

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Koncepční studie řešení článkové nákladní tramvaje**

**A conceptual design study of the articulated freight trams**

**2019**

**Autor: Zinovii FLONTS**

**Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Kolář, CSc**

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou prací na téma “Koncepční studie řešení článkové nákladní tramvaje” zpracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

Datum.....

Podpis.....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Flonts** Jméno: **Zinovii** Osobní číslo: **452797**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konceptní studie řešení článkové nákladní tramvaje**

Název bakalářské práce anglicky:

**A conceptual design study of the articulated freight tram**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

1. Rešerši používaných nákladních tramvají.
2. Stanovte hmotnostní bilanci vozidla a definujte mezní užitečnou hmotnost vozidla.
3. Analýzu zatížení podvozků a silových účinků na vypružení vozidla.
4. Koncept možných řešení článkových nákladních tramvají, zhodnoťte jejich výhody a nevýhody.
5. Návrh vhodného uspořádání pojezdu, stanovte požadavky na zatížení podvozků.
6. Průvodní technickou zprávu a typový výkres nákladní článkové tramvaje.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.

Skripta ČVUT:

KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II,

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

MARUNA, Z., HOFFMANN, V., KOULA, J. KROUPOVÁ, Z.: Metodika konstruování kolejových vozidel - osobní a nákladní podvozky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

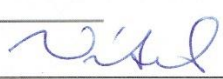
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
doc. Ing. Josef Kolář, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

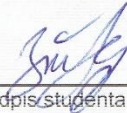
  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**18.04. 2019**  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc., za věnovaný čas a připomínky.

Jméno autora: Zinovii FLONTS  
Název BP: Koncepční studie řešení článkové nákladní tramvaje  
Anglický název: A conceptual design study of the articulated freight trams  
Rok: 2019  
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojího inženýrství  
Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Ústav: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel  
Vedoucí BP: doc. Ing. Josef Kolář, CSc  
Bibliografické údaje:  
Počet stran 52  
Počet obrázků 30  
Počet tabulek 21  
Počet příloh 1  
Klíčová slova: Nákladní tramvaj, článková tramvaj  
Keywords: Freight tram, articulated tram

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je studie stávajících řešení nákladních tramvají. V další části je analýza hlavních charakteristik nákladní tramvaje a podvozků. Dále je proveden návrh možných koncepčních řešení článkových nákladních tramvají. V závěru je provedena výběr nejvhodnější varianty z těchto řešení.

## ABSTRACT

Bachelor thesis contains study of existing solutions for freight trams. Thesis furthermore consists an analysis of the main characteristics of freight trams and chassis. There is also a proposal for possible solution of the freight trams. In conclusion, the most suitable variant of these solutions is selected.

# Obsah

1. Předmluva.....	8
2. Úvod.....	9
3. Rešerše .....	12
3.1 CarGo Tram v Drážďanech. ....	12
3.2 Tramvaj T3 pro zimní posyp. ....	15
3.3 Tramvaj T3 pro mytí tratě.....	17
3.4 Mazací tramvaj. ....	18
3.5 Cargo Tram Curych. ....	19
3.6 Závěr rešerše. ....	20
4. Teoretická část.....	21
4.1 Vlastnosti 20 stopého kontejneru.....	21
4.2 Průjezdová charakteristika. ....	22
4.3 Stanovení hmotnostní bilanci vozidla, definice maximální užitečné hmotnosti.....	24
4.3.1 Odvození rovnice maximální užitečné hmotností.....	24
4.3.2 Hledání součinitele hmotností rámu.....	26
4.3.3 Stanovení maximální užitečné hmotnosti vozu.....	29
4.4 Stanovení hmotnosti kabiny a úprava vztahu. ....	30
4.5 Stanovení tažné síly nápravy - dvojkolí.....	32
4.6 Analýza zatížení podvozků a silových účinků na vypružení vozidla. ....	33
5. Koncept možných řešení článkových nákladních tramvají.....	34
5.1 Koncepce 1. ....	34
5.2 Koncepce 2. ....	37
5.3 Koncepce 3. ....	39
5.4 Koncepce 4. ....	41
5.5 Koncepce 5. ....	43
5.6 Koncepce 6. ....	45
5.7 Stanovení nejvhodnějšího konceptu. ....	46
6. Závěr.....	49
7. Použitá literatura. ....	50
8. Seznam obrázků. ....	51

# 1. Předmluva

Tato bakalářská práce je psaná se záměrem hledání nejvhodnější koncepce článkové nákladní tramvaje. Článková tramvaj je alternativou nákladní tramvaje klasické konstrukce.

Bakalářskou práci lze rozdělit na dvě hlavní části. V první části je provedena analýza stávajících řešení nákladních tramvajů. Poté jsem určil hodnoty a vztahy, které potřebuji pro stanovení parametrů koncepce tramvajové soupravy. Ve druhé části BP je provedena analýza možných koncepcí souprav, jsou definovány jejich hlavní parametry a jsou zhodnoceny jejich výhody a nevýhody. Následně jsem vybral nejvhodnější variantu tramvajové soupravy.

Při návrhu koncepce vycházím z existujících osobních tramvajů a jejich modifikací. Všechny koncepce navrhuji tak, aby byly schopny převážet čtyři standardizované 20stopé ISO kontejnery. Z dostupných informačních zdrojů, jako například technická dokumentace stávajících provozovaných vozidel, provedu počáteční analýzu navržených variant. Ve druhé části BP bude vybraná varianta posouzena více do hloubky. Nejdříve se navrhnu rozměrové parametry, poté se navrhne poloha umístění kontejneru na vozidlo s ohledem na zatížení podvozků. Dále je ze známých parametrů proveden konstrukční návrh nákladní tramvajové soupravy.

V úvodu chci jenom podotknout, že občas nemám k dispozici dostatečná vstupní technická data a úplné charakteristiky tramvaje. V takových případech se budou používat aproximace s využitím interpolaci nebo kvalifikovaný odhad. Výpočty provedené na základě těchto údajů lze jednoduše upravit v případě dodání přesných dat. Předpokládám však, že tyto předpoklady a odhady nebudou mít značný vliv na obsah a výsledky této bakalářské práce.



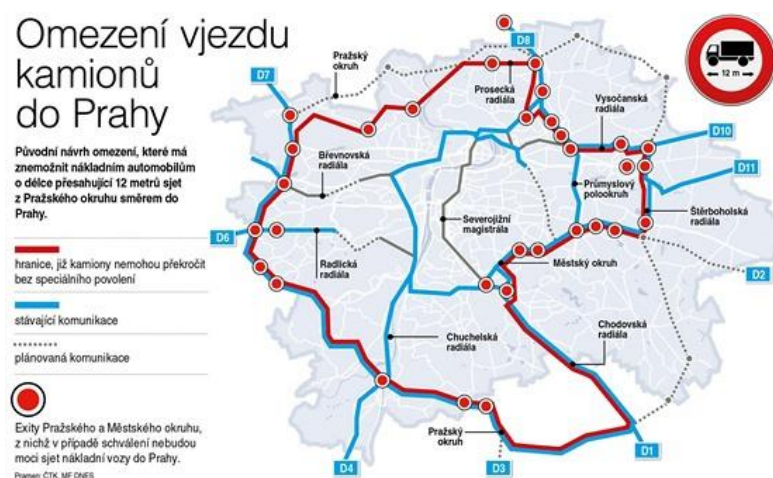
## 2. Úvod

V moderním světě zaujímá důležité místo logistika. Spotřeba zboží neustále roste, a proto roste potřeba jejich dodávky. Na druhou stranu velká města často trpí dopravními zácpami. Velká města se stále více uchylují k omezení automobilové dopravy, aby tento problém vyřešili. To platí zejména pro nákladní automobily. K dnešnímu dni není neobvyklé, že kamiony nemohou jezdit do centra měst vůbec, nebo mohou vstoupit pouze v noci. Velmi často je vjezd velkých nákladních vozů do center moderních měst zcela zakázán.



Obrázek 1. Dopravní zácpa na vjezdu do města.

Magistrát hl. m. Prahy před několika lety vystoupil s iniciativou zavést zákaz vjezdu do Prahy nákladních automobilů, jejichž délka přesahuje 12 metrů.



Obrázek 2. Schéma návrhu omezení vjezdu kamionu do Prahy.

Toto rozhodnutí má zlepšit situaci na silnicích města, a snížit množství emisí  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  do atmosféry ve městě. Naštěstí bylo přijato mnoho stížností. Taková iniciativa dosud nenašla podporu, ale situace se může změnit [1].

V souvislosti s tímto stavem může být nákladní tramvaj vhodným řešením. Existuje pro to několik důvodů. Hlavní věc, samozřejmě, je omezení automobilové emisní dopravy ve městech. Toto řešení také zřetelně sníží emise škodlivých látek do atmosféry od práce spalovacích motorů nákladních vozidel. I když v konkrétním městě není zakázána přeprava nákladních automobilů, používání tramvajového vozu může výrazně snížit v hodinách dopravní špičky zatížení městských silnic.

Velké supermarkety a nákupní centra mají obrovský obrat. Dodávky zboží musí být prováděny pravidelně. Pro pohodlí lidí, by bylo vhodné rozmísťovat nákupní centra a supermarkety blíže k obytným oblastem a centru města, kam však mají kamiony omezeny vjezd. Nákladní tramvaj by se mohla s tímto úkolem vyrovnat a dodat zboží do center velkých měst. Tramvaj se může pohybovat v noci, když je mnohem méně osobních tramvajů, nebo může zavážet zboží během dne podle harmonogramu v mezerách mezi osobními tramvajemi. Pro tyto účely, však bude nutné vybudovat odbočky z tramvajové tratě přímo do skladů velkých obchodů. Tuto krátkou trať nemusíte vybavit trolejí, nákladní tramvaj může být vybavena baterií s větší kapacitou, která umožní dojezd do místa vykládky a zpět do tramvajové sítě. Samozřejmě, že tato cesta bude projeta s nižší rychlostí. Možná, že pro pohodlnější a intenzivnější využití nákladní tramvaje ve městě bude nutné na některých místech postavit další tramvajové tratě nebo odbočné koleje, aby nákladní tramvaj neomezovala rychlejší osobní tramvaje. Tyto cesty lze použít pro vykládku nebo nakládku. Takové vedlejší tratě budou také potřebné v případě poruchy nákladní tramvaje, kam mohou být přesunuty, aby nevytvářely dopravní zácpu. Porucha nákladní tramvaje může být velkým problémem, protože nákladní tramvaj, ve svém naloženém stavu, nemůžeme nikde vyložit. Jako to může udělat u osobní tramvaje, kde necháme cestující vystoupit. Velkou otázkou je také to, jak odtáhnout nákladní tramvaj v případě poruchy. Konec konců, jak bude ukázáno v bakalářské práci, celková hmotnost naloženého tramvajového vlaku může být téměř desetkrát vyšší než hmotnost jednoho prázdného vozu tramvaje T3.

V této bakalářské práci bude provedena analýza toho, jakým může být koncipováno nákladní tramvajové vozidlo. Nejvhodnější koncepce je kontejnerová tramvaj. S tím budu pracovat dále. Kontejnery jsou široce distribuovány a standardizovány. Mohou být relativně rychle naloženy a vyloženy z tramvaje. V kontejneru lze přepravovat všechny druhy zboží. V práci budou zvažovány koncepty, které mohou nést 4 standardní 20stopové ISO kontejnery.

