pohonu a s ním souvisejících prvků na trakčním podvozku. Díky tomu jsou sníženy nároky a náklady na skladování a výrobu náhradních dílů.

Primární vypružení je z vrstvených pryžokovových kuželových pružin montovaných po dvojici mezi každý ložiskový domek a rám podvozku. Zároveň mají i funkci vedení dvojkolí. Sekundární vypružení je pomocí vzduchových pružin, které jednak pruží, a jednak udržují výšku podlahy v konstantní výšce.

Průměr nového dvojkolí je 850 mm, motor má výkon 190 nebo 230 kW. Hmotnost trakčního podvozku je 8,1 tuny, běžného pak 6,1 tuny. [3]



Obrázek 12 Podvozek těžkého metra SIEMENS SF 3000 [3]

2.9 Vývoj trakčního podvozku pro metro typu Syntegra – SIEMENS

Toto je zcela specifický inovativní podvozek od firmy Siemens. Byl vyvíjen s ohledem na co nejmenší hmotnost a dobré jízdní vlastnosti. Rozvor je pouhých 1600 mm, což znamená menší úhel náběhu a s tím spojené menší opotřebení kol. Průměr nového dvojkolí je 690 mm, maximální nápravové zatížení 14 t a maximální rychlost 90 km/h.

Rám podvozku je vnitřní, otevřený. Dva podélníky jsou spojeny s hlavním příčným pomocí kloubů na spodní straně podélníku. Primární vypružení je tvořeno pomocí šroubových pružin s paralelním tlumičem, vedení je pomocí trojúhelníkové ojnice která je upevněna na příčniku, podélníky jsou tak zatěžovány jen svislými silami od primárního vypružení. Proto jsou podélníky lehké konstrukce. Sekundární vypružení je pneumatické, čímž lze dosáhnout konstantní výšky podlahy bez ohledu na zatížení vozu metra. Paralelně se sekundárním vypružením je ještě nouzové vypružení tvořené pryžokovovými silentbloky.

Pohon je pomocí synchronního motoru s permanentními magnety umístěný přímo na nápravě s vodním chlazením. Jedná se tedy o bezpřevodový přímý pohon. Motor může být využíván také jako elektrodynamická brzda. Náprava dvojkolí je integrovaná s hřídelí trakčního motoru. Kola jsou monobloková a každé má svoji jednostrannou špalíkovou brzdu. Vnitřní ložiska dvojkolí jsou zároveň štítovými ložisky trakčního motoru. Přenos podélných sil je zajištěn dvěma páry ojnic umístěných mezi oběma motory a příčným a dále pomocí dvojice ojnic od předního motoru ke konzole na spodku vozové skříně. Díky nízkému uložení tohoto přenosu nad temenem kolejnice dochází jen k malým změnám nápravového zatížení jednotlivých náprav. [3]



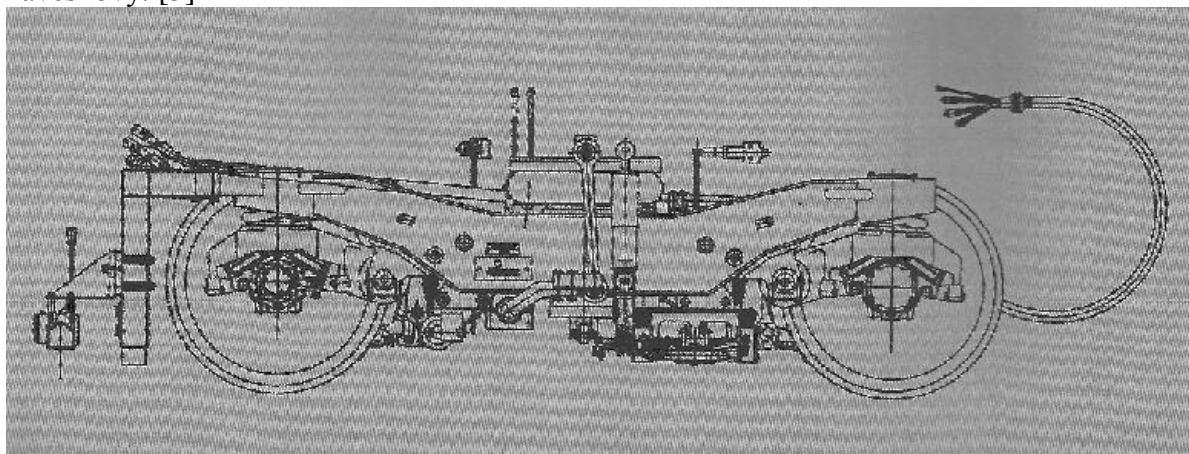
Obrázek 13 Vývoj podvozku pro metro typ Syntegra – SIEMENS [3]

2.10 Trakční a běžný podvozek pro metro C 20 – BOMBARDIER

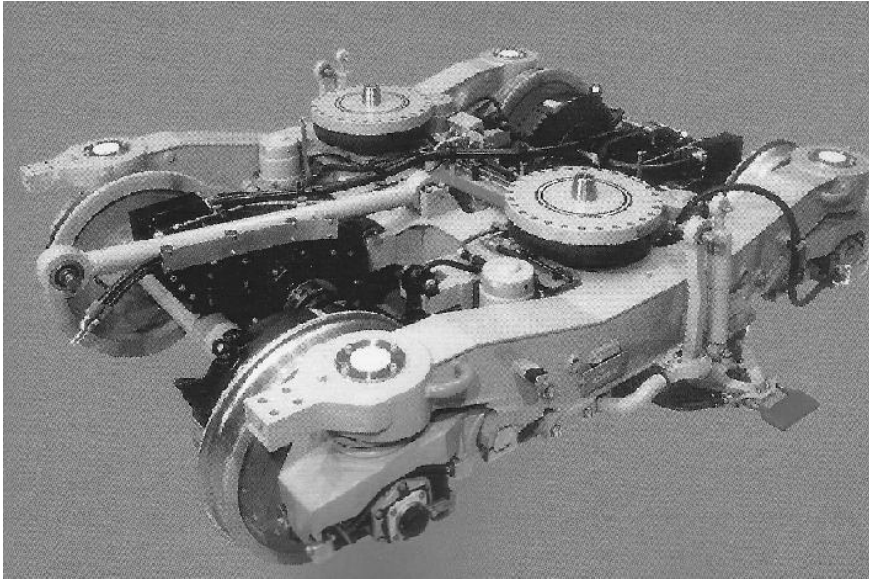
Tento podvozek od firmy Bombardier, dříve ADtrans, byl primárně vyvíjen pro metro ve švédském Stockholmu. Splňuje velmi přísné výkonnostní požadavky. Podvozek je jiné koncepce než předchozí od firmy Siemens. Mezi jeho přednosti patří dobré jízdní vlastnosti, nízké emise hluku, malé vibrace, nízké opotřebení kol a kolejnic a malé náklady na údržbu. Rozvor podvozku je 2300 mm, průměr nového dvojkolí 780 mm. Nejvyšší povolené zatížení na nápravu je 14 t a maximální rychlost 90 km/h.

Na kolech jsou umístěny rezonanční tlumiče hluku. Primární vypružení je pomocí šroubových pružin v kombinaci s pryžovými silentbloky, vedení je pak kývačkové. Díky tomu, že je primární vypružení měkké, je umožněno radiální stavění dvojkolí v oblouku. Rám podvozku je otevřený tvaru H, s dvěma mírně prohnutými podélníky a hlavním příčnickem. Rám je torzně poddajný. Sekundární vypružení je pneumatickými měchy doplněné paralelním hydraulickými tlumiči. Přenos podélných sil mezi skříní vozidla a rámem je pomocí tažné tlačné tyče.

Pohon zajišťuje dvojice trakčních motorů, které jsou přes zubovou spojku spojeny s jednostupňovou převodovkou. Ta je zavěšena na svislé závěsce, jedná se tedy o pohon závěskový. [3]



Obrázek 14 Podvozek pro metro typ C20 - BOMBARDIER, boční pohled [3]



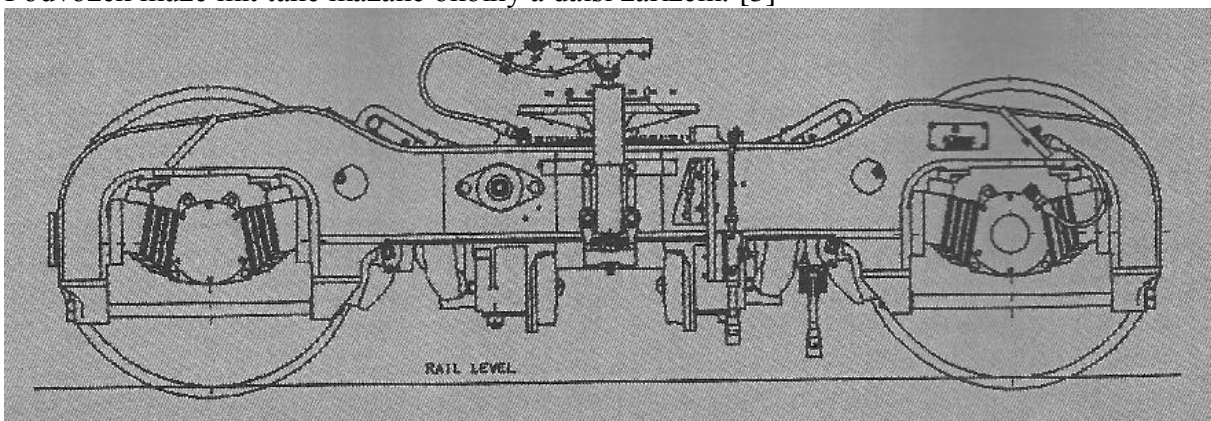
Obrázek 15 Podvozek pro metro C20 – BOMBARDIER [3]

2.11 Podvozek Flexible Frame Bogie – BOMBARDIER

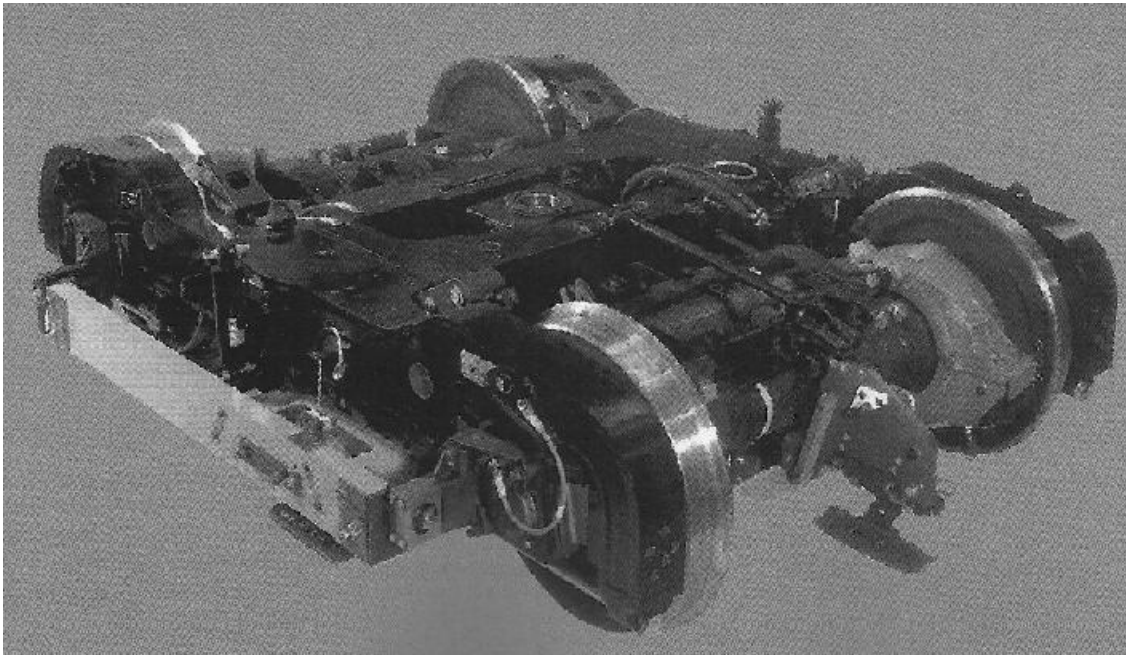
Tyto podvozky jsou provozovány v metru Londýn. Název dostal podvozek podle svého pružného rámu, který je složen z dvou půlramů spojených pružnými pouzdry. Rozvor dvojkolí je 2050 mm, průměr nového dvojkolí je 770 mm, maximální nápravové zatížení je 16 t a maximální rychlost 100 km/h.

Primární vypružení a zároveň vedení dvojkolí je pomocí šípových pryžokovových pružin Megi. Podélníky jsou tomuto vypružení přizpůsobené, uprostřed pak prohnuté kvůli sekundárnímu vypružení. Pod ložiskovou skříní jsou podélníky spojené sponou. Sekundární vypružení je pneumatické s paralelními hydraulickými tlumiči a torzním stabilizátorem s pryžovým torzním silentblokem. Přenos tažných sil mezi skříní a rámem podvozku je pomocí otočného čepu.

Pohon dvojkolí je trakčním motorem umístěným na rámu podvozku, tedy plně vypruženým, nebo může být tlapový, jak je vidět na obrázku níže. Brzdy jsou konvenční špalíkové na každém kole. Sběrač proudu je umístěn uprostřed na tlapové trubce, to je specialita Londýnského metra. Zde je totiž třetí napájecí kolejnice umístěna uprostřed koleje a ne vně, jak je tomu běžně v jiných městech. Pokud by bylo třeba umístit sběrač proudu vně podvozku tak se upevňuje na trámec spojující ložiskové skříně po jedné straně podvozku. Podvozek může mít také mazané okolky a další zařízení. [3]



Obrázek 16 Podvozek Flexible Frame Bogie - BOMBARDIER, boční pohled [3]



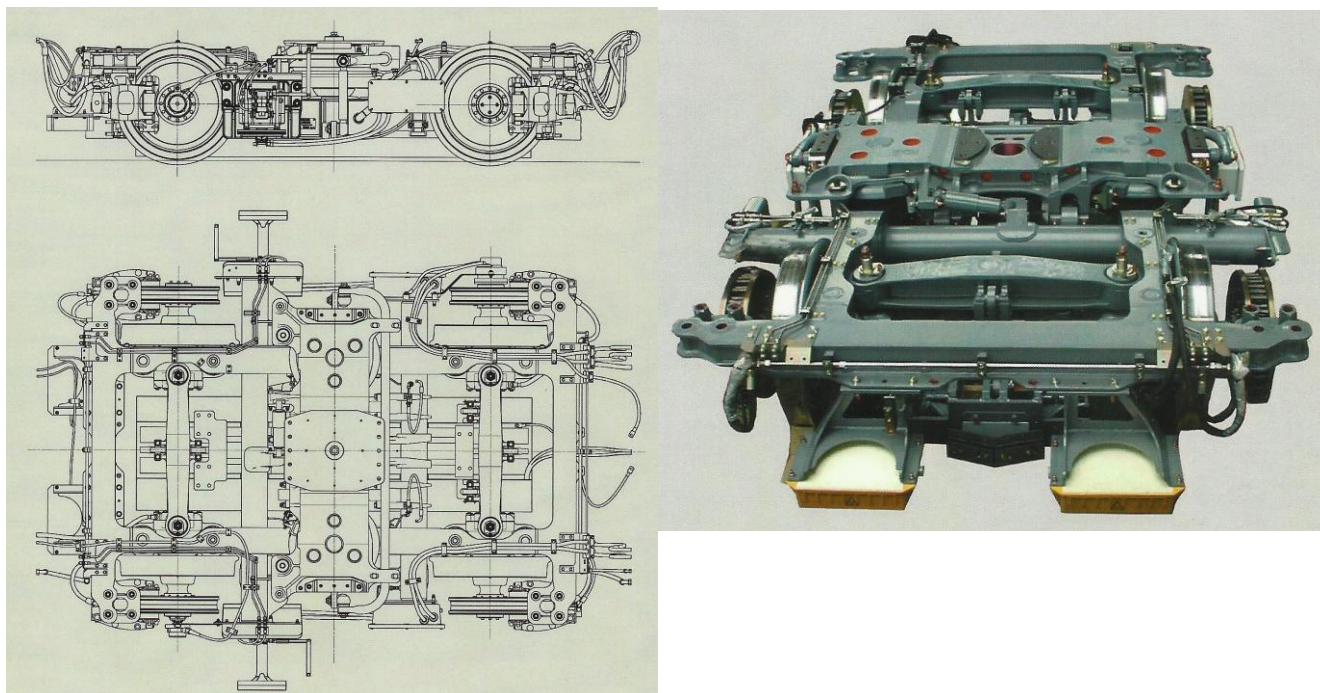
Obrázek 17 Podvozek Flexible Frame Bogie – BOMBARDIER [3]

2.12 Podvozek BM3000LIM - BOMBARDIER

Tento podvozek byl vytvořen pro systémy metra vyžadující technologii lineárního indukčního motoru. Tato technologie umožňuje větší volnost v plánování a stavbě nových tras metra s vyšším stoupáním než je běžné u klasických technologií pohonu. První využití je v Guangzhou v Číně. Podvozek má krátký rozvor 2000 mm a dobře optimalizované pryžové primární vypružení, díky kterému je snížený přenos hluku a vibrací.

První vozy vyjely v Guangzhou na trať v roce 2005 a dnes je zde provozováno 600 podvozků tohoto druhu.

Podvozek má vnitřní svařovaný rám, tedy i vnitřní ložiska. Tím je umožněna montáž čtyř kotoučových brzd z vnější strany každého kola. To je vyžadováno kvůli vysokému dovolenému zatížení na nápravu. Sekundární vypružení je pneumatické v kombinaci s pryžovým vypružením. [3]



Obrázek 18 Podvozek BM3000LIM – BOMBARDIER [3]

3 Navržený trakční podvozek metra

Hlavním úkolem této práce je studie trakčního podvozku pro metro. Zadan je výkon trakčního motoru 170 kW, požadavek na hledání cesty ke snížení hmotnosti podvozku a dobré jízdní vlastnosti. Posledním požadavkem je návrh nestandardního způsobu primárního vypružení. Jako první jsem musel zvolit referenční vozidlo, pro které je podvozek konstruován a to hlavně z důvodu znalosti hmotností a dalších parametrů pro výpočet nápravy, tuhosti vypružení a také zjištění zatížení pro MKP výpočet zvoleného dílu.

3.1 Referenční vozidlo – pětivozová jednotka metra M1

Toto vozidlo jezdí v tunelech pražského metra. Vozidlo je konstruováno jako sestava dvou čelních a tří vložených vozů. Čelní vozy mají kabiny strojvedoucího, které umožňují rovnocenné ovládání vlaku z obou těchto stanovišť. Pro posun v depu je možno využít poloautomatických čelních spřáhel, která jsou spřahovatelná se stávajícími spřáhly provozovaných vlaků metra. Sběrače proudu jsou umístěny na všech podvozcích po obou stranách, napájení je ze třetí kolejnice.

Skříň všech vozů je svařená z velkoplošných protlačovaných hliníkových profilů. Celá skříň je izolována účinnou tepelnou a hlukovou izolací. Podlaha je sestavena z desek nehořlavé vodovzdorné překližky, které jsou potaženy protismykovou krytinou. Provedení podlahy je vodotěsné. Exteriér skříně je provedený v kombinaci dvou odstínů šedé metalízy, černého a červeného pruhu. Obklady stěn jsou provedeny z nehořlavých materiálů ve dvou barevných kombinacích, strop je proveden jako rošt z hliníkových voštin. V prostoru pro cestující jsou příčně uspořádaná sedadla s lehkým čalouněním. Sedadla jsou zakotvena v bočnici, což umožňuje snadné mytí podlahy.

Čtvery posuvné dveře po obou stranách mají světlost 1300 mm. Nástupní prostor za dveřmi je široce spojený se střední uličkou mezi sedadly, aby byl možný rychlý výstup a nástup cestujícím. Výměna vzduchu v prostoru pro cestující je zajištěna nuceným oběhem pomocí ventilátorů. Vzduch je rozváděn od ventilátorů kanály umístěnými ve spodní části vozu.