Výhoda výběru přepravy standardizovaných kontejnerů je zřejmá. Kontejnery mají standardní rozměry a hmotnost, jsou přepravovány kamiony, vlaky a loděmi. Problémy spojené s překládáním jsou tak minimalizovány. Kontejner lze velmi rychle přeložit. Například když nakládání zboží probíhá pomocí palet může to trvat několikrát déle.

Chtěl bych poznamenat, že v silniční nákladní dopravě existují konstrukce umožňující samonakládači a samo vykládací operace se standardním kontejnerem, bez účasti nakladače nebo jeřábu. Například sidelifter [2].



*Obrázek 3. Nakládací mechanismus sidelifter G&S Transport trailer během provozu.*

Doba nakládání nebo vykládání může trvat méně než 10 minut. Při použití takové mechanizace může proces nakládání probíhat kdekoli podél cest. S minimální ztrátou času. Za předpokladu, že budou udělány zvláštní odbočky „zastávky“ pro umístění kontejnerů podél tramvajových kolejí, je možné dodávat kontejnery na velké množství míst. Krátká doba potřebná pro nakládání/ vyložení umožňuje pracovat i během dne, s použitím intervalů mezi pohybem osobních tramvají.

Otázkou zůstává, zda lze nakládací mechanismus sidelifter G&S Transport trailer, viz obr. 3 použít v konstrukci nákladní tramvaje, jaká je jeho hmotnost a jak by snížil užitnou hmotnost.

První, hlavní překážkou, se kterou je třeba počítat je omezení zátěže na nápravu 10 tun. Z důvodu návrhu nákladní tramvaje musí být tento návrh proveden s ohledem na minimalizace provozních nákladů [3]. To je v rozporu s tím, že článková souprava je často komplexnější než tramvaj klasické konstrukce.

### 3. Rešerše

Dnes lze málo kde vidět nákladní tramvaj. Tento typ nákladní dopravy zatím nezískal značnou popularitu.

To má několik důvodů:

- za prve, nákladní tramvaje nemohou jezdit kdekoliv, protože vyžadují tramvajovou infrastrukturu.
- z toho důvodu že nákladní tramvaj využívá infrastrukturu MHD, nemůže zastavit kdekoliv na vyložení nebo naložení nakladu. A čas zastávky je omezen.

V minulosti byly nákladní tramvaje i populární. Na počátku 20. století, s příchodem elektrické trakce, často byly tramvaje používány pro nákladní dopravu. Byly vybudovány speciální tratě tramvajů určené pouze pro nákladní dopravu.

Takový tramvajový systém, byl vybudován ve městě Kislovodsk (v Rusku), který byl otevřen v roce 1903 a byl uzavřen v roce 1966. Po celou dobu byl výhradně pro dopravu nákladů.

V Groningenu (Nizozemsko), před zavedením ústředního vytápění, existovala celá tramvajová síť, přes kterou přepravovaly speciální nákladní tramvaje uhlí do kotelen ve městě.

Významný nárůst počtu nákladních tramvajů nastal v průběhu první světové války, a to v důsledku velké mobilizace koní a kamionů v armádě bojujících států. Například v letech 1915-1921 byla většina nakladu (uhlí, dřevo, mouka atd.) v Moskvě, Petrohradě a dalších velkých městech Ruska přepravována ze železničních skladů do obchodů a skladů pomocí nákladních tramvajů. Na vrcholu popularity v 1920-1930, nákladní tramvaje ve městech severní Ameriky dokonce hrály roli katafalků (zvláštní přístupové silnice byly dělány k největším městským hřbitovům). V souvislosti se spádem významu tramvajové MHD koncem 30. let minulého století, nákladní tramvaj také ztratila svůj význam. [4]

V určitých případech, jak dokládají následující části rešerše bakalářské práce, však může nákladní tramvaj být velice vhodnou variantou i v současné době.

Například ve formě:

- servisní tramvaje, která provádí údržbu tramvajových tratí.
- nebo využití nákladních tramvajů v takových městech, kde je zákaz nebo omezení vjezdu kamionů.

#### 3.1 CarGo Tram v Drážďanech.

Představuje jeden z nejvíce úspěšných projektů nákladní tramvaje celosvětově. Tato tramvaj se využívá k přepravě automobilových dílů společnosti Volkswagen na její výrobní závod v Drážďanech.



Obrázek 4. CarGo Tram poblíž závodu Volkswagen v Drážďanech.

Závod se nachází téměř v centru města a použití nákladních automobilů (kamionů) není možné. Proto bylo rozhodnuto provádět zásobování továrny pomocí nákladní tramvaje. V roce 2000 tak byla podepsána dohoda mezi drážďanským dopravním podnikem DVB AG (Dresdner Verkehrsbetriebe AG) a Automobil-Manufaktur GmbH o zahájení projektu „CarGo Tram“. Tramvaj se pohybuje po trati MHD v Drážďanech a používá „okna“ v jízdním řádu veřejné dopravy pro přepravu. Minimální interval pohybu je 40 minut. Cesta městem je 4,2 km dlouhá, tramvaj je překoná za 18 minut. Plné naložení trvá 20 minut. Díly, dříve uložené na paletách, jsou do tramvaje naložena bočními posuvnými dveřmi (zasouvací dveře). Celkem byly postaveny 2 nákladní vozy CarGo Tram z nichž jedna zajišťuje pravidelný provoz a druhá slouží jako záloha [5].



Obrázek 5. CarGo Tram během nakládání.

CarGo Tram je pětičlanková dvacetinápravová tramvaj s otočnými trakčními podvozky. Je to obousměrný vůz s pohonem všech dvaceti naprav. Souprava se skládá z dvou řídicích vozů a ze třech vložených vozů, viz obr.6.



Obrázek 6. Uspořádání jednotky CarGo Tram

Níže uvedená tabulka obsahuje hlavní charakteristiky nákladní soupravy.

Tab. 1 Charakteristiky CarGo Tram

Rok výroby	2000
Vlastní hmotnost	90 t
Užitečná hmotnost	60 t
Výkon elektromotoru	20x45 kW = 900 kW
Rozchod kolejí	1 450 mm
Šířka vozů	2 200 mm
Rozvor podvozku	1 900 mm

Při maximálním zatížení je do prvního a posledního vozu naloženo 7,5 tun užitečné hmotností, do centrálních tří vozů jsou naloženo po 15 tun [6]. Tramvaj CarGo využívá modernizovaná podvozky z tramvaje T4 (ČKD). Skříň je nová a je vyrobena z hliníkových slitin [7].

Nyní spočítáme některé z hlavních charakteristik, s nimiž můžeme porovnávat nákladní tramvaje. Výpočet je pro usnadnění uveden v následující tabulce:

Tab. 2 Spočítané charakteristiky CarGo Tram

Celková hmotnost soupravy	150 t
Jmenovitá hmotnost na podvozek	11,25 t
Jmenovitá hmotnost na nápravu	7,5 t

Je důležité poznamenat, že získaná hodnota jmenovité hmotnosti na nápravu 7,5 tuny je mnohem nižší než maximální přípustná hodnota 10 tun, kterou mám v návrhu BP.

Taková tramvaj má užitečnou hmotnost odpovídající dvěma plně naloženým 20stopým kontejnerům. Teoreticky mohla CarGo Tram nést 5 dvacetistopých ISO kontejnerů, které by však nemohly být naplněny na maximální přípustnou hmotnost.

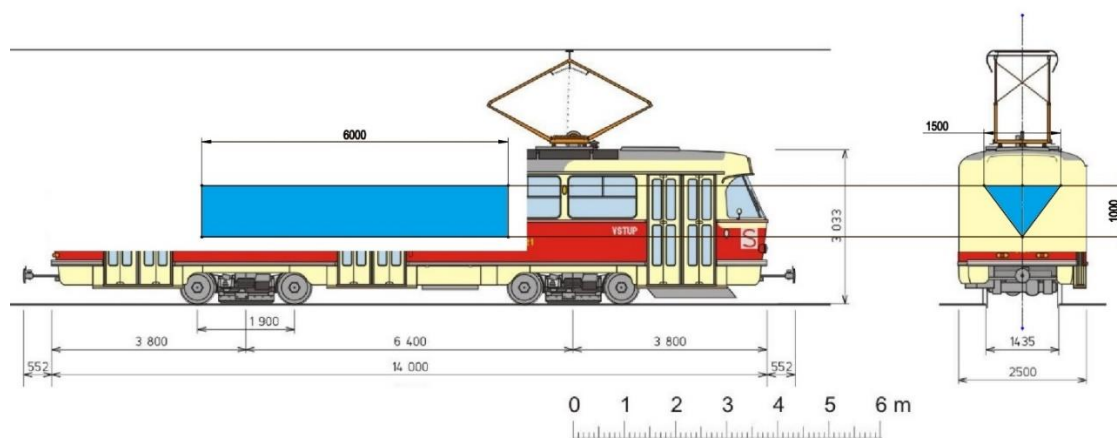
### 3.2 Tramvaj T3 pro zimní posyp.

Další nákladní tramvaj, která se v naší době úspěšně používá, je tramvaj pro zimní posyp v ulicích města. Takovou to tramvaj můžete najít v zemích bývalého Sovětského svazu i dnes, viz obr.7. Obrázek ukazuje tramvaj, která je založena na tramvaji T3 provozované ve městě Lvov. Osobně jsem viděl stejnou tramvaj v městě Charkov.



Obrázek 7. Tatra T3 přestavěná na nákladní tramvaj ve Lvově.

Zadní část kabiny je zcela odstraněna, na jejím místě je nádrž na písek ve tvaru trojúhelníkového hranolu. Rám vozu je vyztužen prostorovou strukturou, která slouží také jako podpora kontejneru. Kabina je před vozem ponechána beze změny, kolektor proudu je na stejném místě jako ve verzi pro cestující. Bohužel neexistují přesné údaje o tom, jakou maximální užitnou hmotnost může tato tramvaj převzít. V tomto případě je možné vypočítat přibližně objem a podle toho i hmotnost písku pomocí měřítka.



Obrázek 8. Umístění nákladového prostoru na tramvaji pro zimní posyp.

Objem trojúhelníkového hranolu se vypočítá podle vzorce:

$$V = \frac{1}{2} a \cdot b \cdot l = \frac{1}{2} 1,5 \cdot 1 \cdot 6 = 4,5 \text{ m}^3$$

Hustota písku střední vlhkosti skládá 1600 kg/m<sup>3</sup> [8]. Můžeme tedy vypočítat užitečnou hmotnost:

$$m_{už} = V \cdot \rho_p = 4,5 \cdot 1\,600 = 7\,200 \text{ kg}$$

Hmotnost užitečného nákladu bude přibližně 7 200 kg. Dále lze předpokládat, že při rekonstrukci tramvaje do verze nákladu nedosáhla změny vlastní hmotnosti tramvaje. Hmotnost materiálu, který rám posiluje, odpovídá hmotnosti odebraného materiálu. Hmotnost prázdné tramvaje T3 je 16 000 kg. [9]

Dostáváme tak celkovou hmotnost:

$$m_c = m_{už} + m_{pvT3} = 7\,200 + 16\,000 = 23\,200 \text{ kg}$$

Výsledná hodnota 23 200 kg je ještě menší než celková hmotnost tramvaje verze T3, která je 27 500 kg [9]. Jmenovitá hmotnost na nápravu je v tomto případě 5 800 kg. Vypočtené hodnoty jsou také uvedeny v tabulce.