Podvozek rámu ve tvaru H je navržen jako torzně měkký, což zajišťuje dobrou přizpůsobivost trati a vysokou bezpečnost proti vykolejení. [3]

Hlavní technické parametry:

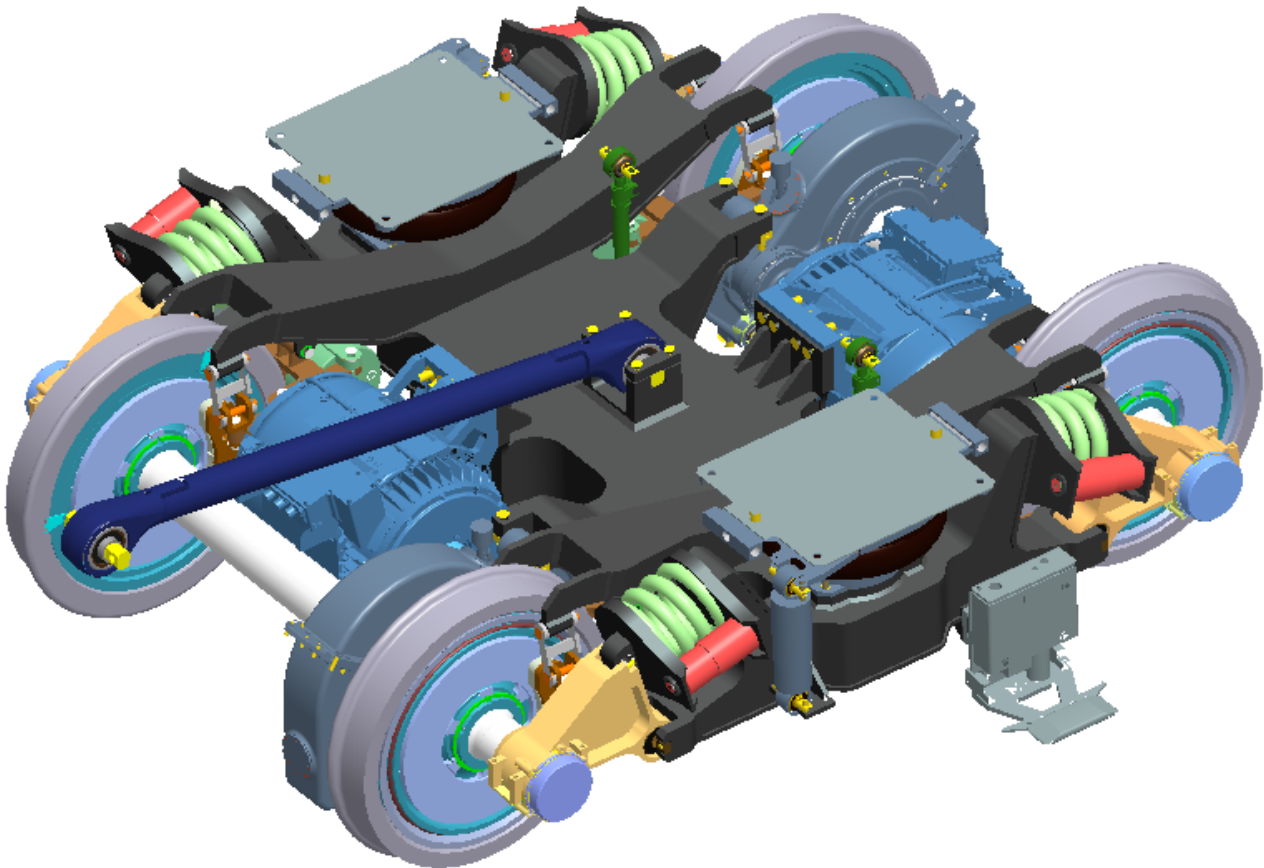
Délka celé soustavy	96 560 mm
Šířka skříně vozu	2 712 mm
Výška vozu	3 600 mm
Rozchod kolejí	1 435 mm
Nejvyšší provozní rychlost	80 km/h
Výkon	2 630 kW
Zrychlení	1,3 m/s ²
Hmotnost cele soustavy	133 t
Počet sedících cestujících	224 osob
Počet stojících cestujících	1240 osob



Obrázek 19 Referenční vozidlo - pětivozová jednotka metra M1 [8]

3.2 Sestava nevrženého podvozku

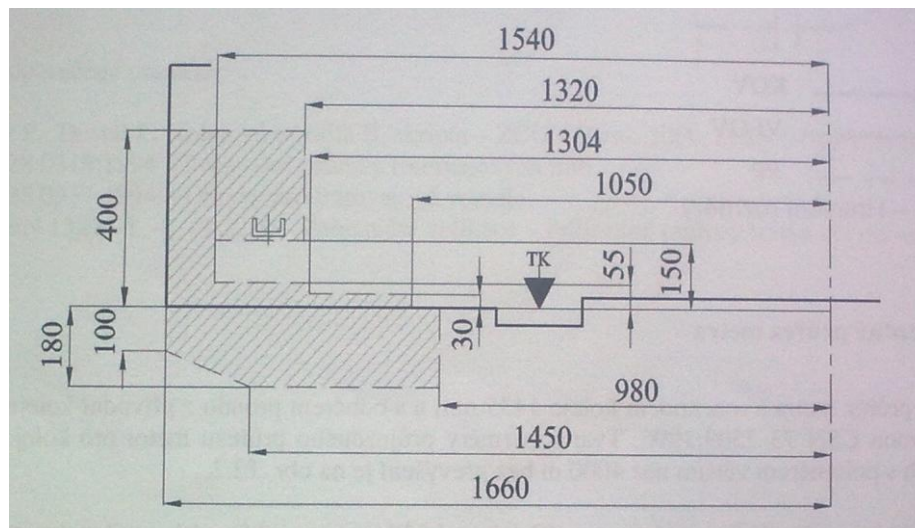
Dle požadavků zadání bylo prvotním tématem pro řešení návrh nestandardního způsobu primárního vypružení. Při řešení tohoto problému jsem se snažil přihlédnout také k požadavku na nízkou hmotnost rámu podvozku, a proto jsem se po konzultaci s vedoucím diplomové práce a po zamítnutí prvotních návrhů a variant primárního vypružení rozhodl pro řešení pomocí úhlové páky. Toto řešení na podvozcích metra není běžně používané.



Obrázek 20 Pohled na celkovou sestavu navrženého podvozku pro metro

Díky této variantě jsem mohl použít rám bez příčníků a se zkrácenými podélníky, čímž došlo ke snížení hmotnosti rámu.

Podvozek má rozvor 2200 mm, rozchod kol 1435 mm a průměr nového dvojkolí 850 mm. Splňuje požadavky na průjezdný průřez metra s rozchodem koleje 1435 mm a s odběrem proudu z přívodní kolejnice, který je stanoven normou ČSN 73 7509:1996. V této normě jsou také zvlášť definovány oboustranné prostory vymezené pro přívodní kolejnice s jejich držáky a kryty zabezpečovacího zařízení (šrafovaná část na obrázku 21).



Obrázek 21 Prostor vymezený pro přívodní kolejnice a jejich držáky a kryty zabezpečovacího zařízení [3]

Kola o průměru 850 mm jsou od společnosti Bonatrans a jsou s brzdovými kotouči. Ložiskové domky jsou vně nápravy. Ložiska jsou kuželíkové ložiskové jednotky od firmy SKF.

Primární vypružení a zároveň vedení dvojkolí je, jak již bylo řečeno, pomocí úhlové páky a šroubovitě ocelové pružiny s paralelně uloženým tlumičem. Pružiny jsou uloženy téměř vodorovně. Na sekundární vypružení je u vozidel metra kladen požadavek udržení konstantní výšky podlahy bez ohledu na velikost zatížení vozu. To je zejména kvůli tomu, aby byla podlaha ve výšce nástupiště. Tomuto požadavku nejlépe vyhovuje pneumatické vypružení, které je využíváno prakticky u všech podvozků metra a ani můj návrh se v tomto ohledu neliší. Sekundární vypružení je doplněno o svislý tlumič kmitů a dále je zde pro zvýšení stability (zejména pro zamezení kolébání vozidla) torzní stabilizátor, upevněný na spodní části hlavního příčnicku a na svých dvou koncích připevněn ke skříni vozu.

Pohon je závěskový, motor MLU 3839 K/4 o výkonu 170 kW, který vyrábí firma Škoda Electric a.s. Převodovka je dvoustupňová, mezi převodovkou a motorem je zubová spojka. Brzdy jsou kotoučové, umístěné v každém kole dvojkolí. Brzdové jednotky jsou zavěšené na konzolách uložených na vrchu hlavního příčnicku.

Rám podvozku je otevřený, tvaru H, se zkrácenými podélníky a jedním hlavním příčnickem. Podélníky jsou na koncích rozvidlené a uzpůsobené pro potřeby primárního vypružení. Na hlavním příčnicku jsou konzoly pro zavěšení pohonu, sekundárního vypružení, sběrače a přenosu sil mezi skříni vozidla a podvozkem. Přenos sil mezi skříni a podvozkem je řešen pomocí tažně-tlačné tyče.

V další části budou detailněji popsány jednotlivé části podvozku. U vybraných dílů, jako je náprava, primární vypružení a ložisková jednotka jsou provedeny kontrolní výpočty. U dílu úhlové páky je pak proveden pevnostní výpočet pomocí metody konečných prvků.

3.3 Dvojkolí

Dvojkolí je jedním z nejdůležitějších konstrukčních a funkčních celků kolejového vozidla. Je extrémně namáhané, závisí na něm bezpečnost cestujících, jeho výroba i údržba v provozu je věnována systematická pozornost. Má za funkce nesení vozidla a vedení v koleji, přenos síly mezi kolem a kolejnicí ve všech směrech, přenos tečné hnací síly mezi kolejnicí ve všech směrech, přenos tečné brzdové síly mezi kolem a kolejnicí. Používají se dva typy dvojkolí, s vnějšími nebo s vnitřními čepy. V mém návrhu podvozku se jedná o dvojkolí s vnějšími čepy. [1]

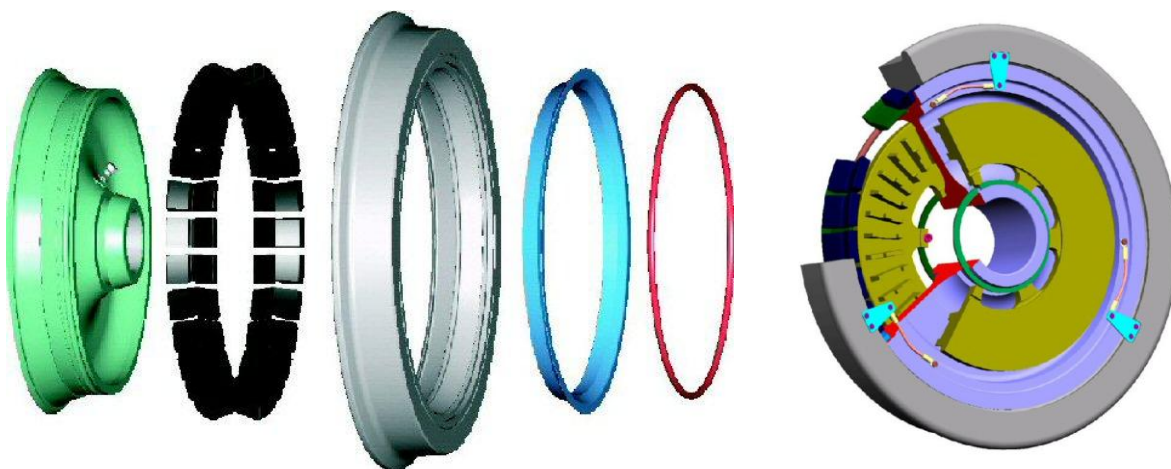
3.3.1 Kolo

Zvolená kola jsou vyráběna firmou Bonatrans, která sídlí v Bohumíně. Jedná se o odpružená kola s osazením brzdovými kotouči.

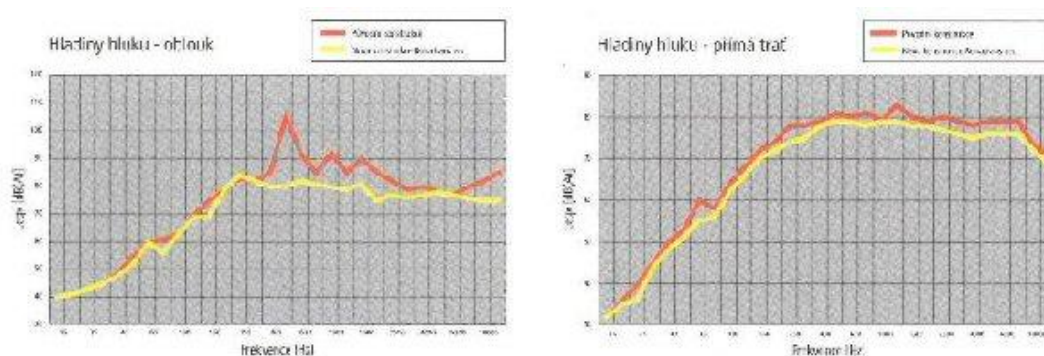
Tato pryží osazená kola výrazným způsobem snižují hluk železničních kol při průjezdu zatáčkami i při přímé jízdě. Výrazně tím přispívají ke zlepšení prostředí kolem trati a také ke snížení opotřebení kolových obručí i kolejnic a tedy ke snížení provozních nákladů.

Gumové segmenty jsou ze speciální pryže mezi kotoučem a obručí kola a tím významně snižují vibrace kola. Společnost Bonatrans na rozdíl od většiny jejích konkurentů nepoužívá ke spojení obruče s kotoučem šroubů a proto mají tyto kola nižší hmotnost, jsou kompaktnější a umožňují montáž různých potřebných zařízení na desce kola (brzdové kotouče, unášecí čepy atd.).

Průměr nového kola je 850 mm, což je běžně používaný rozměr u vozidel metra. Nejvíce opotřeбенé kolo má pak průměr 780 mm. [9]



Obrázek 22 Vlevo rozstřel sestavy kola, vpravo řez sestavou kola od firmy Bonatrans [9]



Obrázek 23 Naměřená hladina hluku, vlevo průjezd obloukem, vpravo jízda po přímé trati [9]

3.3.2 Náprava

Hnací náprava je jednou z nejvíce zatěžovaných částí podvozku díky cyklickému namáhání. Je několikanásobně odstupňovaná a není symetrická podle středové roviny, což je způsobeno sedlem pro uložení převodovky.

Vnější sedlo o průměru 110 milimetrů slouží pro nalisování nápravového ložiska. Dále je pak sedlo pro nalisování kola o průměru 160 milimetrů a vyosenné sedlo pro uložení a nalisování ozubeného kola převodovky o průměru 170 milimetrů

Na čele nápravy je středící důlek a tři otvory se závitem M20 pro připevnění opěrného kroužku ložiskové jednotky.



Obrázek 24 Náprava

Výpočet nápravy dle normy ČSN EN 13104 – Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky – Poháněné nápravy – Motedy konstrukce

Zadané hodnoty:

Jmenovitá hmotnost vozu	m_v	26	t
Hmotnost dvojkolí	m_{dv}	1121	kg
Hmotnost převodovky	$m_{př}$	340	kg
Hmotnost ložiskového domku	m_{ld}	100	kg
Hmotnost jednoho cestujícího	m_{jc}	80	kg
Hmotnost podvozku	m_p	6200	kg
Počet sedících cestujících		48	
Počet stojících cestujících		248	
Průměr kola	d	850	mm
Výška těžiště nad osou nápravy	h	900	mm
Vzdálenost styčných kružnic	$2s$	1500	mm
Vzdálenost středu ložisek	$2b$	2088	mm
Materiál	ocel	EA4T	
Náprava		plná, hnací	
Kotoučová brzda		v každém kole	
Počet náprav		4	

Síly určené s hmotnostmi v pohybu:

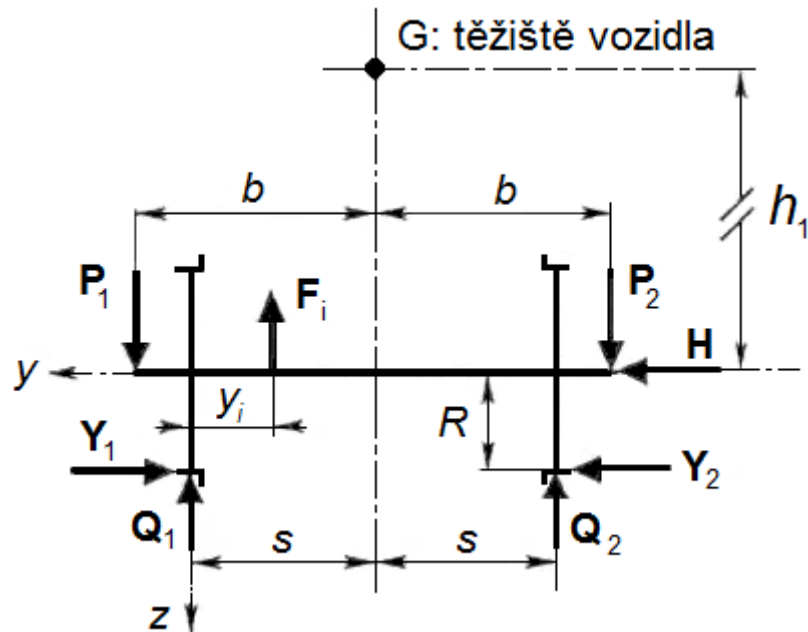
- Hmotnost cestujících:

$$m_{cestující} = (48 + 248) * 80 = 23\,680\,kg$$

- Referenční hmotnost m_1 :

$$m_2 = m_{dv} + \frac{2}{3}m_p + \frac{1}{2}m_{ld} = 1121 + \frac{2}{3} * 340 + \frac{1}{2} * 100 = 1\,398\,kg$$

$$m_1 = \frac{m_v}{i} + 1,2 * \frac{m_c}{i} - m_2 = \frac{26000}{4} + 1,2 * \frac{23680}{4} - 1398 = 12\,206\,kg$$



Obrázek 25 Schéma zatížení nápravy

$$P_1 = \left(0,625 + 0,0875 \cdot \frac{h_1}{b}\right) m_1 \cdot g = \left(0,625 + 0,0875 \cdot \frac{0,9}{1,044}\right) \cdot 12206 \cdot 9,81$$

$$= 83\,870\text{ N}$$

$$P_2 = \left(0,625 - 0,0875 \cdot \frac{h_1}{b}\right) m_1 \cdot g = \left(0,625 - 0,0875 \cdot \frac{0,9}{1,044}\right) \cdot 12206 \cdot 9,81$$

$$= 65\,806\text{ N}$$

$$Y_1 = 0,35 \cdot m_1 \cdot g = 0,35 \cdot 12206 \cdot 9,81 = 41\,909\text{ N}$$

$$Y_2 = 0,175 \cdot m_1 \cdot g = 0,175 \cdot 12206 \cdot 9,81 = 20\,954,5\text{ N}$$

$$H = Y_1 - Y_2 = 20\,954,5\text{ N}$$

Svislé zatížení nápravy částmi s ní spojenými:

F_1 ... tíha převodovky připadající na nápravu

y_1 ... vzdálenost převodovky od místa styku kola s kolejnicí

$$F_1 = m_i \cdot g = \frac{2}{3} \cdot m_p \cdot g = \frac{2}{3} \cdot 340 \cdot 9,81 = 2\,224\text{ N}$$

$$y_1 = 298\text{ mm}$$

Vertikální reakce:

$$Q_1 = \frac{1}{2s} \cdot [P_1 \cdot (b + s) - P_2 \cdot (b - s) + (Y_1 - Y_2)R - F_1(2s - y_1)] =$$

$$= \frac{1}{1,5} [83870(1,044 + 0,75) - 65806(1,044 - 0,75) + 20954,5 \cdot 0,42$$

$$- 2224(1,5 - 0,298)]$$

$$= 91\,566\text{ N}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{1}{2s} * [P_2 * (b + s) - P_1(b - s) - (Y_1 - Y_2)R - F_1 * y_1] = \\ &= \frac{1}{1,5} [65806(1,044 + 0,75) - 83870(1,044 - 0,75) - 20954,5 * 0,425 - 2224 \\ &\quad * 0,298] = \\ &= 55\ 887\ N \end{aligned}$$

Momenty od sil působících při pohybu:

a) V oblasti mezi ložiskem a kolem:

$$M_x = P_1 * y = 83\ 870 * y$$

b) V oblasti mezi koly:

$$\begin{aligned} M_x &= P_1 * y - Q_1 * (y - b + s) + Y_1 * R - F_1 * (y - b + s - y_1) = \\ &= 83870 * y - 91566(y - 1,044 + 0,75) + 41909 * 0,425 \\ &\quad - 2224(y - 1,044 + 0,75 - 0,298) = \\ &= 46\ 042 - 9\ 920 * y \end{aligned}$$

Momenty vyvolané brzděním a pohonem:

- Pro kotoučové brzdy (brzdové obložení) je $\Gamma = 0,35$
- Součinitel tření $\mu = 0,3$
- Počet kol $i = 8$

Určení přítláčné síly F_f :

$$\begin{aligned} P' &= \frac{m_c * g}{i} = \frac{49680 * 9,81}{8} = 60\ 920\ N \\ P_k &= \mu * P' = 0,3 * 60920 = 18\ 276\ N \\ F_f &= \frac{P_k * R}{\Gamma * R_b} = \frac{18276 * 0,425}{0,35 * 0,22} = 100\ 874\ N \end{aligned}$$

a) Momenty mezi rovinou zatížení a styčných kružnic:

$$M'_x = F_f * \Gamma * y = 100874 * 0,35 * y = 35\ 305 * y$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = F_f * \Gamma * \frac{R_B}{R} * y = 100874 * 0,35 * \frac{0,22}{0,425} * y = 18\ 276 * y$$

b) Momenty mezi rovinami styčných kružnic:

$$M'_x = F_f * \Gamma * (b - s) = 100874 * 0,35 * (1,044 - 0,75) = 10\ 379\ Nm$$

$$M'_y = 0,3 * P' * R = 0,3 * 60920 * 0,425 = 7\ 767\ Nm$$

$$M'_z = F_f * \Gamma * (b - s) * \frac{R_B}{R} = 100874 * 0,35 * (1,044 - 0,75) * \frac{0,22}{0,425} = 5\ 373\ Nm$$

Výsledný moment MR:

a) Mezi rovinou zatížení a styčných kružnic:

$$MX = M_x + \sum M'_x = 83870 * y + 35305 * y = 119\,175 * y$$

$$MY = M'_y = 0$$

$$MZ = M'_z = 18\,276 * y$$

b) Mezi rovinami styčných kružnic:

$$MX = M_x + \sum M'_x = 46042 - 9920 * y + 10379 = 56\,421 - 9\,920 * y$$

$$MY = M'_y = 7\,767$$

$$MZ = M'_z = 5\,373$$

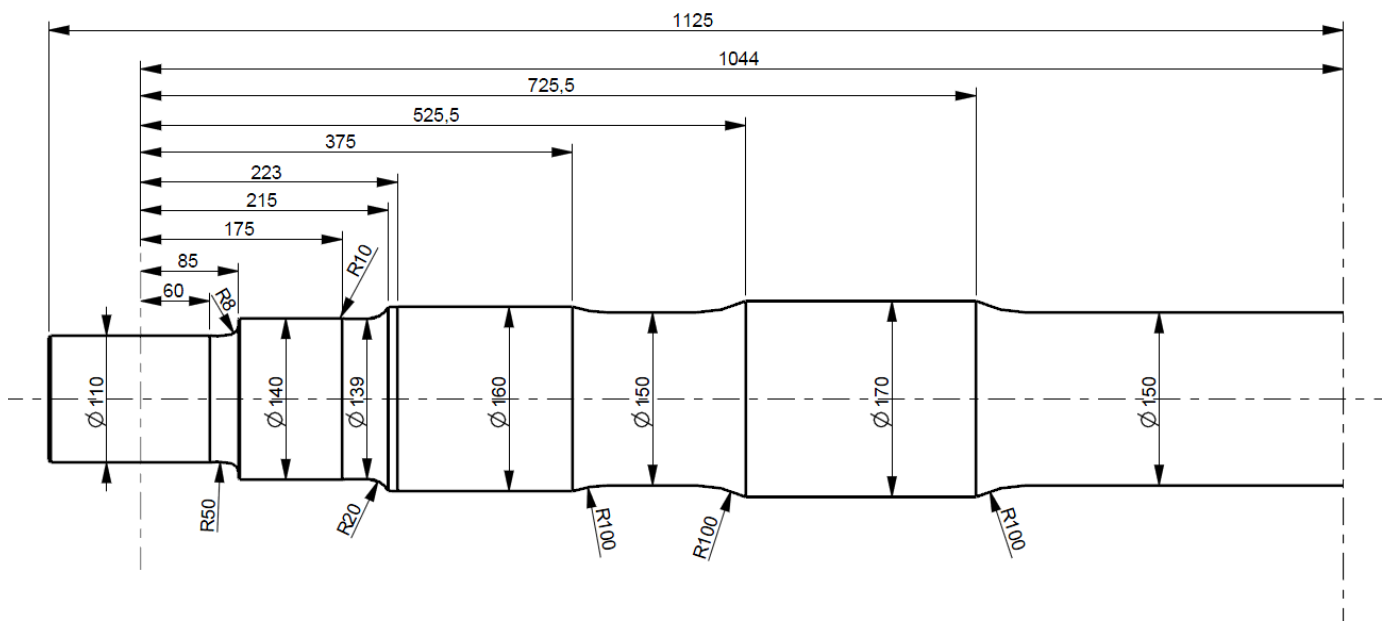
Výsledný moment MR:

$$MR = \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2}$$

Určení napětí σ

$$\sigma = \frac{K * 32 * MR}{\pi * d^3}$$

Určení rozměrů a napětí v jednotlivých průřezech:



Obrázek 26 Rozměry hnací nápravy

Dovolené napětí u zvoleného materiálu je v následující tabulce. Zvolená bezpečnost $s = 1,2$. Pásmo I. je mimo nalisovanou součást na nápravě, pásmo II. pod nalisovanou součástí na nápravě.

	I. Pásmo	II. Pásmo
σ_{dov}	240 Mpa	145 Mpa
σ_{dov}/s	200 Mpa	120,8 Mpa

Tabulka 1 Dovolená napětí

- Průřez 1 ($y = 60$ mm, $d = 110$ mm, $D = 140$ mm, $r = 50$):

$$\frac{r}{d} = \frac{50}{110} = 0,45$$
$$\frac{D}{d} = \frac{140}{110} = 1,27$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,02$

$$M_x = 83817 * y = 83817 * 0,06 = 5029 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 35305 * y = 35305 * 0,06 = 2118,3 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,06 = 1096,6 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(5029 + 2118,3)^2 + 0 + (1096,6)^2} = 7230,9 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,02 * 32 * 7\,230\,900}{\pi * 110^3} = 56,44 \text{ MPa} \leq 120,83 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 2** ($y = 85 \text{ mm}$, $d = 110 \text{ mm}$, $D = 140 \text{ mm}$, $r = 8$):

$$\frac{r}{d} = \frac{8}{110} = 0,07$$
$$\frac{D}{d} = \frac{140}{110} = 1,27$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,25$

$$M_x = 83817 * y = 83817 * 0,085 = 7124,4 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 35305 * y = 35305 * 0,085 = 3000,9 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,085 = 1553,5 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(7124,4 + 3000,9)^2 + 0 + (1553,5)^2} = 10243,8 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,25 * 32 * 10\,243\,800}{\pi * 110^3} = 97,99 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 3** ($y = 130 \text{ mm}$, $d = 140 \text{ mm}$, $D = 140 \text{ mm}$, $r = 1$):

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{140} = 0,01$$
$$\frac{D}{d} = \frac{140}{140} = 1$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1$

$$M_x = 83817 * y = 83817 * 0,13 = 10896,2 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 35305 * y = 35305 * 0,13 = 4589,7 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,13 = 2375,9 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(10896,2 + 4589,7)^2 + 0 + (2375,9)^2} = 15667,1 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1 * 32 * 15\,667\,100}{\pi * 140^3} = 58,16 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 4** ($y = 197 \text{ mm}$, $d = 139 \text{ mm}$, $D = 225 \text{ mm}$, $r = 20$):

$$\frac{r}{d} = \frac{20}{139} = 0,14$$

$$\frac{D}{d} = \frac{225}{139} = 1,62$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,35$

$$M_x = 83817 * y = 83817 * 0,197 = 16511,9 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 35305 * y = 35305 * 0,197 = 6955,1 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,197 = 3600,4 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(16511,9 + 6955,1)^2 + 0 + (3600,4)^2} = 23741,6 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,35 * 32 * 23\,741\,600}{\pi * 139^3} = 121,56 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 5** ($y = 215 \text{ mm}$, $d = 139 \text{ mm}$, $D = 225 \text{ mm}$, $r = 20$):

$$\frac{r}{d} = \frac{20}{139} = 0,14$$

$$\frac{D}{d} = \frac{225}{139} = 1,62$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,35$

$$M_x = 83817 * y = 83817 * 0,215 = 18020,7 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 35305 * y = 35305 * 0,215 = 7590,6 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 0$$

$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,215 = 3929,3 \text{ Nm}$$
$$MR = \sqrt{(18020,7 + 7590,6)^2 + 0 + (3929,3)^2} = 25910,9 \text{ Nm}$$
$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,35 * 32 * 25\,910\,900}{\pi * 139^3} = 132,67 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 6** ($y = 300 \text{ mm}$, $d = 160 \text{ mm}$, $D = 160 \text{ mm}$, $r = 1$):

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{160} = 0,01$$
$$\frac{D}{d} = \frac{160}{160} = 1$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1$

$$M'_x = 83817 * y = 83817 * 0,3 = 25145,1 \text{ Nm}$$
$$M'_y = 35305 * y = 35305 * 0,3 = 10591,5 \text{ Nm}$$
$$M'_z = 0$$
$$M'_z = 18276 * y = 18276 * 0,3 = 5482,8 \text{ Nm}$$
$$MR = \sqrt{(25145,1 + 10591,5)^2 + 0 + (5482,8)^2} = 36154,7 \text{ Nm}$$
$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1 * 32 * 36\,154\,700}{\pi * 160^3} = 89,91 \text{ MPa} \leq 120,83 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 7** ($y = 375 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $D = 225 \text{ mm}$, $r = 100$):

$$\frac{r}{d} = \frac{100}{150} = 0,67$$
$$\frac{D}{d} = \frac{225}{150} = 1,5$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,02$

$$M'_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 0,375 = 42322 \text{ Nm}$$
$$M'_y = 10379 \text{ Nm}$$
$$M'_z = 7767$$
$$M'_z = 5353 \text{ Nm}$$
$$MR = \sqrt{(42322 + 10379)^2 + 7767^2 + (5353)^2} = 53538,5 \text{ Nm}$$
$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,02 * 32 * 53\,538\,500}{\pi * 150^3} = 164,81 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 8** ($y = 450 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $D = 150 \text{ mm}$, $r = 1$):

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{150} = 0,01$$
$$\frac{D}{d} = \frac{150}{150} = 1$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1$

$$M_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 0,45 = 41578 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 10379 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 7767$$

$$M'_z = 5353 \text{ Nm}$$

$$M_R = \sqrt{(41578 + 10379)^2 + 7767^2 + (5353)^2} = 52806,4 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1 * 32 * 52\,806\,400}{\pi * 150^3} = 159,37 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 9** ($y = 526 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $D = 220 \text{ mm}$, $r = 100$):

$$\frac{r}{d} = \frac{100}{150} = 0,67$$
$$\frac{D}{d} = \frac{220}{150} = 1,47$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,02$

$$M_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 0,526 = 40829 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 10379 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 7767$$

$$M'_z = 5353 \text{ Nm}$$

$$M_R = \sqrt{(40829 + 10379)^2 + 7767^2 + (5353)^2} = 52069,6 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,02 * 32 * 52\,069\,600}{\pi * 150^3} = 160,29 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 10** ($y = 626 \text{ mm}$, $d = 170 \text{ mm}$, $D = 170 \text{ mm}$, $r = 1$):

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{170} = 0,01$$
$$\frac{D}{d} = \frac{170}{170} = 1$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1$

$$M_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 0,626 = 39837 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 10379 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 7767$$

$$M'_z = 5353 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(39837 + 10379)^2 + 7767 + (5353)^2} = 51094,3 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1 * 32 * 51094,3}{\pi * 170^3} = 105,93 \text{ MPa} \leq 120,83 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 11** ($y = 726 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $D = 220 \text{ mm}$, $r = 100$):

$$\frac{r}{d} = \frac{100}{150} = 0,67$$
$$\frac{D}{d} = \frac{220}{150} = 1,47$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1,02$

$$M_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 0,726 = 38845 \text{ Nm}$$

$$M'_x = 10379 \text{ Nm}$$

$$M'_y = 7767$$

$$M'_z = 5353 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(38845 + 10379)^2 + 7767 + (5353)^2} = 50119,7 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1,02 * 32 * 50119,7}{\pi * 150^3} = 154,29 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

- **Průřez 12** ($y = 1044 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$, $D = 150 \text{ mm}$, $r = 1$):

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{150} = 0,01$$
$$\frac{D}{d} = \frac{150}{150} = 1$$

⇒ Součinitel koncentrace napětí určený dle normy ČSN EN 13104: $K = 1$

$$M_x = 46042 - 9920 * y = 46042 - 9920 * 1,044 = 35685,5 \text{ Nm}$$

$$M_x' = 10379 \text{ Nm}$$

$$M_y' = 7767$$

$$M_z' = 5353 \text{ Nm}$$

$$MR = \sqrt{(35685,5 + 10379)^2 + 7767^2 + (5353)^2} = 47020,4 \text{ Nm}$$

$$\sigma = \frac{K * 32 * M_R}{\pi * d_1^3} = \frac{1 * 32 * 47\,020\,400}{\pi * 150^3} = 141,91 \text{ MPa} \leq 200 \text{ MPa}$$

⇒ Vypočítané napětí v tomto průřezu VYHOVUJE.

V následující tabulce jsou vidět vypočtené hodnoty momentů a napětí v 12 kontrolovaných místech na nápravě.

	y [m]	d [mm]	D [mm]	r [m]	r/d	D/d	K	Mx	Mx'	My'	Mz'	MR	σ	σ_{dov}
1	0,06	110	140	50	0,45	1,27	1,02	5029,0	2118,3	0,0	1096,6	7230,9	56,44	120,8
2	0,085	110	140	8	0,07	1,27	1,25	7124,4	3000,9	0,0	1553,5	10243,8	97,99	200
3	0,13	140	140	1	0,01	1,00	1,00	10896,2	4589,7	0,0	2375,9	15667,1	58,16	200
4	0,197	139	225	20	0,14	1,62	1,35	16511,9	6955,1	0,0	3600,4	23741,6	121,56	200
5	0,215	139	225	20	0,14	1,62	1,35	18020,7	7590,6	0,0	3929,3	25910,9	132,67	200
6	0,3	160	160	1	0,01	1,00	1,00	25145,1	10591,5	0,0	5482,8	36154,7	89,91	120,8
7	0,375	150	225	100	0,67	1,50	1,02	42322,0	10379,0	7767,0	5353,0	53538,5	164,81	200
8	0,45	150	150	1	0,01	1,00	1	41578,0	10379,0	7767,0	5353,0	52806,4	159,37	200
9	0,526	150	220	100	0,67	1,47	1,02	40829,0	10379,0	7767,0	5353,0	52069,6	160,29	200
10	0,626	170	170	1	0,01	1,00	1	39837,0	10379,0	7767,0	5353,0	51094,3	105,93	120,8
11	0,726	150	220	100	0,67	1,47	1,02	38845,0	10379,0	7767,0	5353,0	50119,7	154,29	200
12	1,044	150	150	1	0,01	1,00	1	35685,5	10379,0	7767,0	5353,0	47020,4	141,91	200

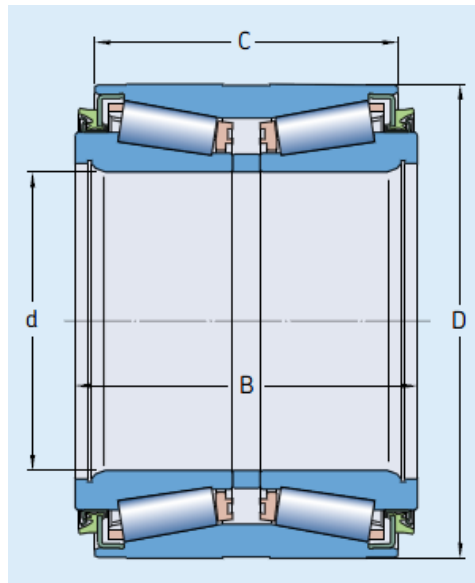
Tabulka 2 Výsledné hodnoty

3.3.3 Nápravové ložisko

Nápravové ložisko je další velmi důležitou částí podvozku. Přenáší totiž všechny síly mezi dvojkolím a skříní vozidla, respektive rámem podvozku. Požaduje se po něm bezpečný přenos těchto sil (svislých, vodorovných podélných i příčných, dynamických i statických). Dále je požadován malý součinitel tření a malé jízdní odpory, velkou provozní spolehlivost a v neposlední řadě také snadnou kontrolu a údržbu. Nejčastěji se nápravové ložisko skládá z vlastního ložiska, skříně, která má úpravu pro vypružení a vedení dvojkolí, a těsnění.

Samotné ložisko může být buď kluzné (používali se dříve) nebo valivé (u nových vozidel výhradně). Nejčastěji použité v kolejových vozidlech jsou dvouřadá soudečková ložiska, jednořadá válečková a kuželíková ložiska popřípadě ložiskové jednotky.

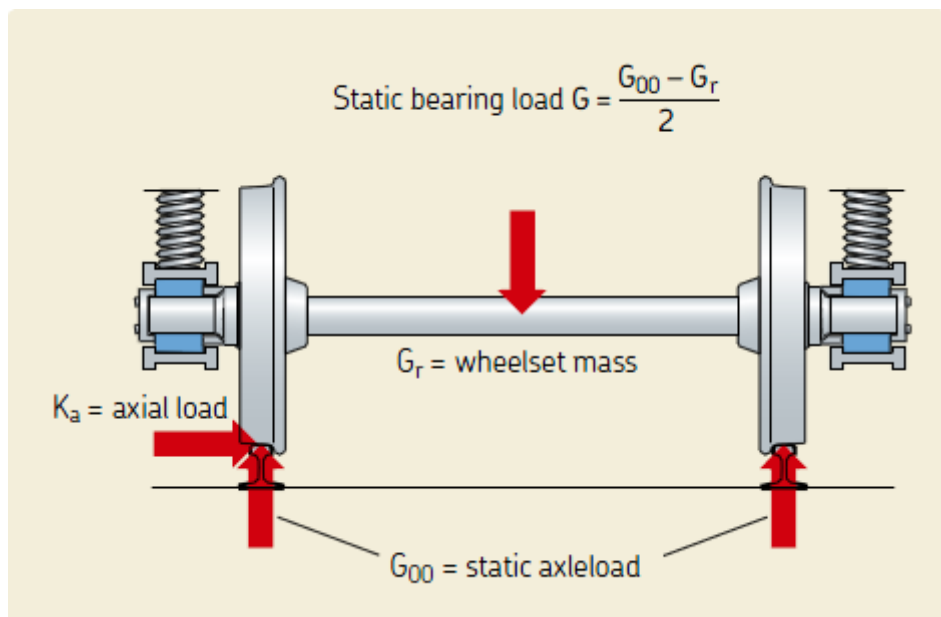
Já jsem zvolil ložiskovou jednotku od firmy SKF CTBU 110x180. Je to dvouřadá kuželíková ložisková jednotka s nastavitelnou axiální vůlí, s trvalou náplní plastického maziva a oboustranně utěsněná.



Obrázek 27 Kuželíková ložisková jednotka od firmy SKF CTBU [10]

3.3.4 Výpočet nápravového ložiska (ložiskové jednotky CTBU)

Výpočet této jednotky se řeší trochu odlišně od výpočtu běžného ložiska. Postupoval jsem podle podkladů z katalogu poskytnutého od firmy SKF.