Tab. 3 Spočítané charakteristiky Tramvaje T3 pro zimní posyp

Celková hmotnost	23,2 t
Jmenovitá hmotnost na podvozek	7,85 t
Jmenovitá hmotnost na nápravu	5,8 t



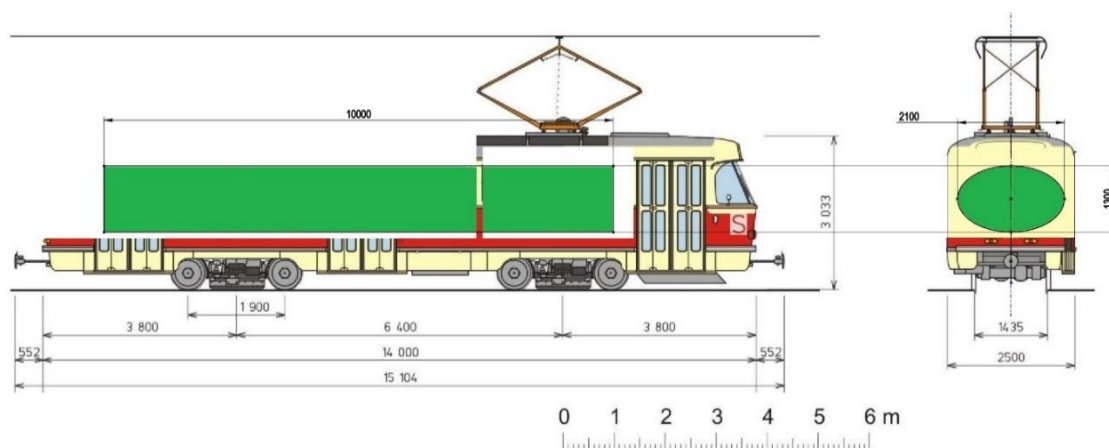
### 3.3 Tramvaj T3 pro mytí tratě.

Tato tramvaj je, stejně jako ta předchozí, rekonstruovaná verze tramvaje T3. V tomto případě se však tramvaj používá k mytí ulic [4].



Obrázek 9. Tramvaj T3 pro mytí tratě.

Na tramvaji je instalována vodní nádrž v podobě hranolu, na jehož základnu tvoří elipsa. Nádrž má délku skoro celé tramvaje, zbývá jen malý prostor pro kabinou. Bohužel nemám přesné údaje o této tramvaji. Také, stejně jako v předchozím případě, je možné přibližně odhadnout užitečnou hmotnost, kterou může tato tramvaj přepravovat.



Obrázek 10. Umístění nákladového prostoru na tramvaji pro mytí tratě.

Podle obr. 10 můžeme snadno vypočítat objem nádrže:

$$V = \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot l = \pi \cdot 1,05 \cdot 0,65 \cdot 10 \approx 21,44 \text{ m}^3$$

A hmotnost užitečného nákladu, s vědomím, že nádrž je určena k přepravě vody:

$$m_{už} = V \cdot \rho_v = 21,44 \cdot 1\,000 \approx 21\,400 \text{ kg}$$

Odhadovaná maximální užitná hmotnost je přibližně 21 400 kg. Při použití stejného předpokladu, že se nezměnila vlastní hmotnost tramvaje ve vztahu k vlastní hmotnosti osobní verze, dopočítám, že maximální hmotnost vozu je 37 400 kg.

$$m_c = m_{už} + m_{skř} = 21\,400 + 16\,000 = 37\,400 \text{ kg}$$

Zatížení na nápravu pak bude 9 350 kg. Zatím je to největší hodnota zatížení, kterou jsem v analýze získal. Získané hodnoty pro přehlednost zapíšu do tabulky.

Tab. 4 Spočítané charakteristiky Tramvaje T3 pro mytí tratě

Celková hmotnost	37,4 t
Jmenovitá hmotnost na podvozek	14,95 t
Jmenovitá hmotnost na nápravu	9,35 t

### 3.4 Mazací tramvaj.

Tato tramvaj je využívána v Praze pro údržbu tramvajové komunikace. Hlavně pro mazání kolejnice. Dlouhodobý problém tramvajového provozu je skřípání tramvajů projíždějících traťovými oblouky. Tento problém se týká především zvláštních vlastností odpruženého designu nových tramvajů Škoda 15T uvedených do provozu v roce 2011.



Obrázek 11. Mazací tramvaj.

Tato tramvaj má dlouhou historii, byla postavená v roce 1965 jako osobní tramvaj T3. Poté, co pracovala až 35 let, byla přeměněna na nákladní tramvaj. Postupně dostávala stále více nových funkcí pro údržbu komunikací. Tramvaj není určena pro přepravu velkých nákladů, jako v předchozích případech. Rám je mírně zesílen, aby bylo možné instalovat nádobu s technickými kapalinami. Tato tramvaj má několik zajímavých prvků, jako je měření kvality vzduchu [10].

### 3.5 Cargo Tram Curych.

Od 15. dubna 2003 v Curychu je tramvaj používána pro odvoz odpadků. Vozík na tramvajový vláček se skládá z tramvajového traktoru a dvou přívěsných vozů, na kterých jsou kontejnery instalovány. Obyvatelé jsou informováni předem, kde a kdy budou tramvaje čekat na jejich odpad. Tramvaj vytáhne „velké“ odpadky (stará kola, nábytek atd.). První den provozu vytáhla tramvaj 7,7 tun odpadků [11].



Obrázek 12. Cargo Tram Curych.

Do 18. prosince 2003 provozoval tramvajový vůz v experimentálním režimu. Experiment byl úspěšný. Vybírání odpadu tramvají se ukázalo být levnější než kamionem. Bylo rozhodnuto pokračovat v používání tramvaje na odvoz odpadků. Zpočátku tato tramvaj přivezla do depa kontejnery, odkud byly převezeny kamionem do recyklačního závodu.

Na jaře roku 2005 byla zprovozněna speciální tramvajová linka, po které tramvaj dopravuje svůj náklad přímo do továrny, čímž se eliminuje potřeba překládky. Od prosince 2006 začala fungovat druhá nákladní tramvaj v Curychu. Tato tramvaj, nazvaná E-Tram, se používá ke shromažďování a přepravě elektronických a elektrických spotřebičů [11].



Obrázek 13. Nakládání odpadem CarGo Tram Curych.

### 3.6 Závěr rešerše.

Jak vidíte, z pěti stávajících nákladních tramvají, tři jsou vyrobeny ze staré tramvaje T3, což není překvapující, protože se jedná o nejběžnější tramvaj na světě. Další tramvaj využívá modernizované řešení tramvaje T3. Lze konstatovat, že většina nákladních tramvají je vyráběna na základě českých tramvají nebo jejich součástí. Z provedené analýzy je zřejmé, že maximální přípustná hmotnost na nápravu se pohybuje mezi 5,8 tunami a až 9,35 tunami. Hmotnost na podvozek od 7,85 tun do 14,95 tun. Lze konstatovat, že daná hodnota 10 tun maximální hmotnosti na nápravu je nastavena poměrně optimisticky. A tuto hodnotu bude těžké dosáhnout.

## 4. Teoretická část.

### 4.1 Vlastnosti 20 stopého kontejneru.

ISO-Kontejner je standardní kontejner pro vícenásobné použití, který se využívá při dopravě zboží automobilovou, železniční, námořní a leteckou dopravou a je přizpůsoben k mechanické překládce z jednoho vozidla na druhé. Provedení se může lišit materiálem a tvarem. V oblasti dopravy se nejvíce používají tzv. univerzální kontejnery. Tyto kontejnery se často využívají i pro speciální zařízení anebo jako malé cisterny. Vnější rozměry a maximální nosnost kontejnerů ISO jsou stanoveny normou ISO 668. Jak bylo zmíněno výše, koncept nákladní tramvaje bude přizpůsoben k přepravě čtyř 20 stopových ISO kontejnerů. Vlastnosti tohoto kontejneru jsou uvedeny v tabulce níže.



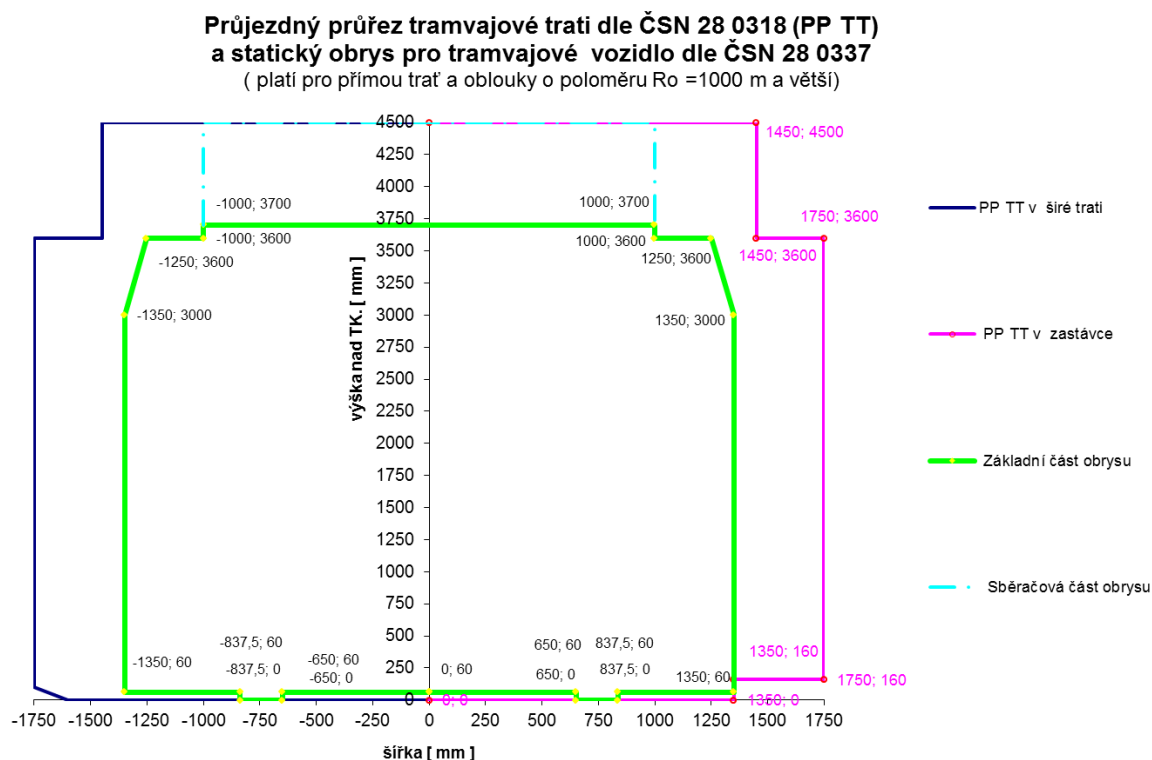
Obrázek 14. 20 stopy kontejner ISO 668.

Tab. 5 Vlastnosti 20 stopého kontejneru.

vnější rozměry	délka	6 096 mm
	šířka	2 438 mm
	výška	2 591 mm
vnitřní rozměry	délka	5 776 mm
	šířka	2 352 mm
	výška	2 385 mm
rozměry dveří	šířka	2 343 mm
	výška	2 280 mm
objem		33,1 m <sup>3</sup>
maximální hmotnost		30 400 kg
vlastní hmotnost		2 200 kg
ložnost		28 200 kg

## 4.2 Průjezdová charakteristika.

Během návrhu nákladní tramvaje je nutné počítat s již existujícími limity tramvajových souprav z hlediska výšky a šířky, tzn. že tato práce se bude řídit normou ČSN 28 0318.

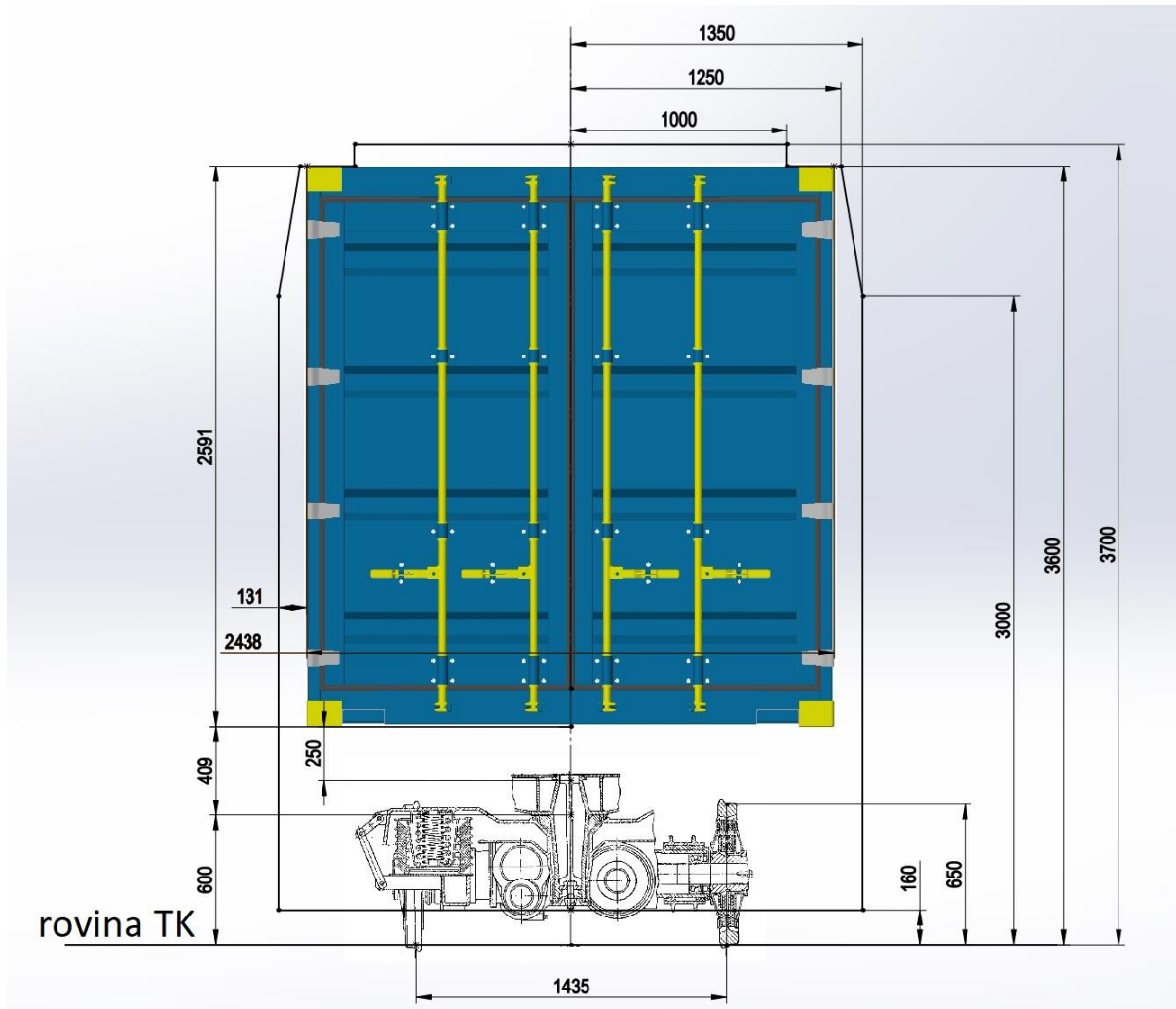


Obrázek 15. Průjezdový průřez tramvajové trati dle ČSN 28 0318.

Jelikož konstrukce hlavního rámu tramvaje a její výška ještě nejsou známy, umístil jsem kontejner pro začátek řešení úlohy BP co nejvýše. Tímto jsem získal maximálně přípustné rozměry rámu nákladní tramvaje, který bude převážet 20 stopové ISO kontejnery.

Pro přehlednost umístím standardní 20 stopý kontejner a výkres podvozku tramvaje T3 do povolených hranic. Obrázky všech prvků jsou v jednom měřítku, viz obr. 16.

Z obr. 16 vyplývá, že šířka 20 stopého kontejneru nepřekročuje limity. V horní části obrysu zůstává vůle 31 mm na každé straně, která se zvětšuje až do 131 mm v dolní části. Výška kontejneru také zapadá do omezení. Maximální přípustná vzdálenost mezi opěrným bodem rámu o podvozek a spodní hranou kontejneru je 409 mm. Tím pádem je nákladní tramvaj s maximální vzdáleností otočných čepů podvozků do cca 6,7 m (rozměr tramvaje T6A5) teoreticky realizovatelná a není v rozporu s předpisy na výšku a šířku. Při vytváření rámu bude nutné brát v úvahu omezení spojená s geometrií podvozku a jeho rotací během provozu, vyčníváním agregátů. Obrázek však ukazuje, že při vytváření rámu můžeme použít profily s minimální výškou až do 250 mm po celé šířce. Získaná hodnota maximální přípustné výšky rámu může být využita v dalších výpočtech.



Obrázek 16. Průjezdový průřez tramvajové trati a nákladního vozu.

Při navrhování rámu však musíte mít na paměti, že výška podvozku není ve skutečnosti statická a liší se v závislosti na zatížení. Například u osobní tramvaje T3 je rozdíl ve výšce opěrného bodu podvozku mezi prázdnou a plně naloženou tramvají 53 mm [12]. Je velmi pravděpodobné, že v konstrukci podvozku nákladní tramvaje bude moci být použito tužší vypružení s ještě menším zdvihem než u osobních tramvají. V tomto případě může mít kabina strojvedoucího své vlastní vypružení.

## 4.3 Stanovení hmotnostní bilanci vozidla, definice maximální užitečné hmotnosti.

### 4.3.1 Odvození rovnice maximální užitečné hmotností.

Projektování je vždy komplikovaný proces. Často vstupní data závisí na tom, jakým způsobem bylo konstrukční řešení provedeno. Tedy vstupní data často zaleží na výstupních datech, respektive požadovaných technických parametrech. Například při vytváření nosného hlavního rámu je třeba vzít v úvahu, že celkové zatížení závisí nejen na užitečné zátěži, ale také na hmotnosti samotného rámu. Zesílení rámu zároveň zvyšuje zatížení díky zvýšení hmotnosti konstrukce.

V této části bakalářské práce se zabývám analýzou zatížení podvozku, zatížení náprav a hmotnosti hlavního rámu vozu.

Za tímto účelem lze vytvořit rovnici, ve které popisují situaci naloženého vozu. Z obvyklých úvah nechávám nosnost rovnu celkové hmotnosti.

$$Nosnot = Hmotnost$$

Dále rozepíšu rovnici podrobněji:

$$n_n \cdot m_{jdov} = n_p \cdot m_p + m_r + m_{už}$$

kde:

$n_n$  – počet náprav

$m_{jdov}$  – dovolena jmenovitá hmotnost na nápravu

$n_p$  – počet podvozků

$m_p$  – hmotnost podvozku

$m_r$  – hmotnost rámu

$m_{už}$  – užitečná hmotnost

Předpokládá se, že budou používány výhradně dvounápravové podvozky. Pak se bude počet podvozků rovnat polovičnímu počtu náprav.

$$n_p = \frac{n_n}{2}$$

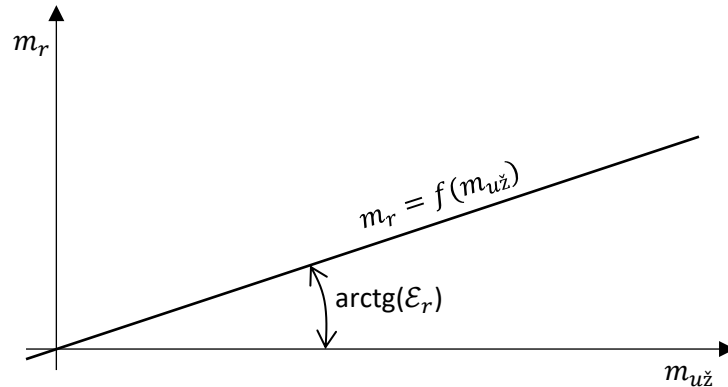
Je logické předpokládat, že hmotnost rámu potřebného pro přepravu nákladu závisí na hmotnosti nákladu. Tedy hmotnost rámu je funkcí užitečné hmotnosti.

$$m_r = f(m_{už})$$

Tato závislost ve skutečnosti závisí na mnohem větším počtu proměnných. Je třeba mít na paměti, že část nosnosti rámu je vynaložena na síly způsobené zrychleným pohybem vlaku, což zase závisí na celkové velikosti vlaku a zrychlení. To znamená že hlídaná závislost by měla zahrnovat hmotnost minimálně požadovaného rámu potřebného pro normální spojení podvozků a částí vozů mezi sebou.



V této bakalářské práci budu předpokládat nejjednodušší závislost hmotnosti rámu na hmotnosti užitečného zatížení – lineární.



Obrázek 17. Graf závislosti hmotnosti rámu na užitečné hmotnosti.

Použití takového jednoduchého zjednodušení je způsobeno skutečností, že nemám k dispozici více statistických údajů, pro podrobnější výzkum. Pro užitéčné zatížení 0 kg bude hmotnost rámu 0 kg viz obrázek 17. K tomu přidáme koeficient  $\varepsilon_r$ , který zobrazí tuto závislost.

$$m_r = \varepsilon_r \cdot m_{už}$$

Zjištěné výrazy dosadíme do počáteční rovnice:

$$n_n \cdot m_j = \frac{n_n}{2} \cdot m_p + \varepsilon_r \cdot m_{už} + m_{už}$$

Po úpravě dostanu rovnici pro stanovení maximální užitečné hmotnosti:

$$m_{už} = \frac{n_n \cdot (m_{jdov} - \frac{m_p}{2})}{\varepsilon_r + 1}$$

Tato rovnice nám určuje mezní hodnotu užitečného zatížení. Záleží na počtu náprav, jejich nosnosti, hmotnosti podvozku a součiniteli  $\varepsilon_r$ , poměru hmotnosti rámu k hmotnosti užitečného nákladu.

Počet náprav bude dán samotným konceptem nákladní tramvaje. Nosná kapacita každé nápravy je součástí zadání. Hmotnost podvozku  $m_p$  naleznou v technické dokumentaci. Jediné, co v této rovnici chybí pro stanovení mezního užitečného zatížení, je koeficient  $\varepsilon_r$ . Pro výpočet přibližné hodnoty tohoto součinitele budou použity skutečné technické parametry kontejnerových vozů.