Obrázek 28 Schéma zatížení pro výpočet ložiska [10]

Vstupní parametry:

Požadovaná trvanlivost	1,5 milionu km
Hmotnost cestujících	$m_c = 23\ 680\ \text{kg}$
Hmotnost vozu	$m_v = 26\ 000\ \text{kg}$
Hmotnost kola s kotoučem	$m_k = 410\ \text{kg}$
Hmotnost nápravy	$m_n = 301\ \text{kg}$
Hmotnost podvozku	$m_p = 6200\ \text{kg}$
Hmotnost převodovky	$m_{př} = 340\ \text{kg}$
Hmotnost ložiskového domku	$m_{ld} = 100\ \text{kg}$

$$G_r = m_n + 2 * m_{kol} = 301 + 2 * 410 = 1\,121\text{ kg} \cong 11\text{ kN}$$
$$G_{oo} = \frac{m_c + m_v}{4} = \frac{23680 + 26000}{4} = 12\,420\text{ kg} \cong 121,84\text{ kN}$$
$$G = \frac{G_{oo} - G_r}{2} = \frac{121,84 - 11}{2} = 55,42\text{ kN}$$

Koeficienty určené dle katalogu:

- $f_o = 0,95$... faktor užitečného zatížení
- $f_{rd} = 1,2$... dynamický radiální faktor
- $f_{tr} = 1,1$... dynamický jízdní faktor (pro závěskový pohon)
- $f_{ad} = 0,08$... dynamický axiální faktor

Radiální síla na ložiskový domek:

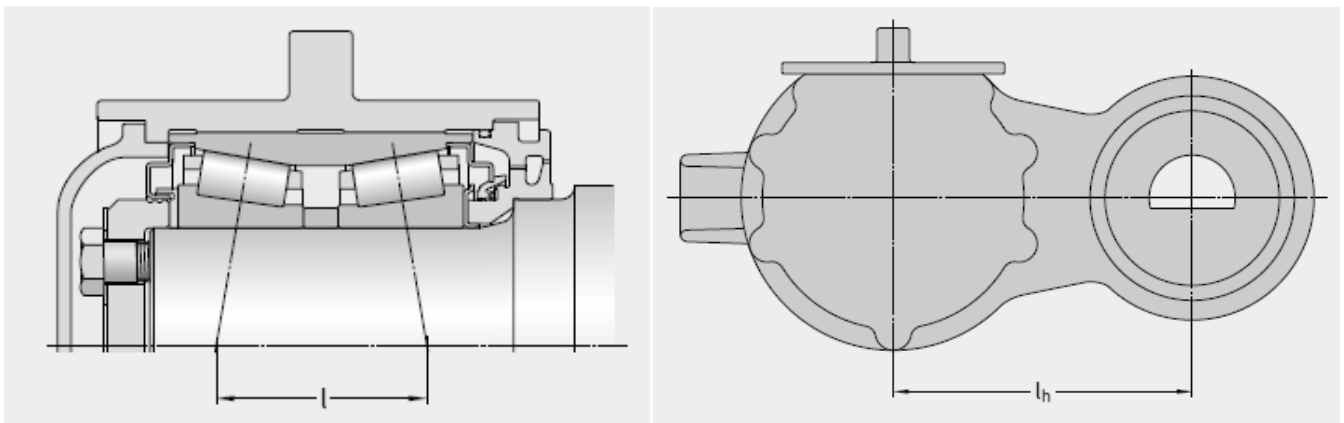
$$K_r = f_o * f_{rd} * f_{tr} * G = 0,95 * 1,2 * 1,1 * 55,42 = 69,5\text{ kN}$$

Axiální síla na ložiskový domek:

$$K_a = f_o * f_{ad} * G = 0,95 * 0,08 * 55,42 = 4,21\text{ kN}$$

Výpočet ekvivalentního dynamického ložiskového zatížení P:

- P ... ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
- $l = 85,09\text{ mm}$... vzdálenost mezi dvěma centry zatížení
- $l_h = 350\text{ mm}$... vzdálenost mezi osou nápravy a osou silentbloku
- Q ... přidavné zatížení díky nesymetrickému ložiskovému domku
- F_r ... radiální síla působící na ložisko
- F_a ... axiální síla působící na ložisko
- $Y = 2,55$... koeficient určený z katalogu SKF



Obrázek 29 Vysvětlení rozměrů vyskytujících se ve výpočtu [10]

$$Q = \frac{K_a * l_h}{l} = \frac{4,21 * 350}{85,09} = 17,32\text{ kN}$$
$$F_r = \sqrt{K_r^2 + Q^2} = \sqrt{69,5^2 + 17,32^2} = 71,63\text{ kN}$$
$$F_a = K_a = 4,21\text{ kN}$$
$$P = F_r + Y * F_a = 71,63 + 2,55 * 4,21 = 82,4\text{ kN}$$

Základní životnost:

Požadovaná základní životnost je 1,5 milionu kilometrů.

$C = 627\,000\text{N}$... základní dynamická únosnost

$p = 10/3$... exponent pro ložiska s čárovým stykem

$D_{kola} = 0,755\text{ m}$... průměr maximálně opotřebeného kola

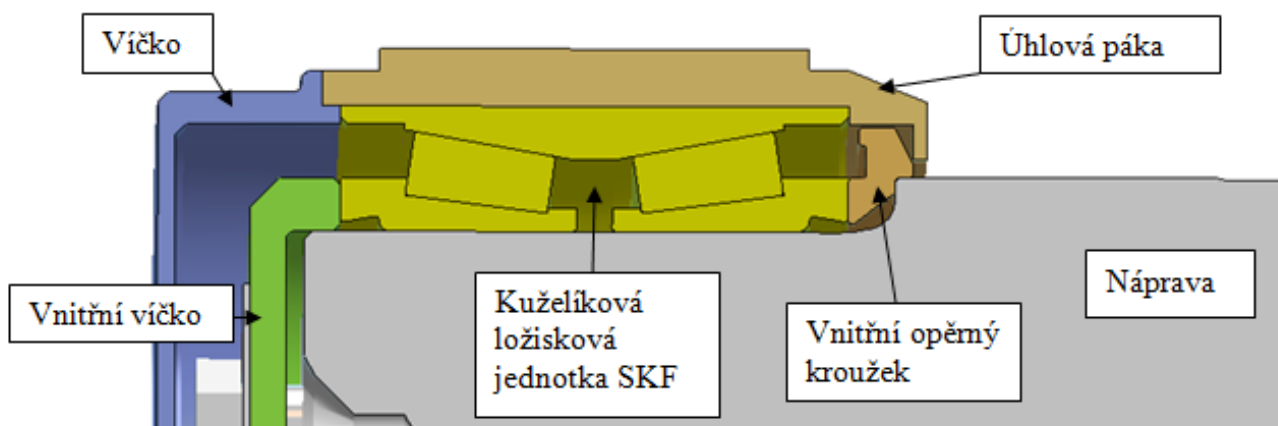
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{627000}{82400}\right)^{\frac{10}{3}} = 866,6 \text{ mil.otáček}$$

$$L_{10S} = \pi * L_{10} * \frac{D_{kola}}{1000} = \pi * 866,6 * \frac{0,755}{1000} = 2,11 \text{ mil.kilometrů}$$

Nápravové ložisko dle požadované základní životnosti 1,5 milionu kilometrů VYHOVUJE.

3.3.5 Uložení dvojkolí

Náprava je uložena v dvojici ložiskových jednotek od firmy SKF. Uložení je na vnějších čepích, vnitřní průměr ložiska je 110 mm. Ložisková jednotka nepotřebuje žádné přidavné těsnění ani doplnění maziva. Má vlastní náplň plastického maziva a je oboustranně utěsněná. Uložení na nápravě je provedeno pomocí opěrného kroužku na vnitřní straně ložiska, kde opěrný kroužek se opře o sedlo nápravy a o vnitřní kroužek ložiska. Z vnější strany je axiální posuv vnitřního kroužku ložiskové jednotky zajištěn vnitřním víčkem přišroubovaným pomocí tři šroubů M20 k čelu nápravy. Vnější kroužek nápravového ložiska je uložen v těle úhlové páky, v které je zajištěn axiální posuv ložiska na vnitřní straně, z vnější strany je axiální posuv pojištěn víčkem, které je přišroubováno pomocí šesti šroubů M10 k úhlové páce a uzavírá tak celý ložiskový domek.

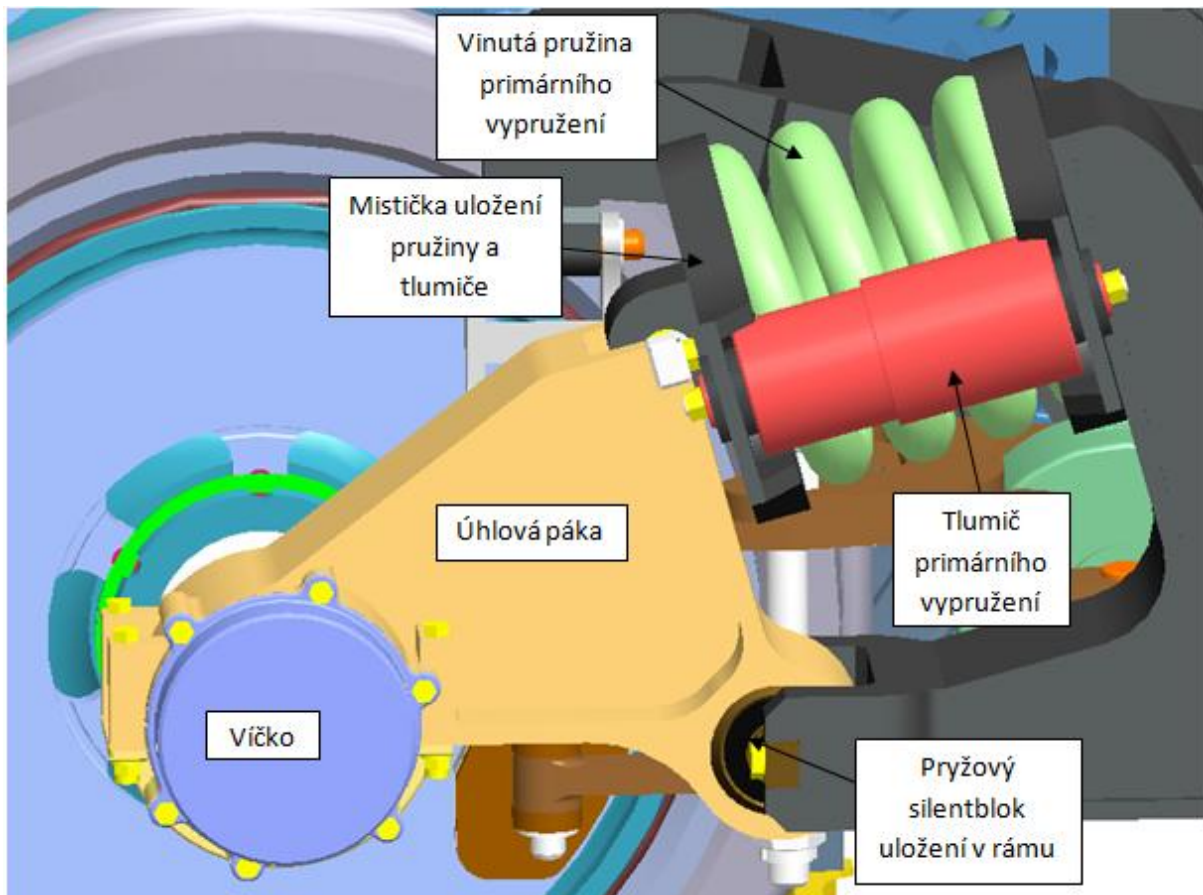


Obrázek 30 Řez uložením dvojkolí

3.4 Primární vypružení a vedení dvojkolí

Vedení dvojkolí a primární vypružení jsou dva konstrukční prvky, které se navzájem bezprostředně ovlivňují a souvisejí spolu. Jejich úkoly jsou zajistit svislé a příčné vypružení mezi rámem podvozku a ložiskovou skříní, zajistit rovnoměrné rozložení tíhy vozidla na jednotlivá kola, udržení nárazníků ve výšce dané předpisy, eliminovat účinky svislých nerovností koleje, snižovat dynamické účinky ve styku kolo-kolejnice, přenášet síly ve všech směrech mezi rámem a dvojkolím (zejména tažné a brzdné podélné síly, příčné vodící síly) a

společně se sekundárním vypružením zajistit dostatečný komfort pro cestující ve vozidle.
[KKVII 114]



Obrázek 31 Primární vypružení

Konstrukčních provedení je celá řada a liší se více či méně podle druhu podvozku a druhu vozidla. Já jsem zvolil vypružení a současně i vedení pomocí mechanismu úhlové páky se šroubovitou pružinou a paralelně uloženým tlumičem kmitání.

3.4.1 Úhlová páka

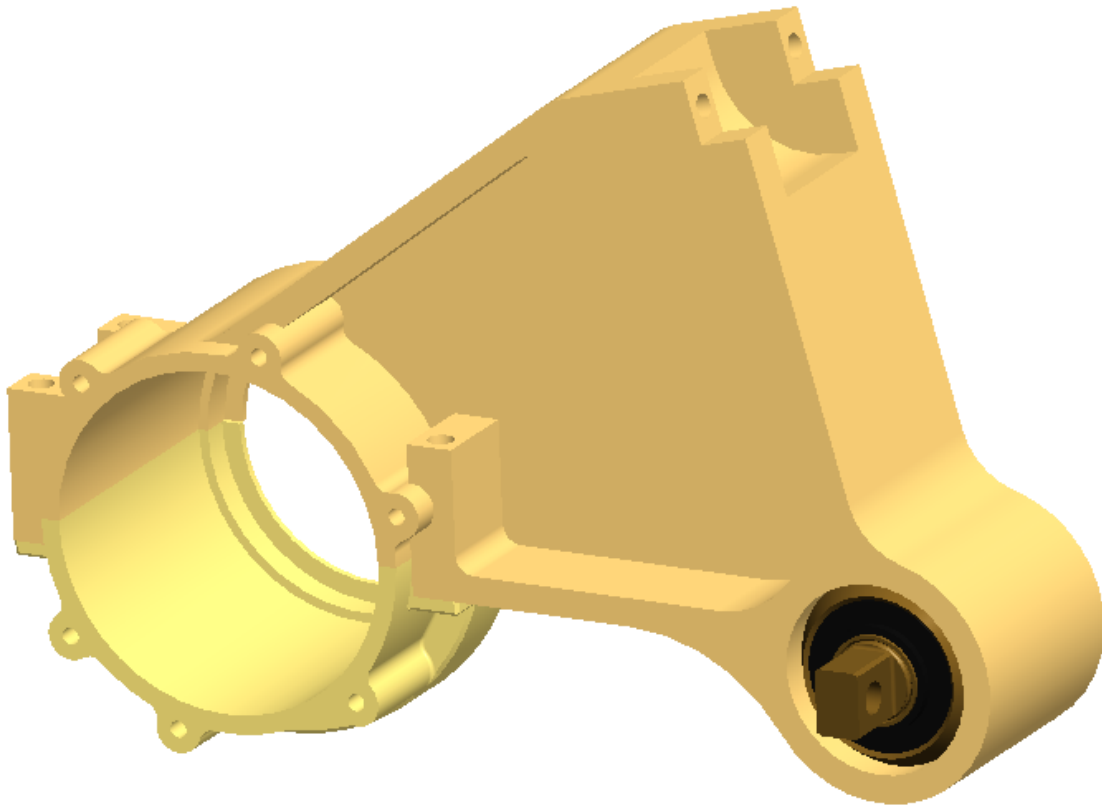
Hlavním úkolem úhlové páky je přenášet vertikální pohyby rámu podvozku na primární vypružení. Slouží jak k vypružení, tak i k vedení dvojkolí v koleji a tedy přenáší značné zatížení.

Úhlová páka je uložena ve své spodní části v pryžovém silentbloku, který je připevněn ke konzole rámu podvozku pomocí dvojice šroubů M16. Tento silentblok umožňuje mírné pootočení páky vůči rámu a tím i mírné stavění dvojkolí při průjezdu zatáčkou, čímž nedochází k takovému opotřebení kol a kolejnice, jak je tomu u běžného podvozku bez možnosti natočení kol do směru zatáčky.

V horní části úhlové páky je otočně uložena mistička pro šroubovitou pružinu. Šroubovitá pružina je uložena v této mističce a v obdobné, která je přivařena na konzole rámu podvozku.

Třetí částí úhlové páky je trubkovitá část, ve které je uložena ložisková jednotka. Tato část je půlená kvůli možnosti snadného vyvázání dvojkolí z podvozku. Oba díly jsou spojeny pomocí čtyř lícovaných šroubů M12. Z čela je celý otvor pro ložisko uzavřen víčkem přichyceným šesti šrouby.

Výroba byla zvolena formou odlitku. Odlévání je oproti svařování výhodné zejména tím, že nevnaší do materiálu zbytkové pnutí vlivem velkého tepelného zatěžování při svařování. Po svařování by mohlo dojít k deformacím součásti (zkroucení) a takovou součást by nebylo možné použít, čímž by vznikali ztráty. Po odlévání je materiál v celé součásti homogenní. Jde ovšem o ekonomicky nákladnější druh výroby oproti svařování.



Obrázek 32 Úhlová páka

3.4.2 Paralelní tlumič vypružení P80

Mistička šroubovitě pružiny má směrem k vnějšku podvozku vyveden nálietek, ve kterém je otvor pro uložení paralelního tlumiče kmitů. Tlumič je od firmy ST-OS (Strojírna Oslavany) a nese označení P80. Tento tlumič má nízkou hmotnost a malé zástavbové rozměry. [11]

Parametry tlumiče:

Rozsah charakteristik:	od 5.5 do 60.60 kN.s.m-1 (tah.tlak)
Tlumení do rychlosti pístnice:	0,7 m/s
Teplotní rozsah:	-40°C až +50°C
Největší průměr tlumiče:	80 mm
Maximální tlumicí síla:	14 kN
Rozsah zdvihů:	120 – 260 mm
Tlumicí charakteristika:	nastavitelná omezovací větev

3.4.3 Výpočet vypružení

Hmotnost prázdného vozu	$m_v = 26 \text{ t}$
Hmotnost podvozku	$m_p = 6200 \text{ kg}$
Hmotnost převodovky	$m_{pr} = 340 \text{ kg}$
Hmotnost dvojkolí	$m_{dv} = 1121 \text{ kg}$
Hmotnost ložiskového domku	$m_{ld} = 100 \text{ kg}$
Hmotnost cestujících (48 + 248)	$m_{cest} = 23680 \text{ kg}$
Maximální dovolené napětí	$\tau_{DOV} = 720 \text{ MPa}$
Modul pružnosti ve smyku	$G = 7,85 \cdot 10^4 \text{ MPa}$
Dynamické stlačení pružiny	$y_{dyn} = 25 \text{ mm}$
Maximální užitečné zatížení	$y_{už} = 80 \text{ mm}$

Hmotnost rámu podvozku:

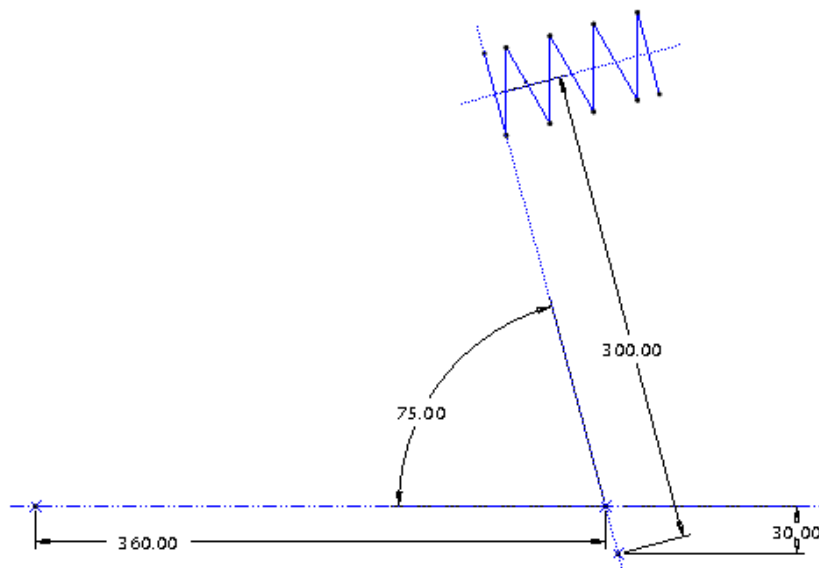
$$m_{rp} = m_p - 2 * m_{dv} - 4 * m_{ld} - 2 * \frac{2}{3} * m_{pr} = 6200 - 2 * 1121 - 4 * 100 - 2 * \frac{2}{3} * 340 = 3105 \text{ kg}$$

Hmotnost skříně:

$$m_{sk} = m_v - 2 * m_p = 26000 - 2 * 6200 = 13600 \text{ kg}$$

Dynamická deformace pružiny:

Posunutí úhlové páky ve svislém směru v místě osy nápravy jsou odlišné od posunutí pružiny v téměř vodorovném směru. Je tedy nutno tyto posuvy přepočítat.



Obrázek 33 Přepočet výchylek

Silový trojúhelník:

$$z_{dyn} = \frac{y_{dyn} * a}{b} = \frac{25 * 300}{360} = 20,83 \text{ mm}$$

$$z_{už} = \frac{y_{už} * a}{b} = \frac{80 * 300}{360} = 66,17 \text{ mm}$$

Poměr tuhostí:

- Prázdný vůz

$$y_P = 2 + \frac{2 * m_{rp}}{m_{sk}} = 2 + \frac{2 * 3105}{13600} = 2,457$$

- Ložený vůz

$$y_L = 2 + \frac{2 * m_{rp}}{m_{sk} + m_{cest}} = 2 + \frac{2 * 3105}{13600 + 23680} = 2,167$$

- Průměr

$$y = \frac{y_P + y_L}{2} = \frac{2,457 + 2,167}{2} = 2,312$$

Tuhost:

- Celková

$$k_c = \frac{m_{cest} * g}{z_{už}} = \frac{23680 * 9,81}{66,7} = 3483 \frac{N}{mm}$$

- Tuhost sekundárního vypružení

$$k_{2c} = \frac{(y + 1) * k_c}{y} = \frac{(2,312 + 1) * 3483}{2,312} = 4985 \frac{N}{mm}$$

- Tuhost primárního vypružení

$$k_{1c} = y * k_{2c} = 2,312 * 4985 = 11526 \frac{N}{mm}$$

Tuhost jednotlivých pružin:

- Primár

$$k_1 = \frac{k_{1c}}{8} = \frac{11526}{8} = 1441 \frac{N}{mm}$$

- Sekundár

$$k_2 = \frac{k_{2c}}{4} = \frac{4985}{4} = 1246,3 \frac{N}{mm}$$

První vlastní frekvence:

- Prázdný

$$f_P = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k_c}{m_{sk}}} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{3483}{13600}} = 2,547 \text{ Hz}$$

- Ložený

$$f_L = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k_c}{m_{sk} + m_{cest}}} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{3483}{13600 + 23680}} = 1,538 \text{ Hz}$$

Síla na jednu pružinu:

- Primár – prázdný vůz

$$P_{1P} = \frac{(m_{sk} + 2 * m_{rp})}{8} * g = \frac{(13600 + 2 * 3105)}{8} * 9,81 = 24292 \text{ N}$$

- Primár – ložený vůz

$$P_{1L} = \frac{(m_{sk} + 2 * m_{rp} + m_{cest})}{8} * g = \frac{(13600 + 2 * 3105 + 23680)}{8} * 9,81 = 53330 \text{ N}$$

- Sekundár – prázdný vůz

$$P_{2P} = \frac{m_{sk} * g}{4} = \frac{13600 * 9,81}{4} = 33354 \text{ N}$$

- Sekundár – ložený vůz

$$P_{2L} = \frac{(m_{sk} + m_{cest}) * g}{4} = \frac{(13600 + 23680) * 9,81}{4} = 91430 \text{ N}$$

Stlačení primární pružiny:

- Prázdný vůz

$$z_{1P} = \frac{P_{1P}}{k_1} = \frac{24292}{1441} = 16,86 \text{ mm}$$

- Ložený vůz

$$z_{1L} = \frac{P_{1L}}{k_1} = \frac{53330}{1441} = 37,01 \text{ mm}$$

- Užitečné stlačení

$$z_{1už} = z_{1L} - z_{1P} = 37,01 - 16,86 = 20,15 \text{ mm}$$

Napětí při dynamickém namáhání:

$$\tau_{1DOV} = \tau_{DOV} * \frac{z_{1L}}{z_{1L} + z_{dyn}} = 720 * \frac{37,01}{37,01 + 20,83} = 460,7 \text{ MPa}$$

Návrh a výpočet pružin primárního vypružení:

Zvoleno $i = D_1/d_1 = 5$, dále $d_1 = 44 \text{ mm}$ a tedy $D_1 = 220 \text{ mm}$.

$$k = \frac{4 * i - 1}{4 * i - 4} + \frac{0,615}{i} = \frac{4 * 5 - 1}{4 * 5 - 4} + \frac{0,615}{5} = 1,3105$$

k ... součinitel vypružení podle Wahla

Napětí v pružině:

$$\tau_1 = \frac{16 * P_{1L} * \frac{D_1}{2} * k}{\pi * d_1^3} = \frac{16 * 53330 * \frac{220}{2} * 1,3105}{\pi * 44^3} = 459,6 \text{ MPa} \leq 460,7 \text{ MPa}$$

Vypočtené napětí v pružině tedy VYHOVUJE.

Maximální dynamické stlačení pružiny:

$$z_{1dyn} = z_{1L} * \frac{\tau_{DOV}}{\tau_1} = 37,01 * \frac{720}{459,6} = 57,98 \text{ mm}$$

Počet činných závitů:

$$n_1 = \frac{G * d_1^4}{8 * k_1 * D_1^3} = \frac{7,85 * 10^4 * 44^4}{8 * 1441 * 220^3} = 2,367$$

Dále je zvolen počet závěrných závitů $n' = 1,5$.

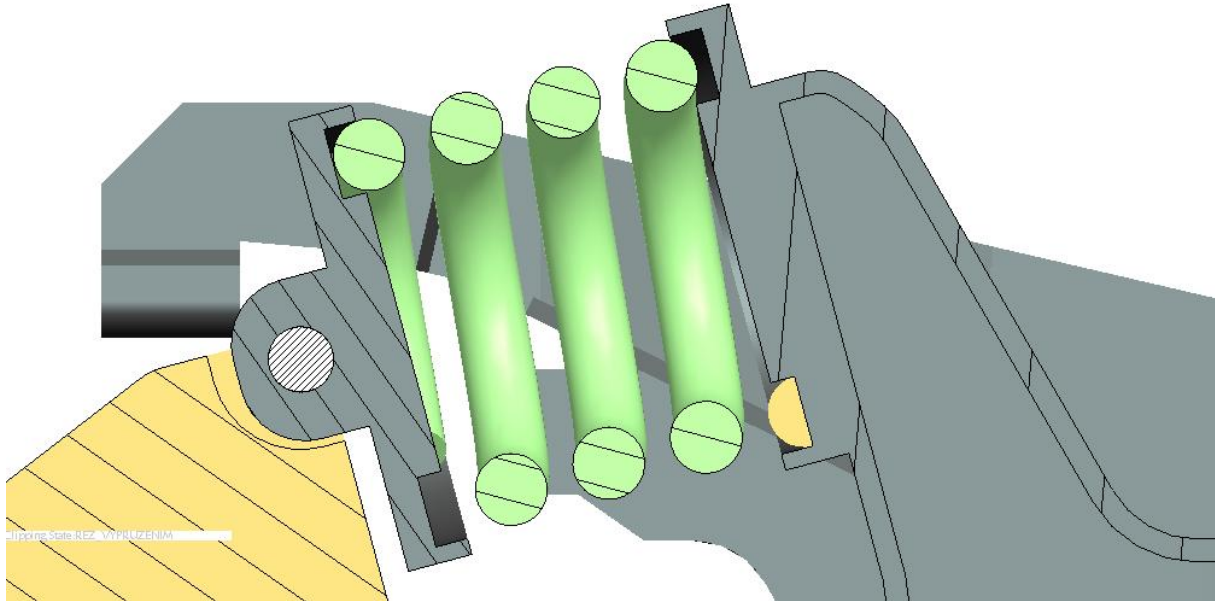
Délka pružiny:

$$H_{o1} = (n_1 + n') * d_1 + 0,1 * n * d_1 + z_{1dyn} = \\ = (2,367 + 1,5) * 44 + 0,1 * 2,367 * 44 + 57,98 = 238,5 \text{ mm}$$

Tabulka výsledných hodnot:

PARAMETR	HODNOTA
k ₁	1441 N/mm
z _{1už}	20,15 mm
d ₁	44 mm
D ₁	220 mm
τ _{1DOV}	460,7 MPa
τ ₁	459,6 MPa
z _{1dyn}	57,98 mm
n	2,367
H _{o1}	238,5 mm

Tabulka 3 Vypočtené hodnoty pružiny



Obrázek 34 Řez vypočtenou vinutou pružinou

3.5 Sekundární vypružení

Pro dosažení potřebného jízdního komfortu kolejového vozidla je potřeba, aby na vozidle bylo ústrojí, které tento požadavek zajistí. Jedním z komponentů, který toto zajišťuje, je sekundární vypružení, které je vloženo mezi rám podvozku a skříň kolejového vozidla. Používá se u všech železničních kolejových vozidel, s výjimkou většiny nákladních vozů a vozů bezpodvozkových. Vhodnou volbou poměru tuhosti primárního a sekundárního vypružení lze dosáhnout optimálního komfortu a jízdních vlastností kolejového vozidla při jízdě na přímé trati i v oblouku. [3, Heller, 2011, str. 131]

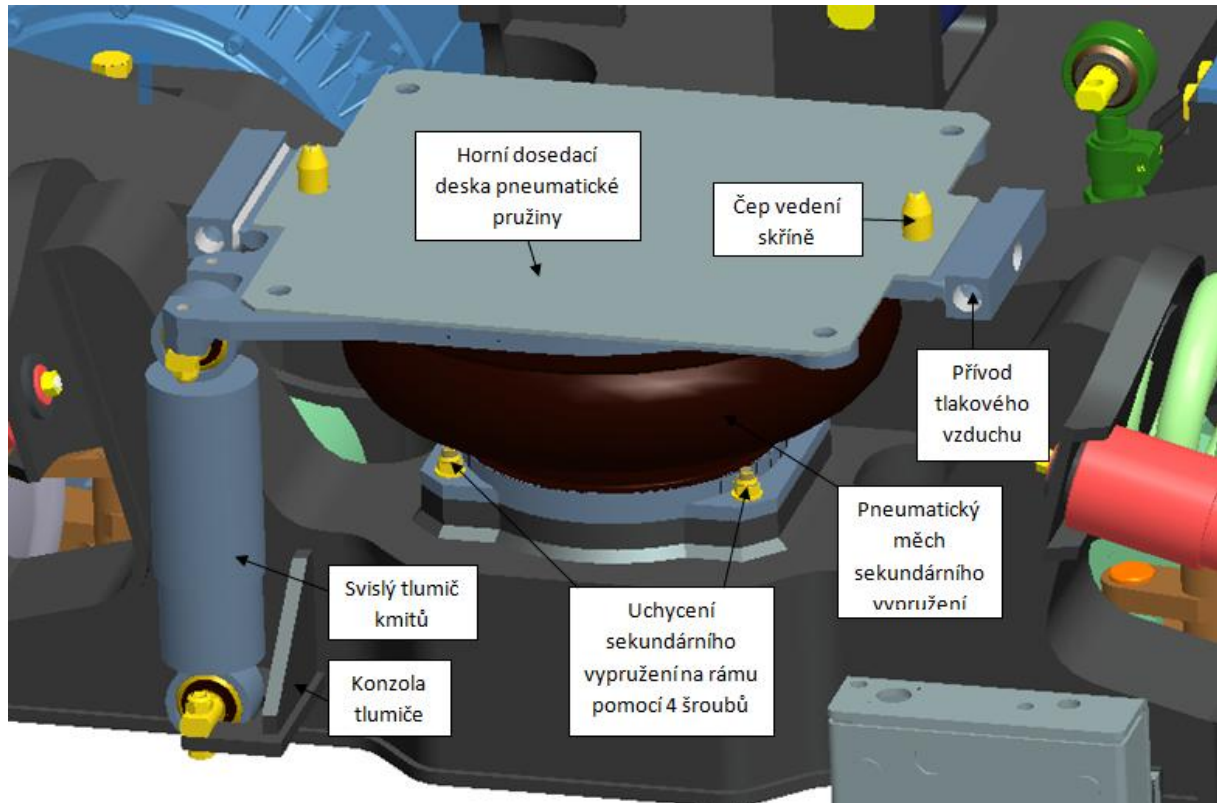
Hlavními prvky sekundárního vypružení jsou pružiny, tlumiče, závěsky a torzní stabilizátory. Možných řešení je celá řada, já jsem pro svůj návrh zvolil pneumatické vypružení s tlumiči a torzním stabilizátorem.

3.5.1 Pneumatické pružiny a tlumiče

Jedná se o řešení bez kolébky, které má oproti řešení s kolébkou nižší hmotnost, nevýhodou je ale zejména výrobní náročnost prohnutých podélníků. Jedná se o nároky na opracování jednotlivých rámců dílu a vyšší nároky na kvalitu svařování.

Pneumatické pružiny umožňují podvozku v oblouku bez použití kolébky. Dále sekundární pneumatické vypružení zajišťuje konstantní výšku podlahy od temene kolejnice, nezávisle na velikosti změny zatížení způsobenou nástupem a výstupem osob z vozu metra. To je prováděnou změnou tlaku v plynovém měchu.

Vypružení je doplněné o svislý tlumič kmitů, který je uchycen jedním koncem na horní dosedací desce pneumatického měchu a druhým koncem na konzole navařené z boku podélníku rámu podvozku. Uchycení je přes silentbloky pomocí dvojice šroubů M16.

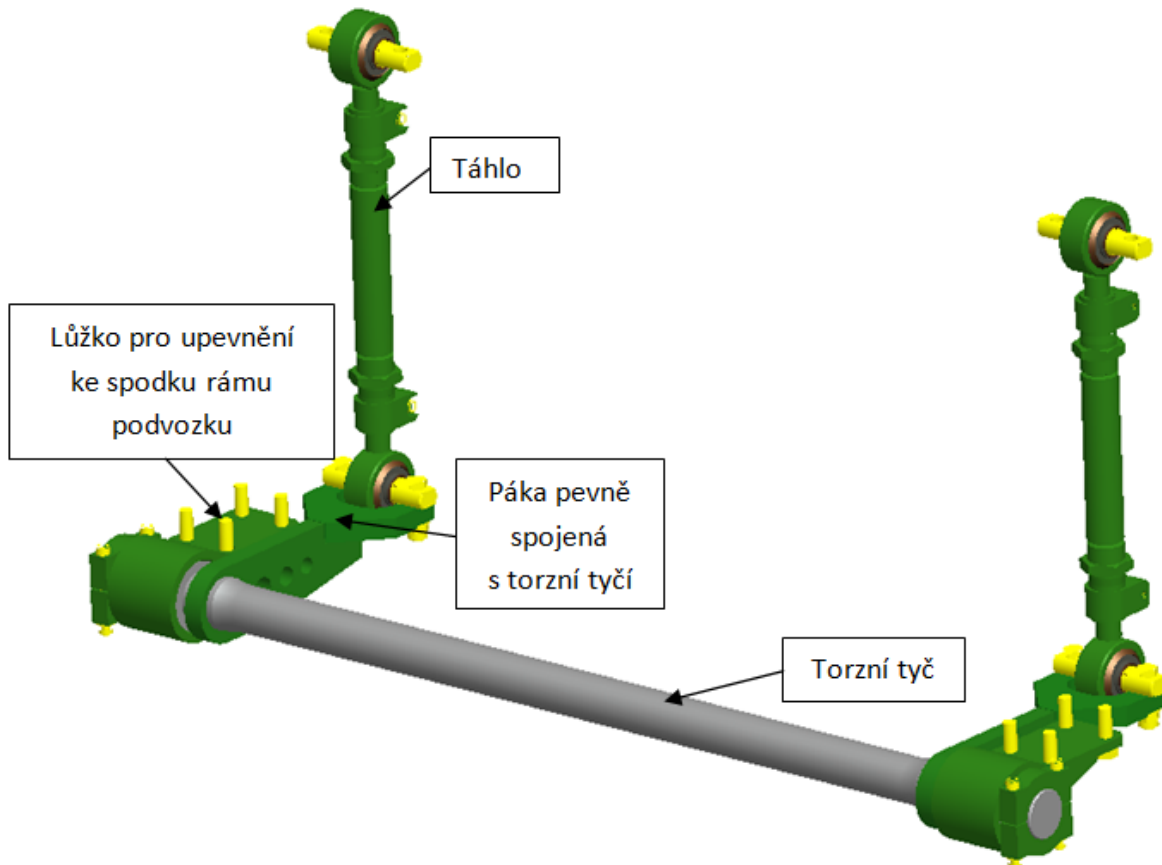


Obrázek 35 Sekundární vypružení

3.5.2 Torzní stabilizátor

Torzní stabilizátory se často používají u podvozků s pneumatickým vypružením či vypružením šroubovými pružinami, kde je potřebné stabilizovat kolébání vozidla.

Princip funkce torzního stabilizátoru je takový, že skříň vozidla spočívající na horní desce sekundárního vypružení je pomocí dvojice šroubů spojena přes silentblok s horním koncem táhla, které je spojeno opět přes silentblok a pákou pevně spojenou s torzní tyčí (svěrným spojem). Torzní tyč má na obou koncích lůžka, přes která je pomocí šroubů pevně připojena k rámu podvozku. Při kývání vozu je torzní tyč zkrucována, což vyvolává vratnou stabilizující sílu. [2]



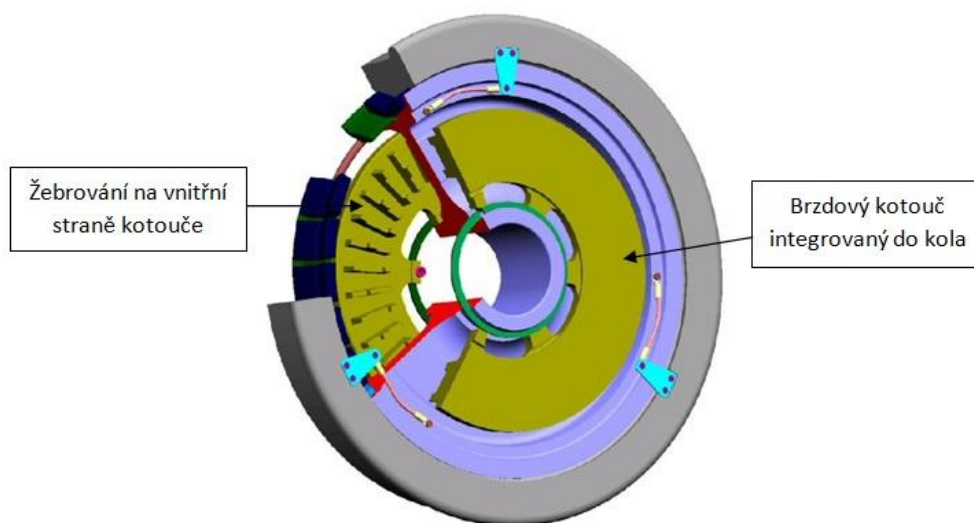
Obrázek 36 Torzní stabilizátor

3.6 Brzdy

Brzdění je proces, při kterém záměrně zvyšujeme jízdní odpory kolejového vozidla s cílem regulovat rychlost jízdy, zastavit v předepsané vzdálenosti a na stanoveném místě nebo zajistit stojící vozidlo proti samovolnému pohybu.

Principem brzdění je zmaření části nebo celé kinetické energie vozidla, většinou její přeměnou v teplo. [2]

V mém návrhu podvozku pro metro jsou brzdy kotoučové, s brzdovými kotouči integrovanými do kol a to zejména kvůli prostoru, kterého se na nápravě nenacházelo dostatek. Brzdové kotouče jsou od společnosti Bonatrans stejně jako kola, jsou tedy montovány do kol už ve firmě. Vnější průměr kotouče je 570 mm a vnitřní průměr otvoru kotouče je 225 mm. Kotouče mají na vnitřní straně žebrování, díky kterému je odstředivou silou od středu kola nasáván vzduch a po odvodu odváděn. Tím dochází k chlazení samotného kotouče i celého kola.