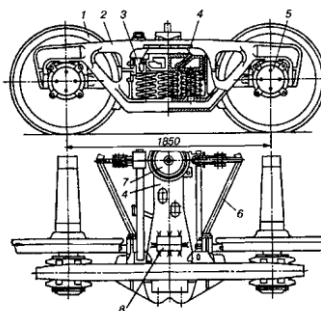
### 4.3.2 Hledání součinitele hmotností rámu.

#### Vůz 13-9004

První vůz, pomocí kterého se bude stanovovat hledaný součinitel, je vůz typu platforma modelu 13-9004. Vůz se skládá z nosného rámu a dvou otočných podvozků, model 18-100.



Obrázek 18. Vůz 13-9004.



Obrázek 19. Podvozek 18-100.

Platforma je určena k přepravě těžkých kontejnerů a zároveň i kolových vozidel: vysokozdvizné vozíky, nákladní automobily, různá stavební technika a kabiny. Platforma má čelní desky se sklopnými zarážkami [13].

Charakteristiky tohoto vozu a jeho podvozku jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 6 Vlastnosti vozu 13-9004 [13].

Vůz 13-9004	
Rozchod kolejí	1 520 mm
Užitečná hmotnost	68 t
Vlastní hmotnost	24 t
Maximální dovolené statické zatížení na nápravu	230 kN
Délka vozů	19 620 mm
Délka rámu	18 400 mm
Šířka rámu	2 780 mm
Výška podlahy nad rovinou TK	1 322 mm

Tab. 7 Vlastnosti podvozku 18-100 [14].

Podvozek 18-100	
Vlastní hmotnost	4 800 kg
Maximální dovolené statické zatížení na nápravu	230 kN
Rozvor podvozku	1 850 mm
Výška opěrné plochy ot. čepu nad rovinou TK	801 mm

Pomocí těchto údajů lze jednoduše vypočítat hledaný součinitel pro daný typ vozu. Hmotnost rámu vozu se určí odečtením hmotnosti obou podvozků z celkové hmotnosti vozu. Z toho plyne:

$$m_r = m_v - 2 \cdot m_p = 24 - 2 \cdot 4,8 = 14,4 \text{ t}$$

Z definice součinitele se určí:

$$\varepsilon_r = \frac{m_r}{m_{už}} = \frac{14,4}{68} \approx 0,21$$

### Vůz Sgnss

Jedná se o čtyřnápravový vůz pro přepravu kontejnerů. Daný typ vozu se používá výhradně k přepravě kontejnerů. Je zřejmé, že hmotnost rámu bude nižší než v předchozím případě. Zároveň ale je předchozí vůz univerzálnější.



Obrázek 20. Vůz Sgnss.

Tento vůz má dva podvozky Y25 Ls(s)d1. Jedná se o francouzský podvozek, který je standardem již od roku 1969 a jeho modifikace se používají do dnes.



Obrázek 21. Podvozek Y25 Ls(s)d1.

V tabulkách níže jsou uvedeny technické charakteristiky vozu a jeho podvozku.

Tab. 8 Vlastnosti vozu Sgnss 55 [15].

Vůz Sgnss 55	
Rozchod kolejí	1 435 mm
Užitečná hmotnost	70 t
Vlastní hmotnost	20 t
Maximální dovolené statické zatížení na nápravu	22,5 t
Délka vozů	19 640 mm
Délka rámu	18 400 mm
Šířka rámu	2 346 mm
Výška podlahy nad rovinou TK	1 155 mm

Tab. 9 Vlastnosti podvozku Y25 Ls(s)d1 [16].

Podvozek Y 25 Ls(s)d1	
Vlastní hmotnost	4 700 kg
Maximální dovolené statické zatížení na nápravu	22,5 t
Rozvor podvozku	1 800 mm
Výška opěrné plochy ot.čepu nad rovinou TK	906 mm

Obdobně jako v předchozím případě lze stanovit hledaný součinitel:

$$m_r = m_v - 2 \cdot m_p = 20 - 2 \cdot 4,7 = 10,6 \text{ t}$$

$$\varepsilon_r = \frac{m_r}{m_{už}} = \frac{10,6}{70} \approx 0,15$$

Tak byl získán součinitel  $\varepsilon_r$ , který pro specializované vozy pro přepravu kontejnerů je roven 0,15 a u univerzálnějších vozů je roven 0,21. V případě, že se navrhuje nákladní tramvajový vůz, který kromě užitečného nákladu poveze ještě i dodatečná zařízení, lze tento součinitel o trochu navýšit než u prvního vozu. V tomto případě se vezmu součinitel  $\varepsilon_r = 0,25$ .

### 4.3.3 Stanovení maximální užitečné hmotnosti vozu.

Při použití této hodnoty lze stanovit maximální hmotnost užitečného nákladu nákladní tramvaje. Pro další výpočty je nutné znát maximální zátěž na nápravu. Je dáno zadáním práce a je stanoveno na 10 tun. Dále je nutné znát hmotnost podvozku. Pro výpočty se vezme hmotnost podvozku tramvaje T3. Nejspíše navrhovaná tramvaj nebude používat podvozek z T3, ale hmotnost podvozku tramvaje se moc nemění v závislosti na typu tramvaje. Vyšší nosnost nových podvozků se vysvětluje využitím lepších konstrukčních řešení a nových materiálů. Hmotnost podvozku je  $m_p = 3750 \text{ kg}$  [17]. Tato hmotnost se využije v následujícím vztahu:

$$m_{už} = \frac{n_n \cdot (m_j - \frac{m_p}{2})}{\varepsilon_r + 1} = \frac{n_n \cdot (10 - \frac{3,75}{2})}{0,25 + 1} = 6,5n_n$$

Tato veličina závisí na počtu náprav nákladní tramvaje. Získanou veličinu lze interpretovat tak, že každá nová náprava tramvaje teoreticky navyšuje užitečnou hmotnost nákladu o 6,5 tun.

Tato bakalářská práce je založena na koncepci použití výhradně dvounápravových otočných podvozků. Tím pádem lze vyčíslit maximální hmotnost užitečného nákladu pro čtyřnápravový vůz se dvěma otočnými podvozky, která je rovna 26 tunám. Tato hodnota je menší než maximální přípustná hmotnost kontejneru. Proto, aby vůz byl schopen unést maximální 20 stopový kontejner o maximální jeho hmotnosti, která je rovna 30,4 tun, tak je zapotřebí 5 náprav. Ale návrh podobné konstrukce vyžaduje využití podvozků se třemi nápravami, ty však nejsou u tramvajových vozidel s ohledem na průjezd oblouky malých poloměrů používány.

Jenže ze zadání maximálního nápravového zatížení plyne, že je nutné se smířit s tím, že standardní ISO kontejnery nebudou plně hmotnostně vytíženy. Proto se budu dále v bakalářské práci věnovat problematice stanovení maximální přípustné hmotnosti kontejneru pro navrženou koncepci nákladní tramvajové soupravy.

## 4.4 Stanovení hmotnosti kabiny a úprava vztahu.

V předchozích kapitolách byla zadána hodnota maximálního nápravového zatížení 10 tun, byla stanovena závislost hmotnosti rámu na užitečné hmotnosti. Dalším důležitým bodem je stanovení hmotnosti kabiny. Do této hmotnosti se započítává hmotnost dodatečného vybavení, hmotnost pantografu, materiálu kabiny, sklo, sedadlo atd. O tramvaji T3 je známo dostatečné množství dostupných informací potřebných ke stanovení hmotnosti kabiny. Nejedná se o stanovení přesné hmotnosti, ale o její přibližnou hodnotu, která bude postačující pro následující analýzu koncepcí.

Celková hmotnost tramvaje T3 je 16 tun, hmotnost každého z podvozků je 3,75 tun. Hmotnost hlavního rámu lze odhadnout na 3 tony. Tento odhad provádím na základě 3D modelu tramvaje T3, který byl vytvořen v programu SolidWorks na základě technické dokumentace. Zároveň se použily vlastní náměry a fotografie z exkurze do dílny Dopravního Podniku hlavního města Prahy.



Obrázek 22. Měření rozměru nosníku rámu T3 během exkurze.



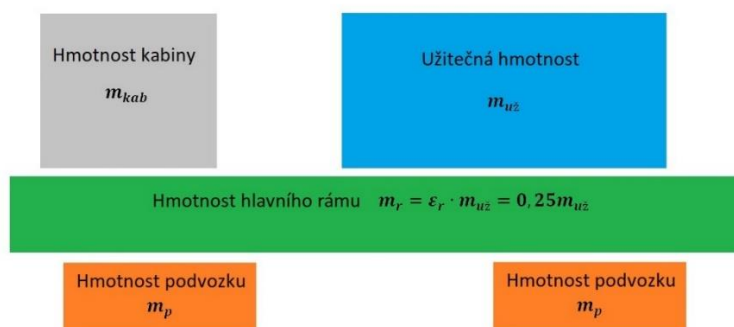
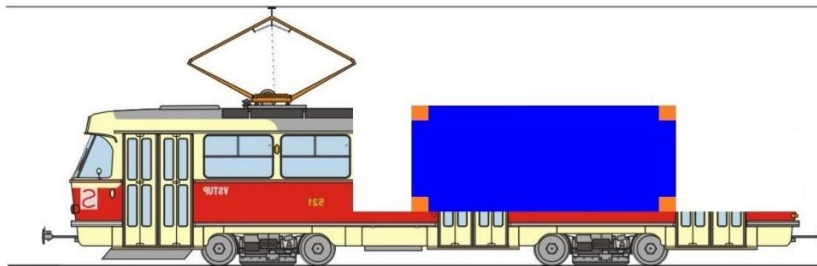
Obrázek 23. Ram tramvaje T3.

Pokud se z celkové hmotnosti tramvaje odečte hmotnost jeho podvozků a rámu, zůstane hmotnost vybavení a materiálů, včetně skla, zateplení (isolace) atd. Dále lze tvrdit, že pokud se tato hmotnost podělí dvěma, tak se získá odhadová hmotnost kabiny strojvedoucího včetně pomocných zařízení. Tento odhad lze provést na základě toho, že jednak největší část skříně představuje prostor pro cestující. Jenomže, z druhé strany, většina výzbroje musí zůstat za účelem normální funkce tramvaje. Tím pádem odhadová hmotnost kabiny tramvaje lze vyčíslit následujícím způsobem:

$$m_{kab} = \frac{m_{vl.T3} - 2 \cdot m_p - m_{rT3}}{2} = \frac{16000 - 2 \cdot 3750 - 3000}{2} = 2750 \text{ kg}$$

Tuto hodnotu budu nadále používat ve všech výpočtech jako hmotnost kabiny tramvaje. Z důvodu návrhu obousměrné soupravy ve všech koncepcích, budou tyto kabiny dvě, každá z jedné strany na čelech tramvajová soupravy.

Dle uvedených úvah lze rozdělit hmotnost vozu nebo soupravy na následující: užitečná hmotnost, hmotnost kabiny, hmotnost rámu, hmotnost podvozků. Pro lepší představu rozložení zatížení, které bude použito v této práci, byl vytvořen Obrázek 23, na kterém je znázorněna nákladní tramvaj o jednom vozu, s jednou kabinou a jedním kontejnerem. Dále, na Obrázku 23 je schematicky znázorněno rozložení zatížení.