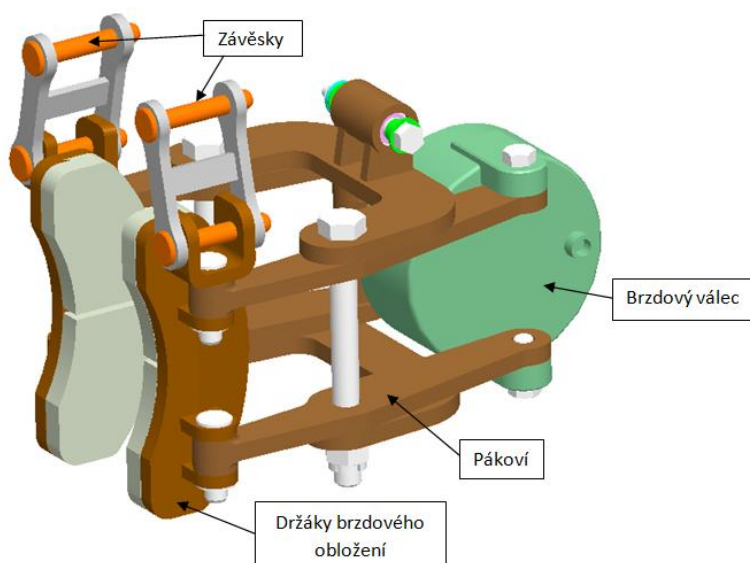
Obrázek 37 Integrované kotouče v kolech [9]

Na segmenty kotoučů uložené v kolech jsou kleštinovým mechanismem přitlačovány brzdové čelisti s třecím obložením. Třecí obložení je uloženo na brzdové jednotce. Mnou použitá brzdová jednotka je od firmy DAKO

Tato brzdová jednotka obsahuje brzdový válec se zabudovaným samočinným jednostranným stavěčem odlehlosti, pákový s přesně definovaným poměrem, držáky obložení, spojnice a závěsky. [12]

Technické údaje:

Průměr brzdového válce	10“
Plocha brzdového obložení	400 cm ²
Rozměr brzdového kotouče	570/225 mm
Střední třecí poloměr brzdového kotouče	1.0 – 1.5
Odlehlost brzdových čelistí	2 ± 1 mm
Hmotnost brzdové jednotky	cca 75 kg
Pracovní teplota	-40°C až +60°C



Obrázek 38 Brzdová jednotka DAKO

3.7 Pohon

Pohon je klasické koncepce, závěškový. Skládá se z motoru o výkonu 170 kW, zubové spojky a jednostupňové převodovky. Zubová spojka musí umožňovat jednak přenos krouticího momentu z motoru na pastorek převodovky, což je její hlavní funkce, tak musí také umožňovat relativní pohyby vypruženého trakčního motoru vůči převodovce. [3]

3.7.1 Motor

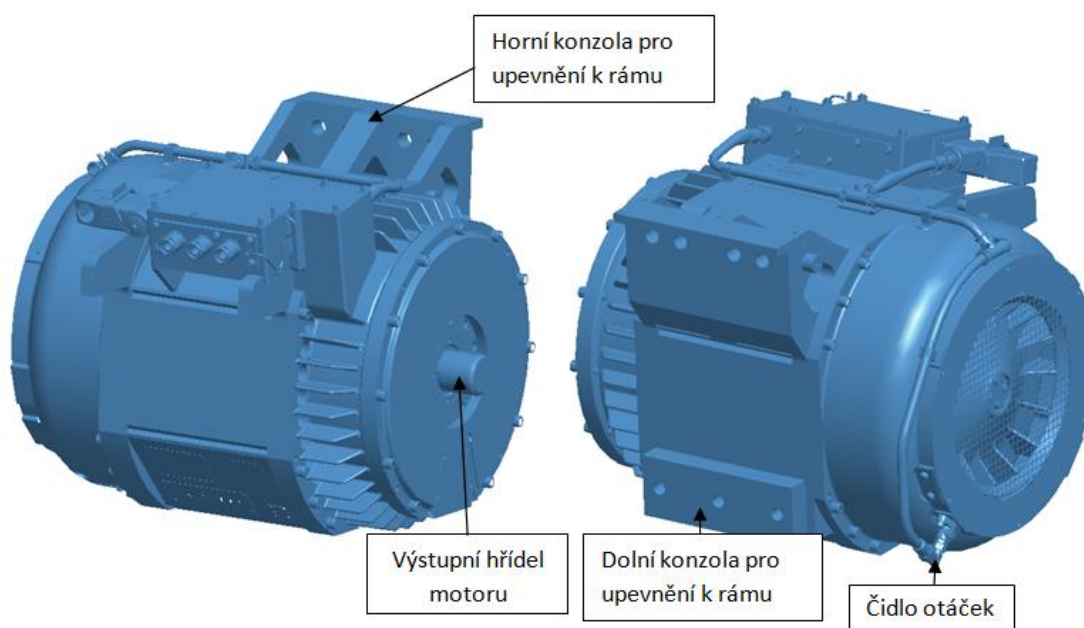
Jediným požadavkem v zadání týkajícím se pohonu byl výkon motoru 170 kW. Zvolil jsem tedy motor od firmy Škoda Electric s označením MLU 3839 K/4. Jedná se o čtyřpólový třífázový trakční motor s kotvou nakrátko. Dále je tento motor vybaven vlastní ventilací. Tento trakční motor je konstruován tak, aby bylo možné dle požadavků zákazníka připevnit spojku a převodovku na jeden nebo druhý konec motoru.

Vlastnosti motoru:

Výkon	170 kW
Jmenovité napětí	440 V
Jmenovitý proud	290 A
Otáčky	1238 ot/min
Maximální otáčky	3490 ot/min
Váha	565 kg
Chladicí systém	vlastní nucený

Trakční motor je připevněn ke konzole pevně přivařené k rámu podvozku pomocí čtveřice šroubů M24 v horní části a pomocí trojice šroubů M20 ve spodní části konzoly. Motor je vybaven čidlem otáček.

Konzoly přivařené na motoru, které slouží k připevnění motoru k rámu pomocí šroubů, jsem pro vlastní potřeby upravil. Spodní část konzoly zůstala nezměněná, vrchní díl je oproti motoru nabízenému v katalogu změněný.



Obrázek 39 Motor od firmy Škoda Electric

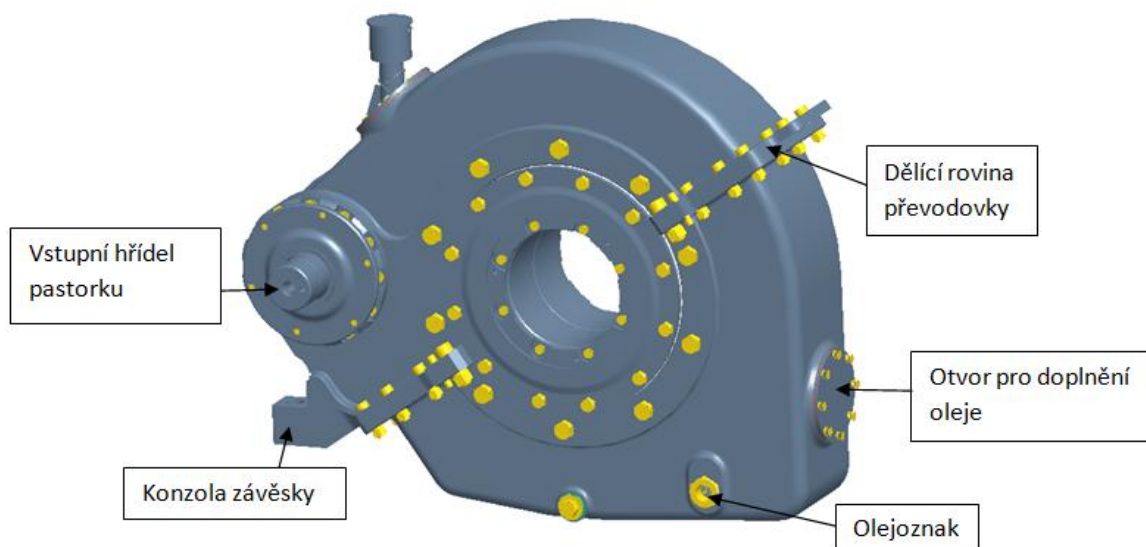
3.7.2 Převodovka

Převodová skříň slouží k přenosu krouticího momentu od motoru na dvojkolí při současné změně otáček a momentu. Zvolená převodová skříň je od společnosti Škoda Transportation. Převodovka má konstantní převod, jde tedy o jednostupňovou převodovku. Skládá se z pastorku s čelním ozubením a ozubeného kola s čelním ozubením. Pastorek má 21 zubů, ozubené kolo 122. Celkový převod je potom 5,81. Modul je roven 5. Ozubené kolo může mít tvrdost HRC shodnou s pastorkem, nebo nižší. Skříň se plní olejem skrz plnicí otvor ve spodní části převodovky tak, aby hladina oleje byla na středu olejoznaku.

Následující tabulka ukazuje, jaké jsou otáčky dvojkolí a motoru při několika zvolených rychlostech.

Rychlost v [km/h]	Otáčky dvojkolí [1/min]	Otáčky motoru [1/min]
20	124,8	725,2
40	249,7	1450,5
60	374,5	2175,7
80	499,3	2901,0

Tabulka 4 Otáčky dvojkolí a motoru v při jednotlivých rychlostech vozidla



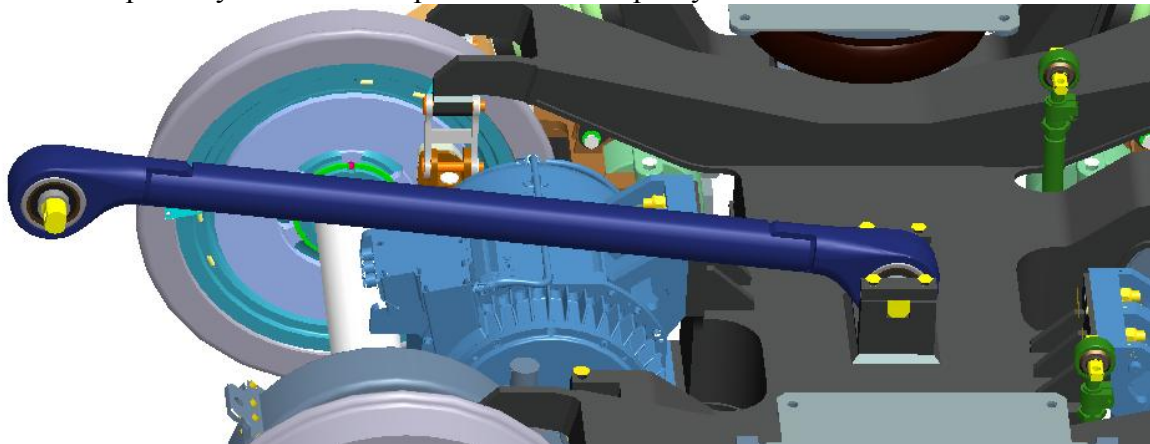
Obrázek 40 Převodovka

3.8 Vazba skříně a podvozku – tažně tlačná tyč

Vazba skříně s podvozkem musí zajišťovat přenos svislých, podélných a příčných sil mezi podvozkem a skříní. Dále co nejrovnoměrnější rozdělení zatížení kol v podvozkem a dostatečnou volnost pro relativní pohyby oproti skříní, především natáčení a klopení při projíždění směrovými a výškovými nerovnostmi koleje (jízda obloukem, propad kola, rampa...). [2]

Já jsem zvolil vazbu pomocí tažně tlačné tyče uložené mezi příčnickem podvozku a příčnickem skříně. Na rámu podvozku je konzola, ke které je pomocí dvou šroubů M20 tyč ukotvena. Druhým svým koncem je pak ukotvena na příčniku skříně. Tažně tlačná tyč má

v okách pro ukotvení silentbloky. Uložení tyče na příčniku podvozku umožňuje jednak relativně malý průměr motoru, jednak menší tažné síly při rozjezdu, které nevyvolávají velký rozdíl mezi nápravovými zatíženími přední a zadní nápravy.

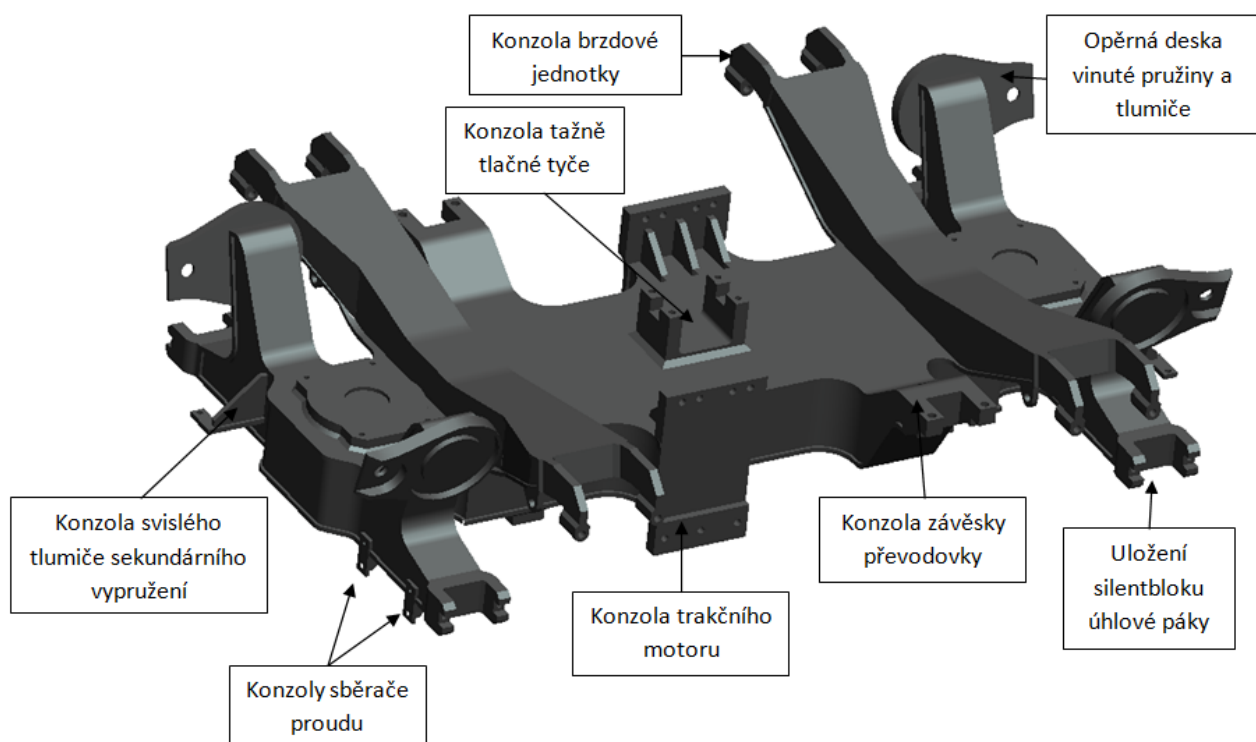


Obrázek 41 Tažně tlačná tyč

3.9 Rám podvozku

Rám je základní a největší částí podvozku. Nese a vede skříň metra pomocí sekundárního vypružení a tažně tlačné tyče. Rám musí být schopen přenášet síly ve všech směrech. Je kombinací odlévaných a svařovaných dílů. Rám spočívá na dvojkolí pomocí primárního vypružení a vedení přes úhlovou páku s vinutou pružinou. Na rámu jsou upevněna téměř všechna zařízení podvozku, jako motor, sběrač proudu z třetí kolejničky, torzní stabilizátor, sekundární vypružení, brzdová výzbroj atd. [2]

Rám je otevřený, tvaru H. Skládá se ze dvou rozvidlených podélníků a jednoho hlavního příčníku. Podélníky i příčníky jsou svařované z plechů a mají skříňový průřez. Horní a dolní pásnice je tloušťky 14 mm, stojiny jsou z plechu tloušťky 12 mm.



Obrázek 42 Rám podvozku

Při návrhu podvozku je velmi důležitá správná volba materiálu. Jelikož se jedná o svařenec, který je dynamicky namáhaný a má požadavek na dlouhodobou životnost, jsou na materiál kladeny vysoké nároky a to i za velmi nízkých teplot. V ČR se počítá s nejnižší teplotou -40 °C při které je materiál namáhan na únavu. Zvolený materiál musí zaručit, že při nízkých teplotách neklesne vrubová houževnatost KCU pod 27 J.cm^2 . V případě překročení této meze hrozí nebezpečí vzniku křehkého lomu, což je pro rám podvozku nepřijatelné.

Zvolil jsem materiál s označením podle EN S355J2G1W (1.8963). Tento materiál má mez kluzu $R_e = 355\text{ MPa}$ (platí pro plechy tloušťky 3 – 16 mm). Mez pevnosti $R_m = 490\text{--}680\text{ MPa}$. Chemické složení tohoto materiálu je udáváno normou EN 10025. [2]

Celková změřená hmotnost rámu podvozku je 1189 kg, což je zhruba o 300 kg méně, než bývá u rámu podvozků metra běžné.

4 Pevnostní výpočet úhlové páky pomocí pevnostní analýzy metodou konečných prvků

Úhlová páka je hlavní částí navrhnutého primárního vypružení. Je vyráběna odléváním. Obsahuje tři základní prvky: uložení nápravového ložiska, uložení silentbloku pro uchycení v rámu podvozku a upevnění mističky pro vinutou pružinu. Tyto tři hlavní prvky jsou propojeny trojúhelníkovým tělem úhlové páky.

4.1.1 Okrajové podmínky

Zatížení

Síly, kterými je úhlová páka zatěžována, jsou převzaty z výpočtu nápravy, neboť působí na základě akce a reakce a navíc je v nich zahrnuta i dynamika. Třetí uvažovanou silou je pak maximální brzdící síla, která je vypočtena ze vzorce

$$F_{Brzdná} = \frac{m_i * g * \mu}{2 * i} = \frac{49680 * 9,81 * 0,5}{2 * 2} = 60\,920\,N$$

kde: m_i hmotnost loženého vozu [kg]
 g gravitační zrychlení [N/kg]
 μ adheze mezi kolem a kolejnici [-]
 i počet náprav [-]

Hodnoty všech sil uvažovaných v pevnostní analýze jsou v následující tabulce:

Svislá síla	P_1	83 870 N
Vodorovná síla	H	20 955 N
Maximální brzdná síla	$F_{Brzdná}$	60 920 N

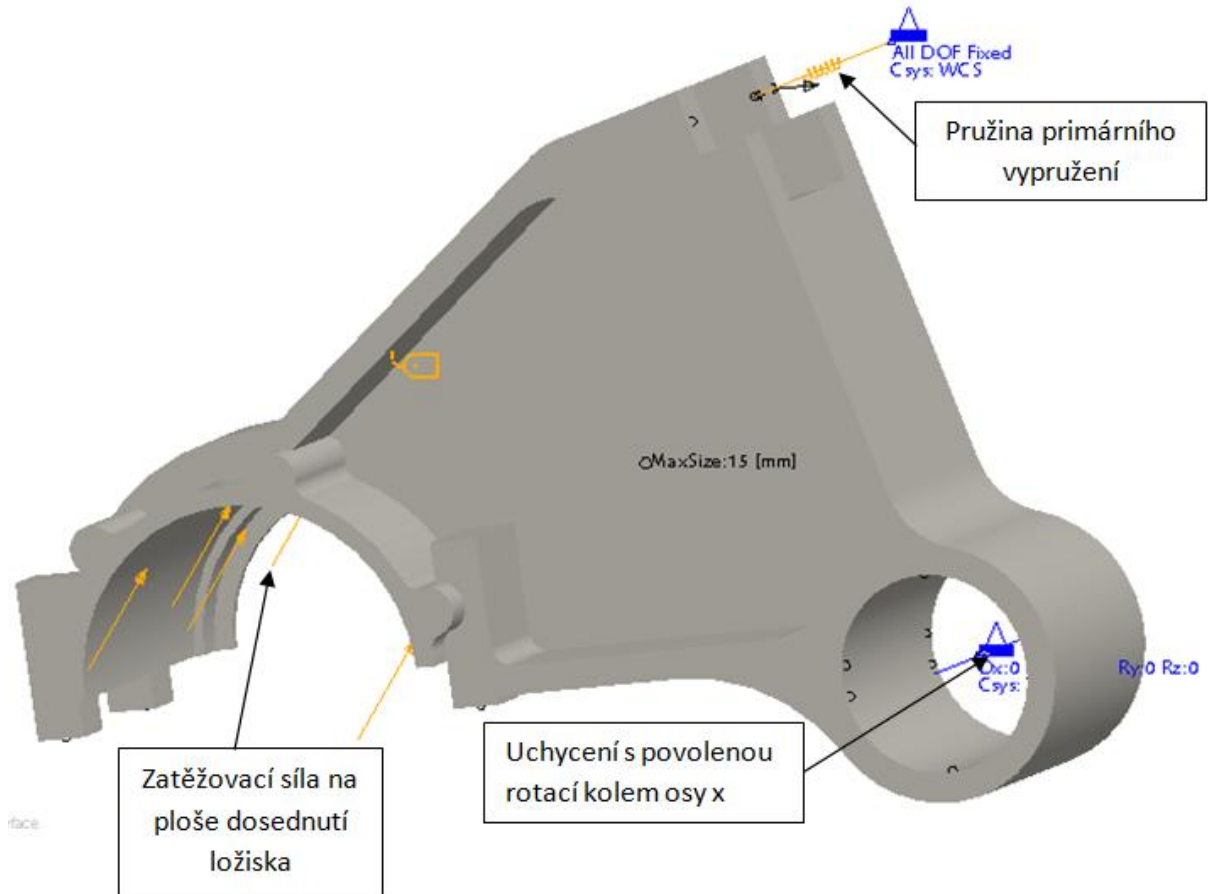
Tabulka 5 Síly zatěžující úhlovou páku

Materiál

Materiálem je ocel, stejná, jakou jsem použil na rám podvozku. Ocel s označením EN S355J2G1W má mez kluzu $Re = 355$ MPa, Poissonovu konstantu $\mu = 0,27$ [-] a Youngův model pružnosti v tahu $E = 210\,000$ MPa.

Uchycení

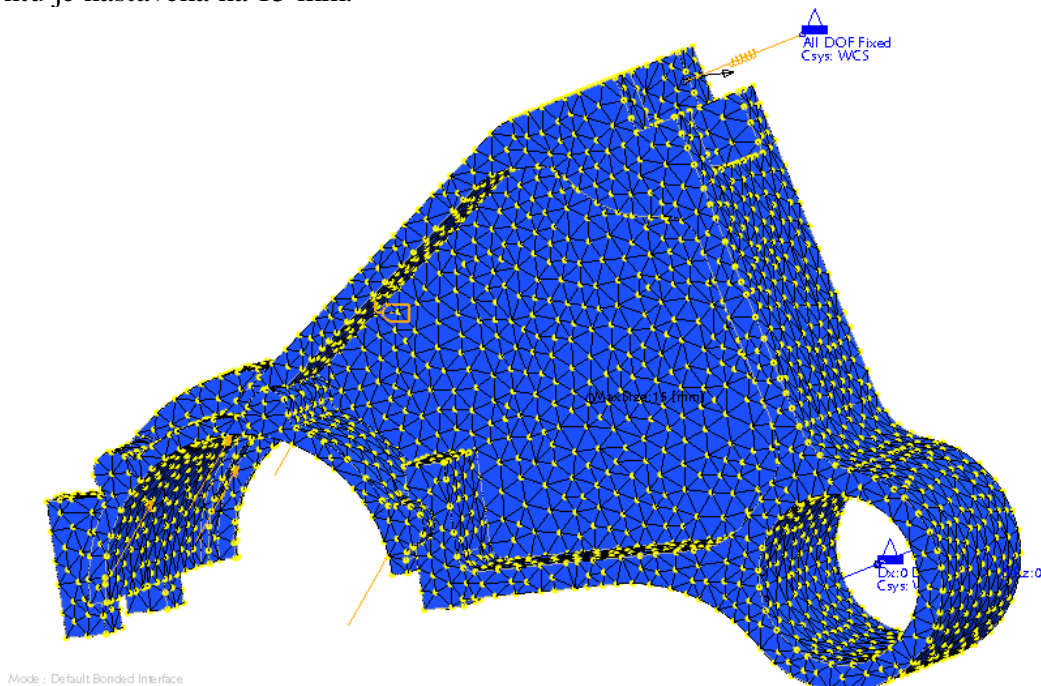
Uchycení v místě pryžového silentbloku je provedeno tak, že vnitřní plocha otvoru je přes rigidlink spojena s osou, na které je definovaný bod a tomu jsou odebrány všechny posuvy a rotace, kromě rotace kolem osy x. Tato vazba je definována pomocí pružiny, která simuluje vinutou pružinu primárního vypružení s vypočtenou tuhostí 1441 N/mm.



Obrázek 43 Okrajové podmínky

4.1.2 Konečnoprvkový model

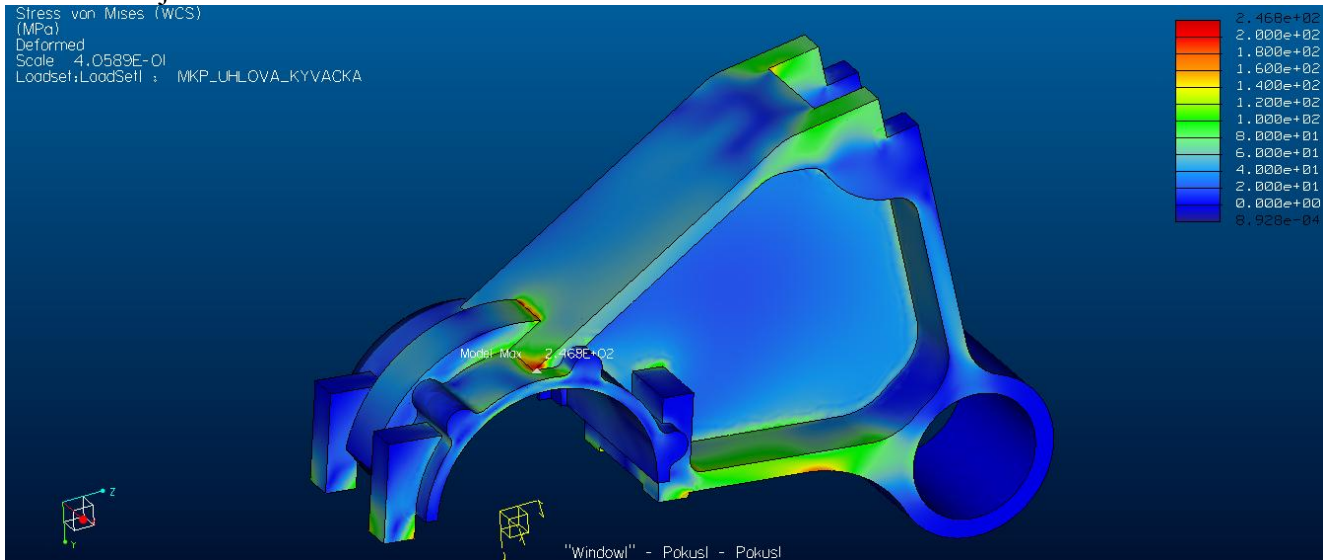
Konečnoprvkový model je tvořen z 23 488 solidových prvků (tetra). Maximální velikost elementu je nastavena na 15 mm.



Obrázek 44 Konečnoprvkový model úhlové páky

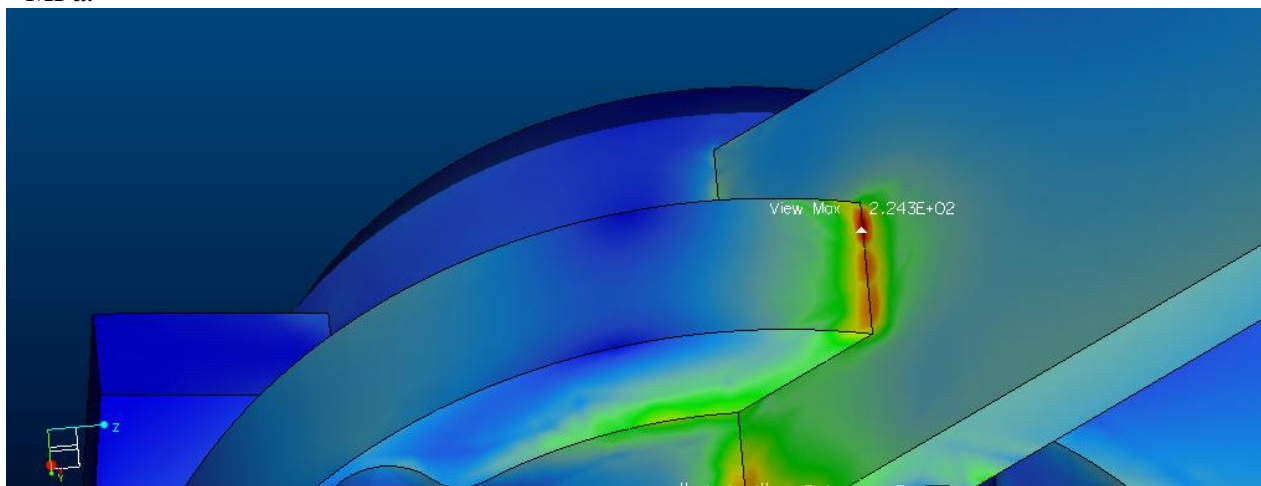
4.1.3 Výsledky

Na následujících obrázcích jsou výsledná rozložení napětí v tělese úhlové páky. Zobrazená napětí jsou počítána podle von Misesovy hypotézy a jsou zde také vyznačena místa s největším napětím. Maximální hodnota napětí je 246 MPa. Nachází se v místě přechodu ploché pásnice do objímky, kde je pro zjednodušení výpočtu zanedbán rádius a reálné napětí zde bude určitě nižší. Celá úhlová páka s rozložením napětí je vidět na následujícím obrázku 45.



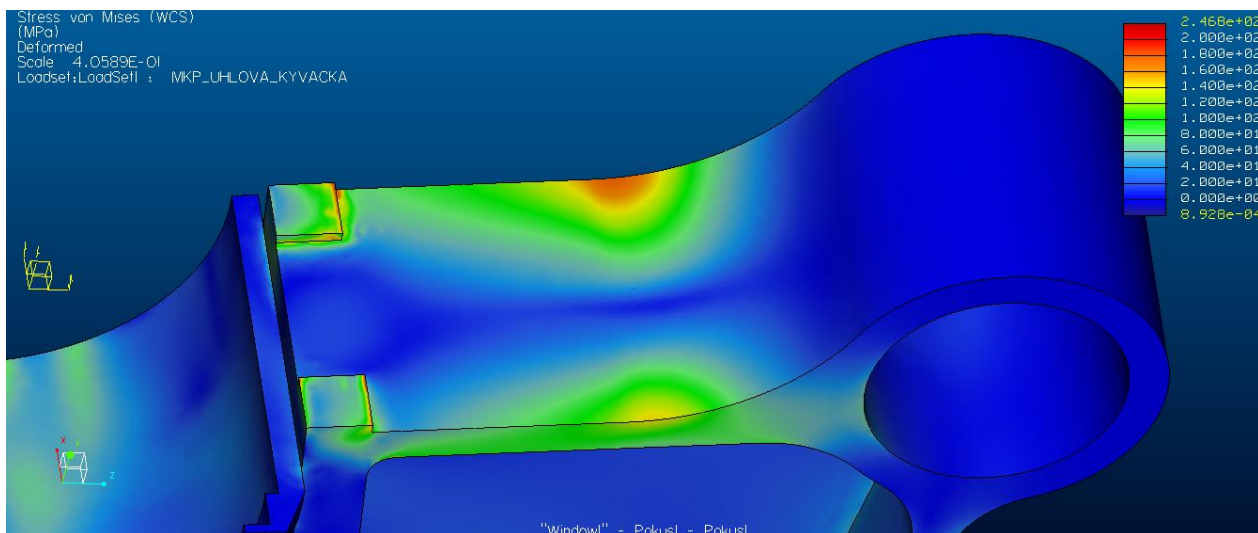
Obrázek 45 Rozložení napětí podle von Misesovy hypotézy v tělese úhlové páky

Další místo, kde vyskakuje špička napětí, která dosahuje hodnoty 224 MPa, je napojení zobrazené na následujícím obrázku 46. I zde bude ovšem na reálném tělese rádius a rozložení napětí bude taktéž rovnoměrnější, jak je patrné i z tohoto obrázku. Špičky napětí jsou v těsné blízkosti kolem hrany a o kousek dál už prudce klesají k hodnotě kolem 100 MPa.



Obrázek 46 Špička napětí o velikosti 224 MPa

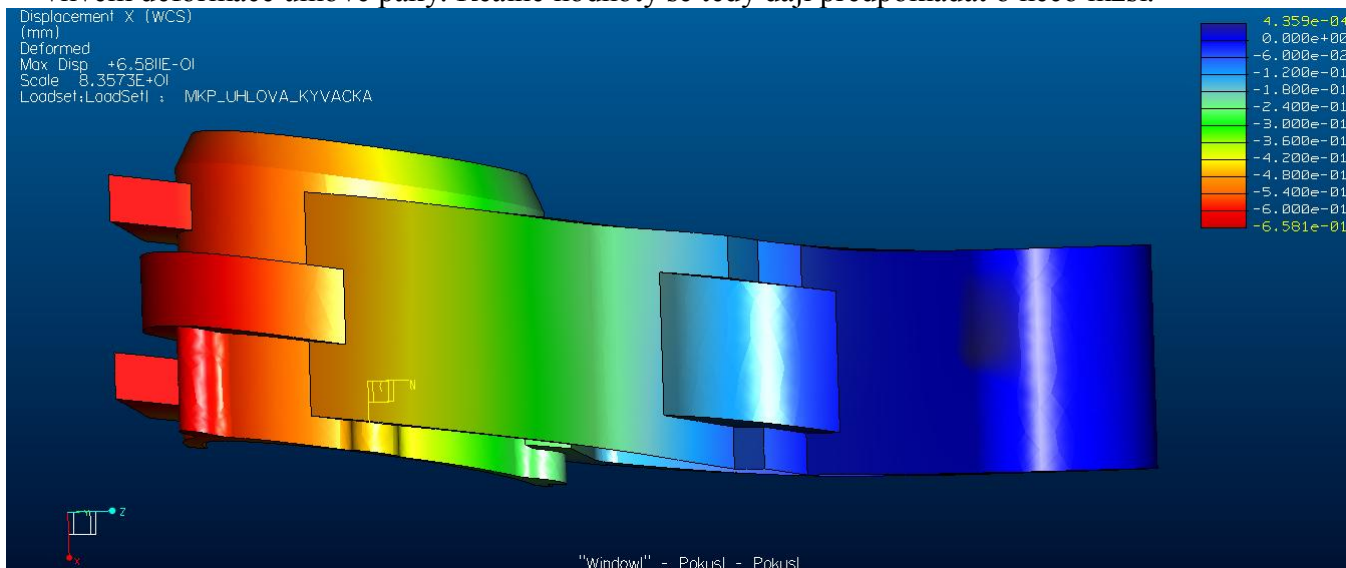
Na následujícím obrázku je detailní pohled zespodu úhlové páky. Je zde patrné vysoké napětí na obou bocích ploché pásnice. Nejvyšší vypočtená hodnota napětí je v tomto místě 178 MPa. Vzhledem k tomu, že zvolená ocel má mez kluzi 355 MPa, ani toto místo není problémové. Vypočtená bezpečnost je zde rovna 2.



Obrázek 47 Napětí na spodku úhlové páky, nejvyšší hodnota napětí 178 MPa

Z vypočtených hodnot lze usoudit, že úhlová páka vydrží i při nejnepříznivější kombinaci všech zatížení s bezpečností pohybující se kolem 2 v nejvíce zatěžovaných místech.

Posunutí v příčném směru jsou na obrázku 48. Měřítko zobrazené deformace je 10 % z velikosti modelu. Konec kývačky dosahuje maximálního posunutí přibližně 0,6 mm. Ovšem úloha neřeší uložení ložiska uvnitř objímky a na nápravě a tím zamezení větším posunutím vlivem deformace úhlové páky. Reálné hodnoty se tedy dají předpokládat o něco nižší.



Obrázek 48 Posunutí v příčném směru x

Posunutí v dalších dvou směrech a celkové posunutí je zkrácené vlivem deformace vinuté pružiny a tedy výsledné hodnoty nejsou vypovídající.

5 Závěr

V první části diplomové práce se pojednává o historii metra, o jeho vzniku ve světě a v naší republice. Dále je zde vysvětlen důvod, proč je ve velkých městech metro nenahraditelným článkem dopravy. Dále je zde rozsáhlá rešerše historických i moderních podvozků používaných na vozidlech metra. Prvně jsou popsány podvozky používané v pražském metru a poté jsou podvozky děleny podle jednotlivých výrobců.

V druhé části je popsán vlastní návrh podvozku pro metro, na který byl kladen požadavek na nestandardní primární vypružení a na snahu o nízkou hmotnost podvozku. Hmotnost byla ušetřena zejména na rámu podvozku, který váží pouhých 1189 kg. Primární vypružení je provedeno pomocí úhlové páky a vinuté pružiny s paralelně uloženým tlumičem kmitů, což je pro podvozky metra netradiční způsob vedení a vypružení dvojkolí. Sběrač proudu je umístěn na bok rámu podvozku a to z důvodu problematiky uložení sběrače na ložiskový domek. Sekundární vypružení je pneumatické, zejména kvůli požadavku na konstantní výšku podlahy vozu metra nad temenem kolejnice bez ohledu na velikost zatížení. Přenos podélných sil mezi skříní a podvozkem je řešen pomocí tažně tlačné tyče. Pohon je závěskový s motorem o výkonu 170 kW. Za motorem je zubová spojka, která spojuje výstupní hřídel motoru se vstupním hřídelem převodovky. Brzdy jsou zejména z důvodu nedostatku prostoru na nápravě kotoučové, s kotouči integrovanými do kol. Brzdové jednotky jsou uloženy na třech bodech v konzole, která je přivařena na vrchní pásnici hlavního příčnicku. Kola jsou odpružená a vyrábí je společnost Bonatrans.

Rám podvozku je otevřený tvaru H se dvěma rozvidlenými podélníkama a jedním hlavním příčnickem. Na rámu jsou uloženy téměř všechny komponenty podvozku.

V poslední části diplomové práce je proveden výpočet úhlové páky pomocí pevnostní analýzy metodou konečných prvků.

Seznam použité literatury

- [1] DOSTÁL, J., HELLER, P. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2007. ISBN 978-80-7043-960-9
- [2] HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla II*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7
- [3] HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla III*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011. ISBN 978-80-261-0028-7
- [4] LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004
- [5] Wikipedia. *Metro*. [Online] 1. 11. 2013. [Citace: 25. 11. 2013.] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Metro>.
- [6] Wikipedia. *Dějiny metra v Praze*. [Online] 25. 10. 2013. [Citace: 25. 11. 2013.] http://cs.wikipedia.org/wiki/D%C4%9Bjiny_metra_v_Praze
- [7] Wikipedia. *Metro v Praze*. [Online] 20. 11. 2013. [Citace: 25. 11. 2013.] http://cs.wikipedia.org/wiki/Metro_v_Praze
- [8] REJDAL, T. *Soupravy M1 na zkušebních tratích metra*. [Online] 18. 8. 2004. [Citace: 13. 4. 2014.] http://www.metroweb.cz/metro/zajimavosti/M1_ZT/M1_ZT.htm
- [9] Bonatrans. *Odpružená kola*. [Online] 1999 - 2014. [Citace: 5. 5. 2014.] <http://www.bonatrans.cz/cz/odpruzena-kola.html>
- [10] SKF. *Railway technical handbook – volume 1*. Sweden, 2011. ISBN 978-91-978966-3-4
- [11] ST-OS. *Tlumiče řady P80*. [Online] 1983 - 2014. [Citace: 14. 4. 2014.] <http://www.st-os.cz/cz/tlumice/>
- [12] DAKO-CZ. *Brzdová jednotka kotoučové brzdy*. [Online] 2013. [Citace: 10. 5. 2014.] <http://www.dako-cz.cz/files/technicke-listy/brzdova-jednotka-kotoucove-brzdy-kb.png.pdf>