Obrázek 24. Zjednodušené schéma rozdělení hmotnosti vozu.

Na základě toho, že odvozená rovnice pro stanovení maximální užitečné hmotnosti vozu nezapočítává hmotnost kabiny, je zapotřebí ji upravit. Do rovnice se přidá hmotnost kabiny  $m_{kab}$  vynásobená počtem kabin  $n_{kab}$ . Hmotnost rámu zůstane lineární funkcí, která závisí pouze na užitečné hmotnosti, která ale nezávisí na hmotnosti kabiny. Kabina má svoji vlastní hmotnost, ale zároveň i nosnou konstrukci.

Tímto jsem dostal zkorigovanou rovnici k výpočtu hmotnosti užitečného nákladu, která se bude používat při analýze koncepcí.

$$m_{už} = \frac{n_n \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1}$$

## 4.5 Stanovení tažné síly nápravy - dvojkolí.

Při analýze koncepcí se zároveň vypočte teoretické zrychlení soupravy při maximální a minimální hmotnosti. Hodnota zrychlení je velmi důležitý parametr, poněvadž nákladní tramvaj se bude pohybovat ve městě společně s osobními tramvaji a musí mít podobné rychlostní charakteristiky. Jinak by zpomalovala ostatní tramvaje na lince, nebo by bylo nutné vybudovat v určitých intervalech dodatečné úseky tratí, aby osobní tramvaje mohly nákladní předjet. Každopádně, čím vyšší je hodnota zrychlení a výkonu tramvaje, tím lépe.



Obdobně jako i v předchozích kapitolách se bude vycházet ze známých parametrů tramvaje T3, protože se budou používat stejné podvozky. Maximální zrychlení, kterého je schopna dosáhnout osobní tramvaj T3 bez cestujících je  $1,8 \text{ ms}^{-2}$  [18]. Hmotnost prázdné tramvaje T3 je 16 000 kg. Z této hodnot lze vyčíslit tažnou sílu na nápravách.

$$F_{\text{tažnáT3}} = m \cdot a = 16\,000 \cdot 1,8 = 28\,800 \text{ N}$$

Označíme tažnou sílu na každé ze čtyř náprav  $F_{tn}$ .

$$F_{tn} = \frac{F_{\text{tažnáT3}}}{n_{nT3}} = \frac{28\,800}{4} = 7\,200 \text{ N}$$

Tím pádem, maximální tažná síla, vyvinutá na nápravě prázdné tramvaje T3 s elektromotorem o výkonu 40 kW, činí 7,2 kN.

## 4.6 Analýza zatížení podvozků a silových účinků na vypružení vozidla.

Ze závěru v předchozí části plyne, že standardní kontejner (20 stop) nemůže být naložen úplně, a i přes použití klasické konstrukce vozu, tzn. čtyřnápravový vůz. Výpočet zátěže podvozků se bude provádět dle maximálně dovolené zátěže náprav. Hmotnost podvozku činí  $m_p = 3\,750 \text{ kg}$ . Maximální přípustná statické zatížení nápravy činí 10000 kg. Podvozek má dvě nápravy. Tím pádem lze vyčíslit maximální statické zatížení na podvozek a vypružení vozidla dle:

$$T_p = m_j \cdot 2 - m_p = 10\,000 \cdot 2 - 3\,750 = 16\,250 \text{ kg}$$

Tato hodnota je poměrně dost vysoká. Například u tramvaje T3 činí maximální přípustná zátěž 11 tun [17]. Jenže vypočtená hodnota je vyšší než u T3 jedenapůlkrát. Při dalším řešení problematiky předpokládám, že bude možné navrhnout podvozek se dvěma nápravami s maximální nosností trakčního podvozku 16,25 tun.

## 5. Koncept možných řešení článkových nákladních tramvají.

V této části vytvořím a vyhodnotím možné koncepty nákladních tramvají. Jak již bylo zmíněno dříve, veškeré koncepce jsou navrženy tak, aby byly schopny k přepravě čtyř standardních 20 stopých kontejnerů. Hmotnost kontejneru nemusí být pokaždé maximální, pro každou koncepci se maximální hmotnost bude stanovovat zvlášť. Tím se získá další kritérium, pomocí kterého lze porovnávat koncepce mezi sebou, a tj. maximální užitečná hmotnost celého konceptu tramvajové soupravy.

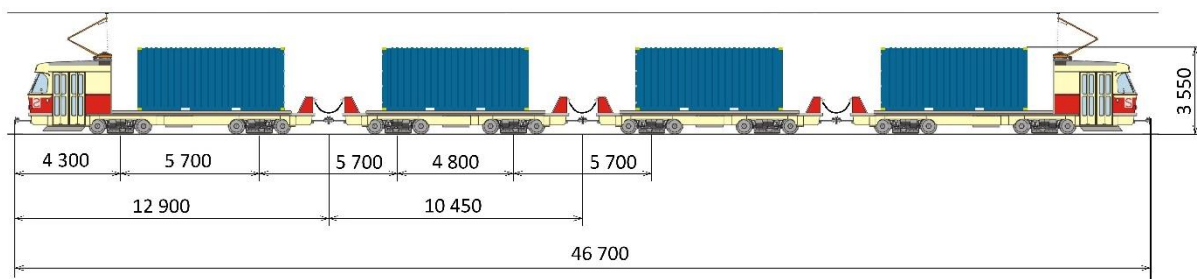
Veškeré údaje zadání, údaje ze zdrojů a technické dokumentace a zároveň vypočtené hodnoty, které budou použity během výpočtů každé z koncepcí, lze uvést v jedné v tabulce.

Tab. 10 Údaje pro porovnání koncept.

Název	Značka	Hodnota
Jmenovitá dovolená hmotnost na nápravu	$m_{jdv}$	10 000 kg
Hmotnost kabiny	$m_{kab}$	2 750 kg
Hmotnost podvozku	$m_p$	3 750 kg
Součinitel hmotnosti hlavního rámu	$\epsilon_r$	0,25
Tažná síla jedné nápravy	$F_{tn}$	7 200 N

### 5.1 Koncepce 1.

Je to koncepce klasické konstrukce, souprava se skládá ze čtyř čtyřnápravových vozů s pohonem všech náprav. Každý vůz má na sobě jeden kontejner. Na krajích soupravy jsou umístěny dva řídicí vozy, které umožňují obousměrný provoz.



Obrázek 25. Koncepce 1. Souprava čtyř čtyřnápravových vozů.

Předpokládá se, že pro všechny koncepce budou vyrobeny nové rámy vozů, které budou navrženy za účelem dopravy nákladu, tj. 20ti stopých ISO kontejnerů. Nové typové výkresy tramvajových souprav jsem neprováděl. Pro lepší představu zobrazení jednotlivých koncepcí tramvajových souprav jsem vzal obrázek s vyobrazenou tramvají T3, následně jsem tento obrázek přizpůsobil měřítku v programu SOLIDWORKS a následně upravil v grafickém editoru. Tím byly získány vhodné a přehledné obrázky pro všechny návrhy.

Na těchto obrázcích byla snaha znázornit možnou realizaci návrhů. Vzdálenosti spráhel zůstaly beze změn a byl ponechán prostor pro zesílený rám. Získané rozměry soupravy budou použity během analýzy koncepcí. Jenomže se jedná pouze o přibližné rozměry, přesné rozměry by se stanovily až během kompletního návrhu tramvaje a jenom pro jednu zvolenou variantu.

Nyní za použití známých hodnot se provede výpočet potřebných parametrů. Vypočte se hmotnost užitečného nákladu pomocí rovnice z teoretické části. Výpočet budu provádět jak pro jednotlivé vozy, tak i pro soupravu, sestávající ze dvou vozů. Indexy vozů jsou  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  a tak dále, počínaje levým koncem soupravy. Stejná označení budou použita i u ostatních variant. Získané hodnoty hmotností jednotlivých vozů poté sečtu.

$$m_{už\_v1(2,3,4)} = \frac{n_{n\_v1(2,3,4)} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v1(2,3,4)} \cdot m_{kab}}{\mathcal{E}_r + 1}$$

$$m_{už\_v1} = m_{už\_v4} \quad m_{už\_v2} = m_{už\_v3}$$

$$m_{už\_v1} = \frac{n_{n\_v1} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v1} \cdot m_{kab}}{\mathcal{E}_r + 1} = \frac{4 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 1 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} =$$

$$= 23\,800 \text{ kg}$$

$$m_{už\_v2} = \frac{n_{n\_v2} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v2} \cdot m_{kab}}{\mathcal{E}_r + 1} = \frac{4 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 0 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} =$$

$$= 26\,000 \text{ kg}$$

$$m_{už} = 2 \cdot (m_{už\_v1} + m_{už\_v2}) = 2 \cdot (23\,800 + 26\,000) = 99\,600 \text{ kg}$$

Tato hodnota znamená, jaký náklad je schopna souprava dopravit, aniž by došlo k překročení nápravového zatížení 10 tun/nápravu. Nyní je zapotřebí vypočítat, jak hodně bude využit kontejner. Hmotnost kontejneru je 2 200 kg a jeho maximální ložná hmotnost (ložnost) je 28 200 kg:

$$\eta_{už} = \frac{m_{už} - n_{kont} \cdot m_{kont}}{n_{kont} \cdot m_{už\_kont}} \cdot 100\% = \frac{99\,600 - 4 \cdot 2\,200}{4 \cdot 28\,200} \cdot 100\% = 80,5\%$$

Vlastní hmotnost soupravy se spočítá součtem hmotností rámu, kabiny a podvozku. Pro výpočet hmotnosti rámu se využije součinitel poměru hmotnosti rámu k hmotnost užitečného nákladu. Tím vzniknou následující vztahy:

$$m_{r\_v1} = m_{už\_v1} \cdot \mathcal{E}_r = 23\,800 \cdot 0,25 = 5\,950 \text{ kg}$$

$$m_{r\_v2} = m_{už\_v2} \cdot \mathcal{E}_r = 26\,000 \cdot 0,25 = 6\,500 \text{ kg}$$

$$m_{v\_v1} = m_{r\_v1} + n_{kab\_v1} \cdot m_{kab} + n_{p\_v1} \cdot m_p = 5\,950 + 1 \cdot 2\,750 + 2 \cdot 3\,750 = 16\,200 \text{ kg}$$

$$m_{v\_v2} = m_{r\_v2} + n_{kab\_v2} \cdot m_{kab} + n_{p\_v2} \cdot m_p = 6\,500 + 0 \cdot 2\,750 + 2 \cdot 3\,750 = 14\,000 \text{ kg}$$

Vlastní hmotnost soupravy činí tedy:

$$m_v = 2 \cdot (m_{v_{v1}} + m_{v_{v2}}) = 2 \cdot (16\,200 + 14\,000) = 60\,400 \text{ kg}$$

Maximální hmotnost soupravy, tj. součet hmotností prázdné soupravy a maximální hmotnosti užitečného nákladu:

$$m_c = m_v + m_{už} = 60\,400 + 99\,600 = 160\,000 \text{ kg}$$

Získaná hodnota je obrovská. Stejnou hmotnost mají například dvě plně naložené železniční cisterny. V případě poruchy této tramvajové soupravy ji stávající v Praze provozované tramvaje nebudou schopny odtáhnout. Soupravu by bylo nutné rozpojit na jednotlivé vozy. To by mohlo vést ke značným problémům během provozu. Z toho vyplývá, že bezporuchovost provozu takovéto soupravy musí být jednou z hlavních priorit během návrhu.