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

A

B

C

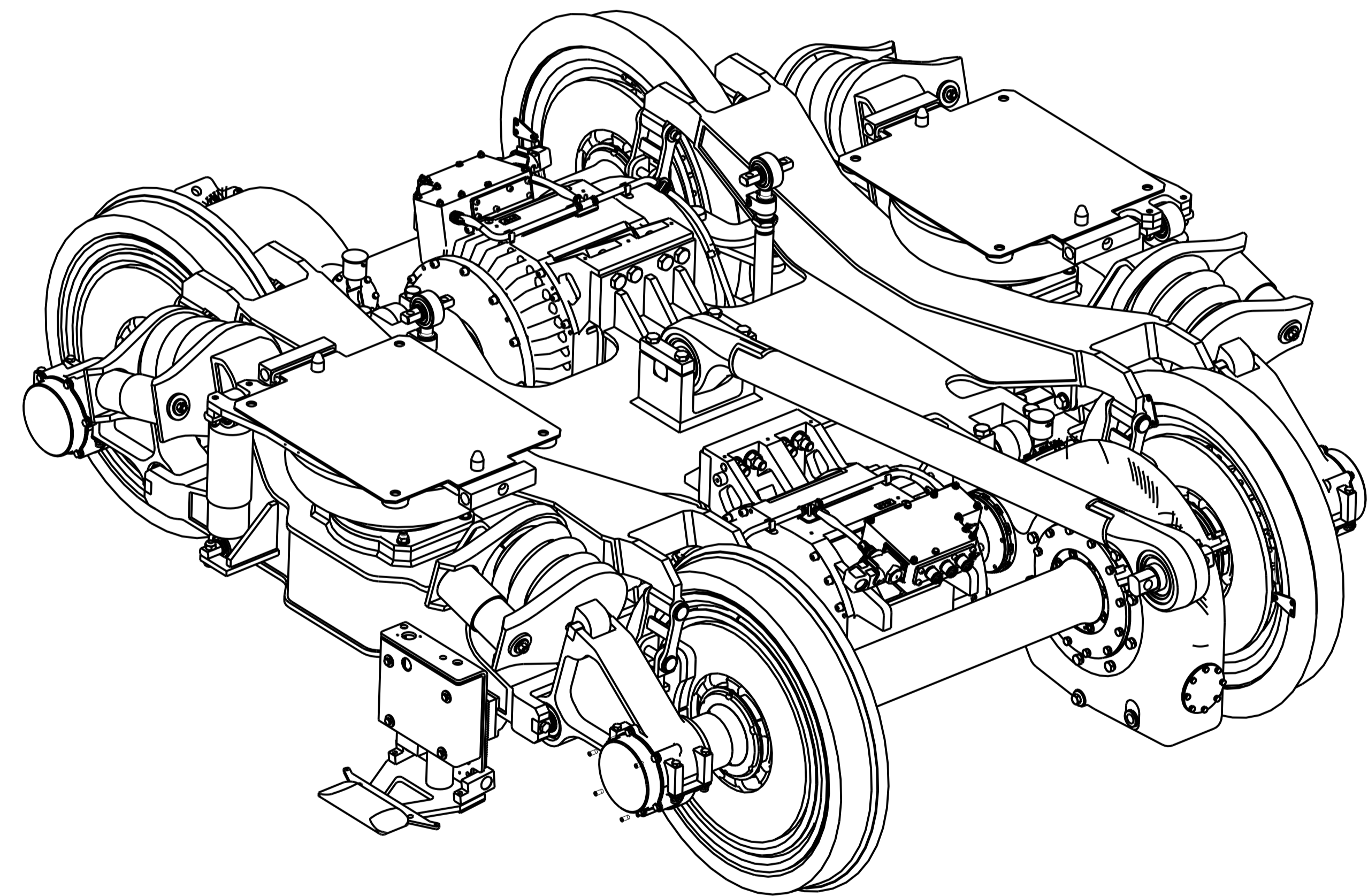
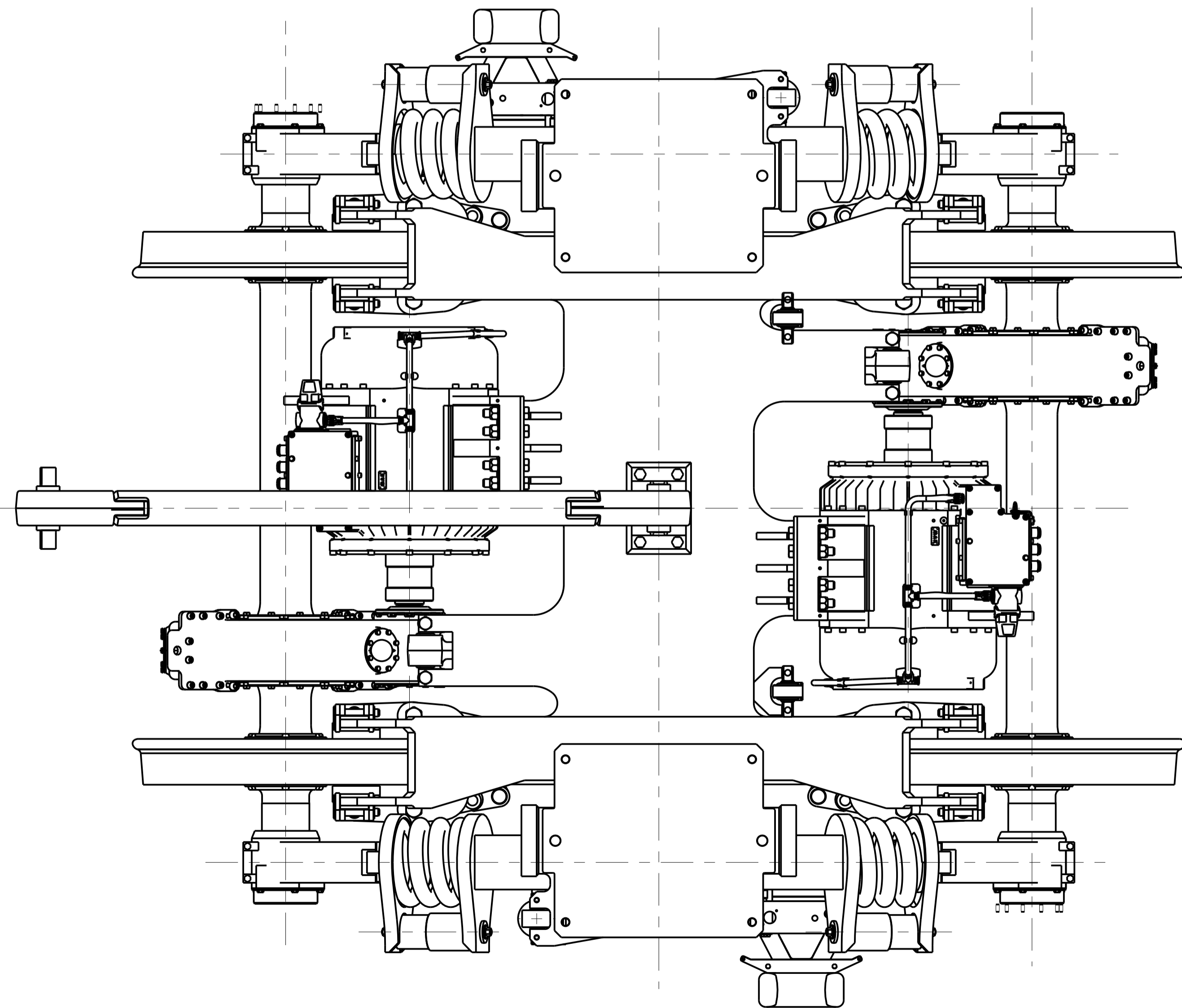
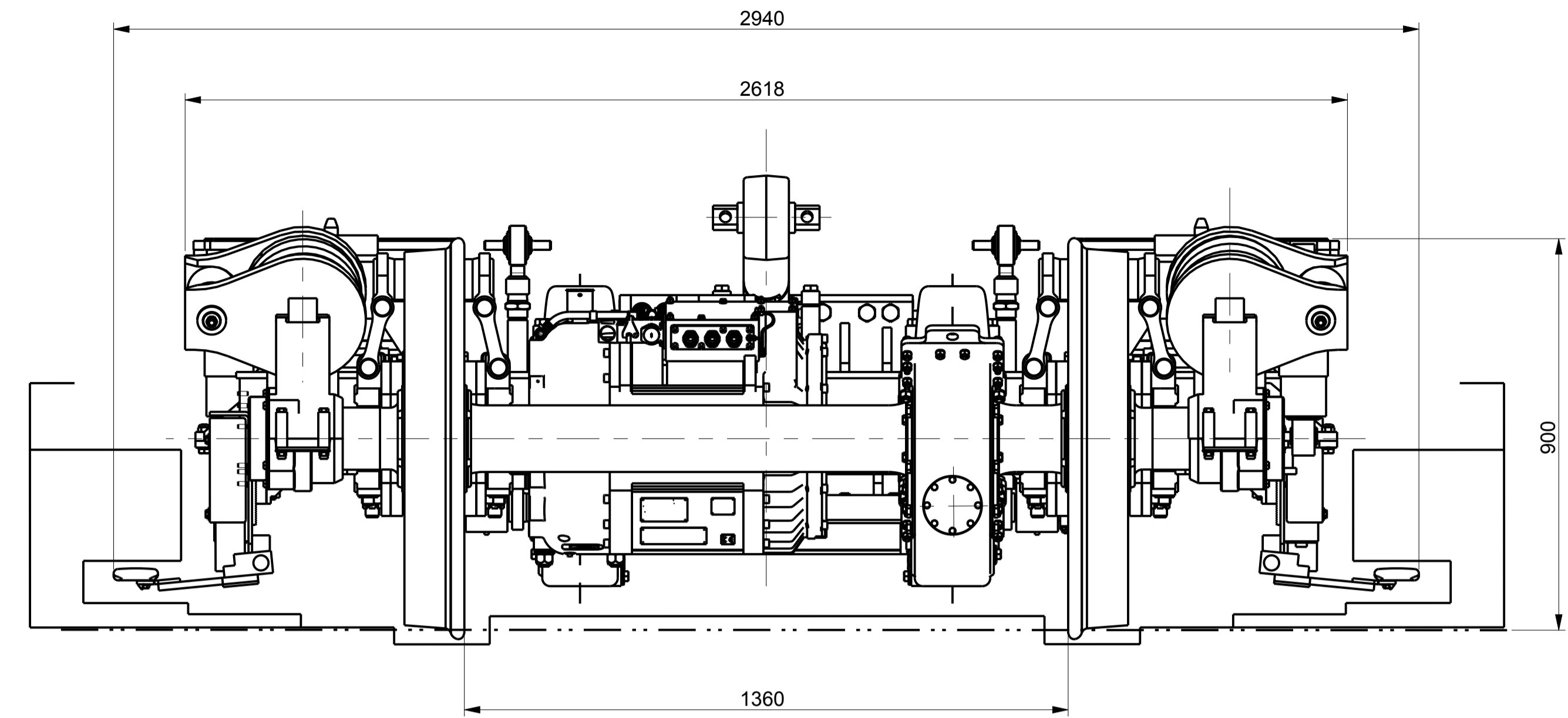
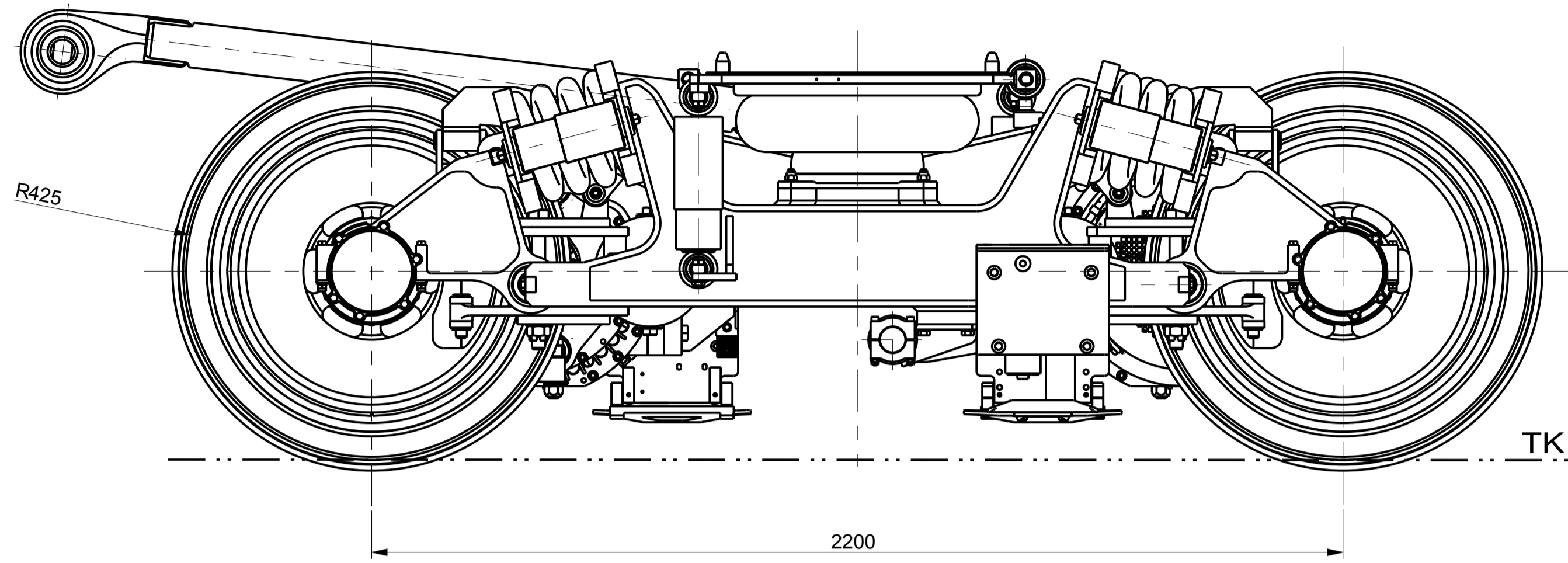
D

E

F

G

H



A

B

C

D

E

F

G

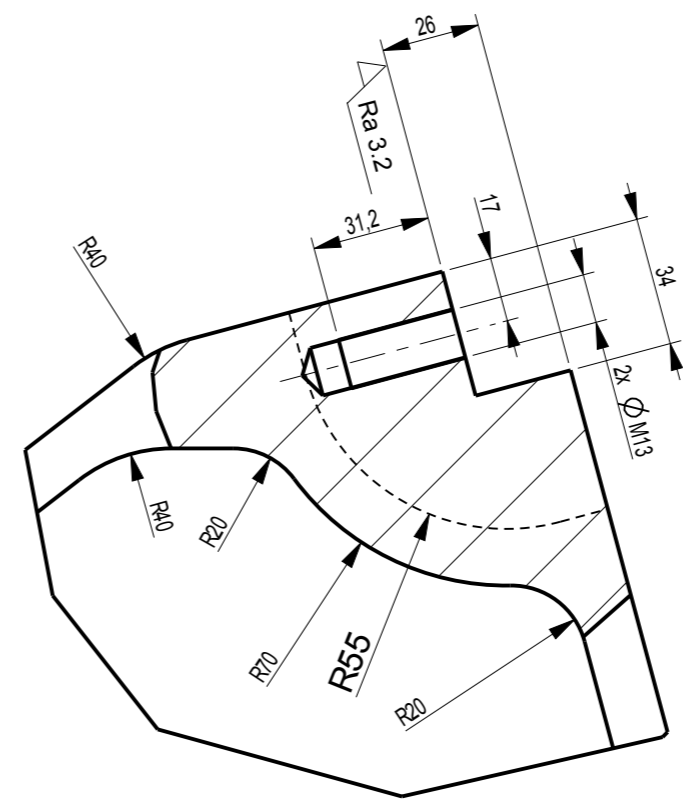
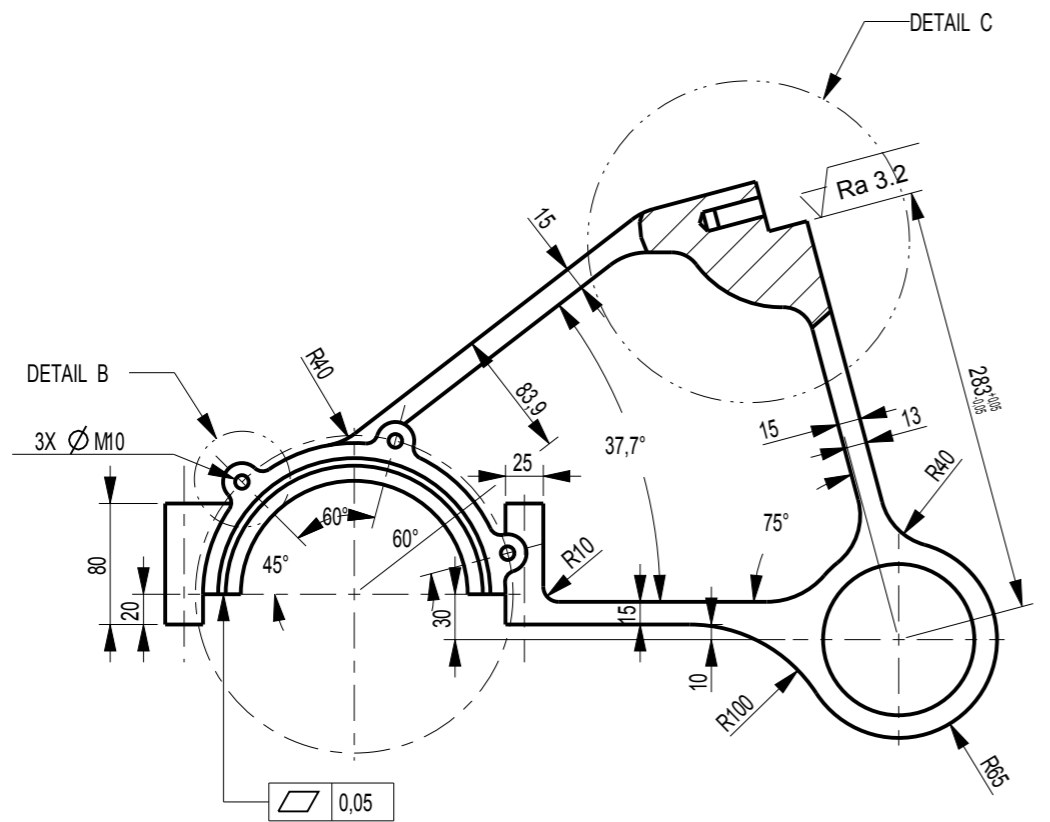
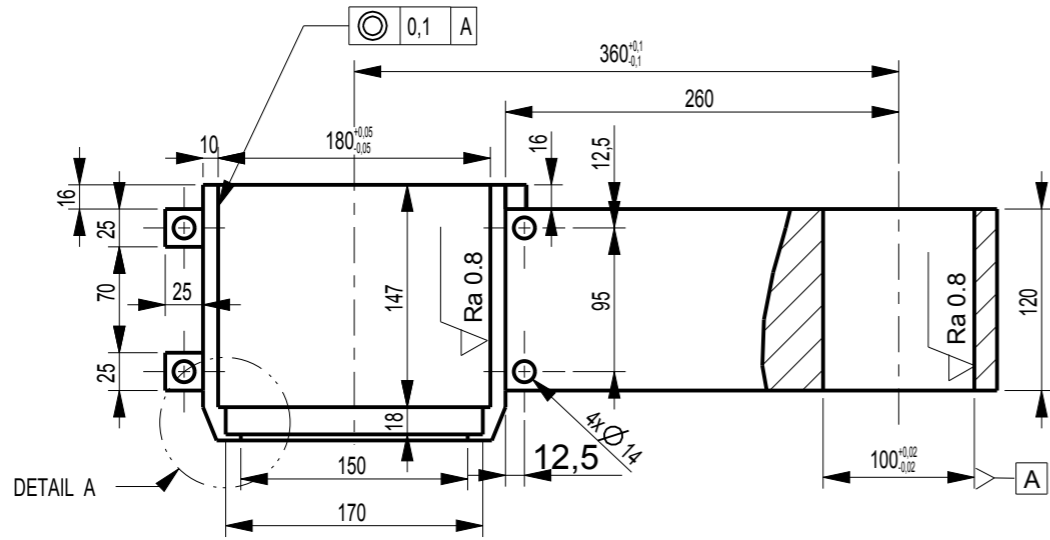
H

		d)		PROMITÁNÍ	Materiál	
		c)			Příloha	kg
		b)			Celková hmotnost	
		a)			ZCU v Plzni, fakulta strojní	
		Index	Podpis		katedra konstruování strojů	
Meritko	Změna	Datum	Index	Podpis	Název	
1:10	Poznámka				Trakční podvozek metra	
C. sestavy					Typ	
C. sestavy					C. li. výřezu	
Starší výřez					MV - DP - 2014	
Nový výřez				18-May-14		List 1 / 1

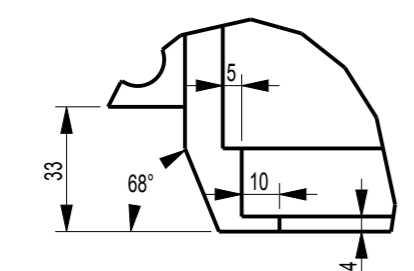
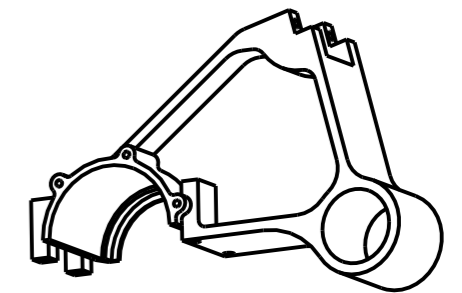
1 2 3 4 5 8 9 10 11 12

1 2 3 4 5 6

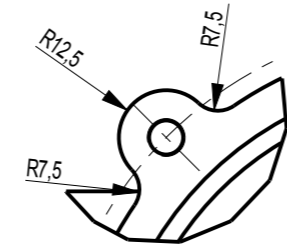
$\sqrt{Ra\ 3.2}$; $\sqrt{Ra\ 0.8}$



DETAIL C
Meritko 0,500



DETAIL A
SCALE 0,500



DETAIL B
SCALE 0,500

		d)		PROMÍTÁNÍ	Materiál	EN S355J2G1W
		c)			Polotovar	
		b)			C čistá hmotnost	32.5 kg
		a)			ZCU v Plzni, fakulta strojní katedra konstruování stroju	
Zmena	Datum	Index	Podpis	Název	UHLOVA PAKA	
Meritko	Poznámka	Navrhl		Typ	MV - DP - 14 V	
1:5		Kreslil	Bc. Martin VEJVODA	C is. výkresu		
C. seznamu		Prezkoušel				
		Technolog				
C. sestavy		Normalizace				
Starý výkres		Schválil				
Nový výkres		Datum	20-May-14		List 1 / 1	

1 2 3 4 5 6