Dále se určí teoretické maximální a minimální zrychlení soupravy. K tomu se využije druhý Newtonův Zákon. Při znalosti trakční síly jedné nápravy (vycházím z parametrů vozidla T3) a počtu náprav, lze určit celkovou trakční sílu. Vydělíme-li tuto hodnotu hmotností, získáme zrychlení:

$$a_0 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 16}{60\,400} = 1,91 \text{ ms}^{-2} \dots \text{prázdné soupravy}$$

$$a_1 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 16}{160\,000} = 0,72 \text{ ms}^{-2} \dots \text{ložená soupravy}$$

Vypočtené hodnoty vypovídají o tom, že prázdná tramvaj nebude mít potíže při pohybu po městě, které mohou vzniknout v důsledku nízké hodnoty zrychlení. Hodnota  $1,91 \text{ ms}^{-2}$  je dokonce vyšší než u prázdné tramvaje T3, která ji má rovnou  $1,8 \text{ ms}^{-2}$ . Jenomže při plném zatížení činí hodnota zrychlení  $0,72 \text{ ms}^{-2}$ , což je hodnota nižší než u plně osobní tramvaje T3, kde hodnota zrychlení je  $1,07 \text{ ms}^{-2}$  [18]. S ohledem na to, že osobní tramvaje většinou nejsou plné, bude hodnota jejich zrychlení vyšší.

Tyto hodnoty mají za následek to, že pohyb nákladní tramvaje v denním provozu mezi osobními tramvajemi může vyvolat komplikace a tím vzniká i pravděpodobnost toho, že bude zapotřebí stavět vedlejší tramvajové tratě.

Veškeré získané charakteristiky soupravy podle koncepce 1 jsou uvedeny v tabulce 11.

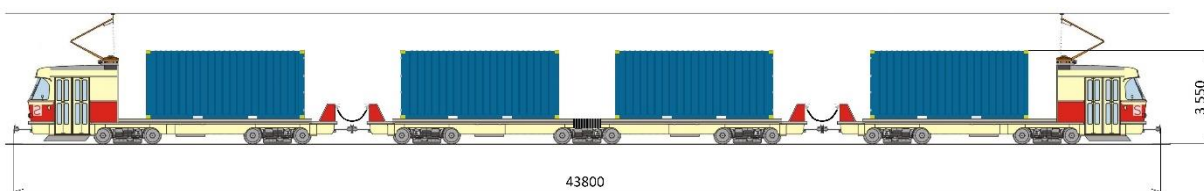
Tab. 11 Charakteristiky koncepce 1.

délka soupravy	$L_s$	46 700	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	99 600	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	80,5	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	60 400	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	160 000	kg
počet podvozků	$n_p$	8	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	1,91	$m/s^2$
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,72	$m/s^2$

Celková délka soupravy překračuje o 6,7 m stávající povolenou délku pro provoz tramvají v pražské MHD a v ČR. Tento koncept umožňuje přepravu ne zcela naložených ISO kontejnerů, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 99,6 tuny a tedy činí 80,5% z maximální přípustné ložné hmotnosti čtyř 20ti stopých ISO kontejnerů.

## 5.2 Koncepce 2.

Tato koncepce se skládá ze dvou řídicích čtyřnápravových vozů a jednoho vloženého článkového šestinápravového vozu. Je to hmotnostně a cenově jednodušší způsob, než předchozí koncept, neboť jsem ušetřil jeden trakční podvozek a souprava bude mít o 2,7 menší délku než koncepce 1.



Obrázek 26. Koncepce 2. Souprava dvou čtyřnápravových vozů a jednoho vloženého článkového šestinápravového vozu.

V soupravě je tedy o jeden trakční podvozek méně, takže mohu předpokládat, že se užitečná hmotnost sníží. Stejným způsobem jako v předchozím případě spočítám celkovou užitečnou hmotnost přes součet užitečných hmotností každého ze třech vozů:

$$m_{už_{v1}} = \frac{n_{n_{v1}} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab_{v1}} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{4 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 1 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} = 23\,800 \text{ kg}$$

$$m_{už_{v2}} = \frac{n_{n_{v2}} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab_{v2}} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{6 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 0 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} = 39\,000 \text{ kg}$$

$$m_{už} = 2 \cdot m_{už_{v1}} + m_{už_{v2}} = 2 \cdot 23\,800 + 39\,000 = 86\,600 \text{ kg}$$

Ted' spočítám procento využití užitečné hmotností kontejnerů:

$$\eta_{už} = \frac{m_{už} - n_{kont} \cdot m_{kont}}{n_{kont} \cdot m_{už_{kont}}} \cdot 100\% = \frac{86\,600 - 4 \cdot 2\,200}{4 \cdot 28\,200} \cdot 100\% \approx 69,0\%$$

Hmotností rámu jednotlivých vozů soupravy:

$$m_{r_{v1}} = m_{už_{v1}} \cdot \varepsilon_r = 23\,800 \cdot 0,25 = 5\,950 \text{ kg}$$

$$m_{r_{v2}} = m_{už_{v2}} \cdot \varepsilon_r = 39\,000 \cdot 0,25 = 9\,750 \text{ kg}$$

Vlastní hmotností vozů:

$$m_{v_{v1}} = m_{r_{v1}} + n_{kab_{v1}} \cdot m_{kab} + n_{p_{v1}} \cdot m_p = 5\,950 + 1 \cdot 2\,750 + 2 \cdot 3\,750 = 16\,200 \text{ kg}$$

$$m_{v_{v2}} = m_{r_{v2}} + n_{kab_{v2}} \cdot m_{kab} + n_{p_{v2}} \cdot m_p = 9\,750 + 0 \cdot 2\,750 + 3 \cdot 3\,750 = 21\,000 \text{ kg}$$

Vlastní hmotnost soupravy činí tedy:

$$m_v = 2 \cdot m_{v_{v1}} + m_{v_{v2}} = 2 \cdot 16\,200 + 21\,000 = 53\,400 \text{ kg}$$

Maximální hmotnost soupravy je:

$$m_c = m_v + m_{už} = 53\,400 + 86\,600 = 140\,000 \text{ kg}$$

Hodnoty maximálního možného zrychlení prázdné a plné soupravy najdu ze vztahu:

$$a_0 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 14}{53\,400} \approx 1,89 \text{ ms}^{-2}$$

$$a_1 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_c} = \frac{7\,200 \cdot 14}{140\,000} = 0,72 \text{ ms}^{-2}$$

Veškeré získané charakteristiky pro Koncept 2 budou uvedeny v tabulce 12.

Tab. 12 Charakteristiky koncepce 2.

délka soupravy	$L_s$	43 800	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	86 600	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	69,0	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	53 400	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	140 000	kg
počet podvozků	$n_p$	7	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	1,89	$m/s^2$
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,72	$m/s^2$

Při výměně dvou centrálních vozů z konceptu 1 za jeden článkový v konceptu 2, se délka soupravy snížila přibližně o 3 metry, přesto celková délka soupravy překračuje o 3,8 m stávající povolenou délku pro provoz tramvají v pražské MHD a v ČR.

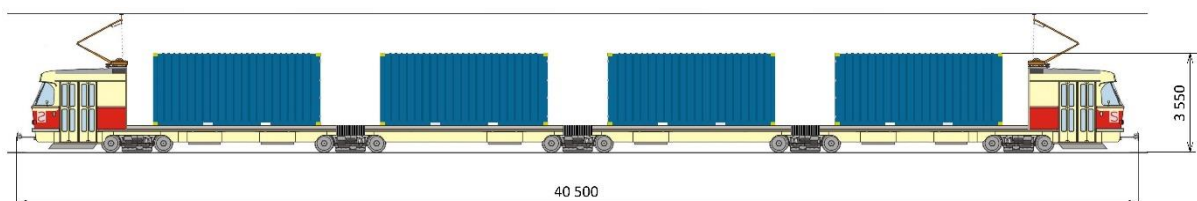
Současně se snížil počet podvozků z 8 na 7. Celková maximální hmotnost tramvajové soupravy se oproti konceptu 1 snížila o 20 tun, což je logické, protože maximální přípustné zatížení na nápravu je 10 tun. Můžeme také vidět výrazné snížení využití užitečné hmotnosti kontejnerů o 11,55 %, viz níž uvedený výpočet.

$$\Delta\eta_{už12} = \eta_{užK1} - \eta_{užK2} = 80,5 - 69,0 = 11,55 \%$$

Tento koncept umožňuje přepravu né zcela naložených ISO kontejnerů, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 86,6 tuny a tedy činí 69 % z maximální přípustné ložné hmotnosti čtyř 20ti stopých ISO kontejnerů.

### 5.3 Koncept 3.

Je to koncepce klasické článkové soupravy. Soupravu tvoří jeden desetinápravový čtyřčlánkový vůz. Kabiny jsou umístěny na obou koncích, aby byl umožněn obousměrný provoz.



Obrázek 27. Koncept 3. Desetinápravový čtyřčlánkový vůz.

Souprava bude mít nejmenší délku ze všech koncepcí. Souprava je tvořena minimálním možným počtem podvozků. Při tomto konceptu jsem ve srovnání s ostatními koncepcemi dospěl k velkému snížení užitečné a maximální hmotnosti, viz níže uvedený výpočet:

$$m_{už} = \frac{n_n \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{10 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 2 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} = 60\,600 \text{ kg}$$

Ted' spočítám procento využití užitečné hmotností kontejnerů:

$$\eta_{už} = \frac{m_{už} - n_{kont} \cdot m_{kont}}{n_{kont} \cdot m_{už\_kont}} \cdot 100\% = \frac{60\,600 - 4 \cdot 2\,200}{4 \cdot 28\,200} \cdot 100\% \approx 46,0\%$$

Hmotnosti rámu soupravy je tedy:

$$m_r = m_{už} \cdot \varepsilon_r = 60\,600 \cdot 0,25 = 15\,150 \text{ kg}$$

Vlastní hmotností vozů:

$$m_v = m_r + n_{kab} \cdot m_{kab} + n_p \cdot m_p = 15\,150 + 2 \cdot 2\,750 + 5 \cdot 3\,750 = 39\,400 \text{ kg}$$

Maximální hmotnost soupravy je:

$$m_c = m_v + m_{už} = 39\,400 + 60\,600 = 100\,000 \text{ kg}$$

Hodnoty maximálního možného zrychlení prázdné a plné soupravy najdu ze vztahu:

$$a_0 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 10}{39\,400} \approx 1,83 \text{ ms}^{-2}$$

$$a_1 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_c} = \frac{7\,200 \cdot 10}{100\,000} = 0,72 \text{ ms}^{-2}$$

Veškeré získané charakteristiky pro Koncept 3 jsou uvedeny v tabulce 13.

*Tab. 13 Charakteristiky koncepte 3.*

délka soupravy	$L_s$	40 500	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	60 600	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	46,0	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	39 400	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	100 000	kg
počet podvozků	$n_p$	5	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	1,83	m/s <sup>2</sup>
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,72	m/s <sup>2</sup>

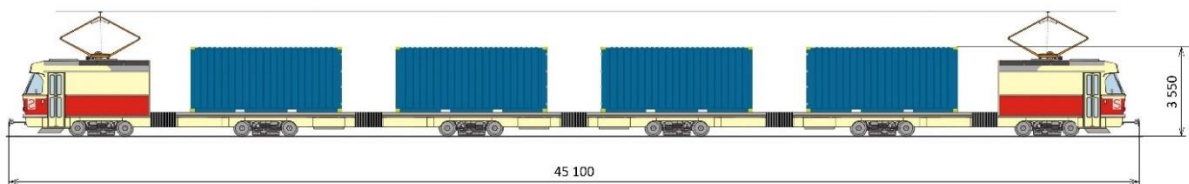


Tento koncept používá nejmenší počet podvozků ze všech konceptů. Má malou celkovou délku, nízkou vlastní hmotnost, ale zároveň přepravuje 4 stejné kontejnery. Délka soupravy překračuje o 0,5 m stávající povolenou délku pro provoz tramvají v pražské MHD a v ČR. To by šlo odstranit použitím sklopných čelních spráhel, které by za provozu byly uloženy pod kabinami. Nevýhodou je, že tento koncept neumožňuje rozpojení soupravy na jednotlivé vozy a v současnosti neexistuje tramvaj, která by byla schopna v případě poruchy nákladní tramvaj odtáhnout.

Tento koncept je vhodný pouze pro přepravu lehce naložených ISO kontejnerů, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 60,6 tuny a tedy činí pouze 40% z maximální přípustné ložné hmotnosti.

## 5.4 Koncepte 4.

V tomto případě se jedná o dvanáctinápravový šestičlánkový vůz. Kabiny jsou umístěny na samostatných článcích, umístěných na obou stranách soupravy. Tím je zajištěno řešení pro obousměrný provoz.



Obrázek 28. Koncepte 4. Dvanáctinápravový šestičlánkový vůz.

Každý další článek má pod sebou pouze jeden podvozek. Při výpočtu hmotností budu samostatně počítat první a poslední článek, a články přepravující kontejnery. Součtem všech příslušných hmotností získám celkovou hodnotu. Spočítám celkovou užitečnou hmotnost přes součet užitečných hmotností každého vozu:

$$m_{už\_v1(6)} = 0 \text{ kg}$$

$$m_{už\_v2(3,4,5)} = \frac{n_{n\_v2} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v2} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{2 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 0 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} =$$

$$= 13\,000 \text{ kg}$$

$$m_{už} = 2 \cdot m_{už\_v1} + 4 \cdot m_{už\_v2} = 2 \cdot 0 + 4 \cdot 13\,000 = 52\,000 \text{ kg}$$

Ted' spočítám procento využití užitečné hmotností kontejnerů:

$$\eta_{už} = \frac{m_{už} - n_{kont} \cdot m_{kont}}{n_{kont} \cdot m_{už\_kont}} \cdot 100\% = \frac{52\,000 - 4 \cdot 2\,200}{4 \cdot 28\,200} \cdot 100\% \approx 38,3\%$$

Hmotnost rámu článku s kabinou je částí hmotnosti kabiny tzn., že v daném případě budu počítat s nulovou hodnotou hmotnosti rámu. Hmotností rámu jednotlivých článku:

$$m_{r_{v1}} = 0 \text{ kg}$$

$$m_{r_{v2}} = m_{už_{v2}} \cdot \varepsilon_r = 13\,000 \cdot 0,25 = 3\,250 \text{ kg}$$

Vlastní hmotností vozů:

$$m_{v_{v1}} = m_{r_{v1}} + n_{kab_{v1}} \cdot m_{kab} + n_{pv1} \cdot m_p = 0 + 1 \cdot 2\,750 + 1 \cdot 3\,750 = 6\,500 \text{ kg}$$

$$m_{v_{v2}} = m_{r_{v2}} + n_{kab_{v2}} \cdot m_{kab} + n_{pv2} \cdot m_p = 3\,250 + 0 \cdot 2\,750 + 1 \cdot 3\,750 = 7\,000 \text{ kg}$$

Vlastní hmotnost soupravy činí tedy:

$$m_v = 2 \cdot m_{v_{v1}} + 4 \cdot m_{v_{v2}} = 2 \cdot 6\,500 + 4 \cdot 7\,000 = 41\,000 \text{ kg}$$

Maximální hmotnost soupravy je:

$$m_c = m_v + m_{už} = 41\,000 + 52\,000 = 93\,000 \text{ kg}$$

Hodnoty maximálního možného zrychlení prázdné a plné soupravy najdu ze vztahu:

$$a_0 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 12}{41\,000} \approx 2,11 \text{ ms}^{-2}$$

$$a_1 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_c} = \frac{7\,200 \cdot 12}{93\,000} \approx 0,93 \text{ ms}^{-2}$$

Veškeré získané charakteristiky pro Konceptce 4 budou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14 Charakteristiky konceptce 4.

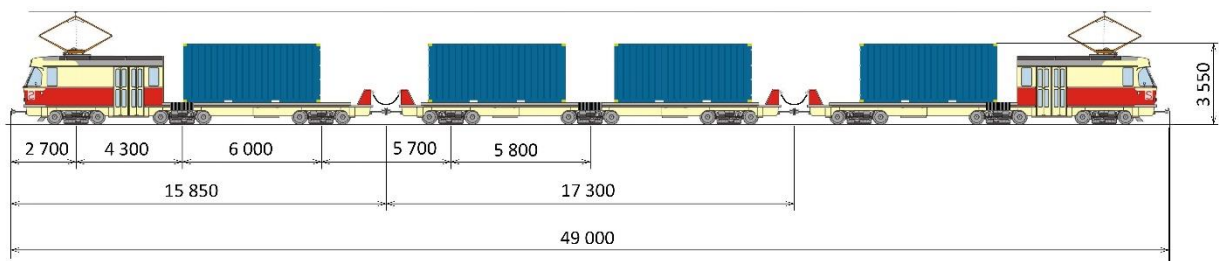
délka soupravy	$L_s$	45 100	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	52 000	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	38,3	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	41 000	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	93 000	kg
počet podvozků	$n_p$	6	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	2,11	m/s <sup>2</sup>
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,93	m/s <sup>2</sup>

Chci poznamenat, že tento koncept se liší od ostatních svou nízkou hmotností v kombinaci s velkým počtem pohaněných náprav. To dává nejvyšší dynamické vlastnosti. To usnadní pohyb ve městě. Při hlubší analýze je třeba mít na paměti, že první a poslední podvozek je méně zatížen než ostatní, tzn. že řízení tažných sil jednotlivých podvozků je nutné přizpůsobit zatížení jednotlivých článků. Nevýhodou je, že tento koncept neumožňuje rozpojení soupravy na jednotlivé vozy a v současnosti neexistuje tramvaj, která by byla schopna v případě poruchy nákladní tramvaj odtáhnout.

Tento koncept má také malou hodnotu užitečného zatížení. Bude možné přepravovat pouze mírně naložené kontejnery. Tento koncept umožňuje přepravu z cca 2/5 naložených ISO kontejnerů, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 52 tuny a tedy činí pouze 38,3 % z maximální přípustné ložné hmotnosti čtyř 20ti stopých ISO kontejnerů.

## 5.5 Koncepte 5.

Tato koncepce se skládá ze dvou řídicích člankových šestinápravových vozů a jednoho vloženého člankového šestinápravového vozu. Je to další rozvinutí koncepce 2.



Obrázek 29. Koncepte 5. Souprava tvořena ze třech šestinápravových člankových vozů.

Souprava bude mít ještě menší délku než koncepce 2. Koncepce si také zachovává výhodu, že jej lze v případě poruchy rozdělit na jednotlivé vozy. Souprava má devět podvozků, a kabiny jsou umístěny na samostatných člancích. V tomto případě je při výpočtu hmotnosti nutné považovat první vůz za dva oddělené články, protože první článek prvního vozu nenesou užitečné zatížení. Jeho hmotnost se skládá z hmotnosti kabiny a hmotnosti podvozků. Pro výpočet budu předpokládat, že kabina zatěžuje pouze první podvozek a nevytváří žádnou statickou sílu na podvozek číslo dvě. Dále spočítám celkovou užitečnou hmotnost všech vozů a součet bude tvořit celkovou hodnotu užitečné hmotnosti soupravy:

$$m_{už\_v1č2} = \frac{n_{n\_v1č2} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v1} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{4 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 0 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} = 26\,000 \text{ kg}$$

$$m_{už\_v2} = \frac{n_{n\_v2} \cdot \left(m_{jdov} - \frac{m_p}{2}\right) - n_{kab\_v2} \cdot m_{kab}}{\varepsilon_r + 1} = \frac{6 \cdot \left(10\,000 - \frac{3\,750}{2}\right) - 0 \cdot 2\,750}{0,25 + 1} = 39\,000 \text{ kg}$$

$$m_{už} = 2 \cdot m_{už_{v1č1}} + 2 \cdot m_{už_{v1č2}} + m_{už_{v2}} = 2 \cdot 0 + 2 \cdot 26\,000 + 39\,000 = 91\,000 \text{ kg}$$

Ted' spočítám procento využití užitečné hmotností kontejnerů:

$$\eta_{už} = \frac{m_{už} - n_{kont} \cdot m_{kont}}{n_{kont} \cdot m_{už_{kont}}} \cdot 100\% = \frac{91\,000 - 4 \cdot 2\,200}{4 \cdot 28\,200} \cdot 100\% \approx 72,9\%$$

Hmotností rámu jednotlivých vozů soupravy:

$$m_{r_{v1}} = m_{už_{v1}} \cdot \varepsilon_r = 26\,000 \cdot 0,25 = 6\,500 \text{ kg}$$

$$m_{r_{v2}} = m_{už_{v2}} \cdot \varepsilon_r = 39\,000 \cdot 0,25 = 9\,750 \text{ kg}$$

Vlastní hmotnosti vozů:

$$m_{v_{v1}} = m_{r_{v1}} + n_{kab_{v1}} \cdot m_{kab} + n_{p_{v1}} \cdot m_p = 6\,500 + 1 \cdot 2\,750 + 3 \cdot 3\,750 = 20\,500 \text{ kg}$$

$$m_{v_{v2}} = m_{r_{v2}} + n_{kab_{v2}} \cdot m_{kab} + n_{p_{v2}} \cdot m_p = 9\,750 + 0 \cdot 2\,750 + 3 \cdot 3\,750 = 21\,000 \text{ kg}$$

Vlastní hmotnost soupravy činí tedy:

$$m_v = 2 \cdot m_{v_{v1}} + m_{v_{v2}} = 2 \cdot 20\,500 + 21\,000 = 62\,000 \text{ kg}$$

Maximální hmotnost soupravy je:

$$m_c = m_v + m_{už} = 62\,000 + 91\,000 = 153\,000 \text{ kg}$$

Hodnoty maximálního možného zrychlení prázdné a plné soupravy najdu ze vztahu:

$$a_0 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_v} = \frac{7\,200 \cdot 18}{62\,000} \approx 2,09 \text{ ms}^{-2}$$

$$a_1 = \frac{F_{tn} \cdot n_n}{m_c} = \frac{7\,200 \cdot 18}{153\,000} = 0,85 \text{ ms}^{-2}$$

Veškeré získané charakteristiky pro Koncept 5 budou uvedeny v tabulce 15.

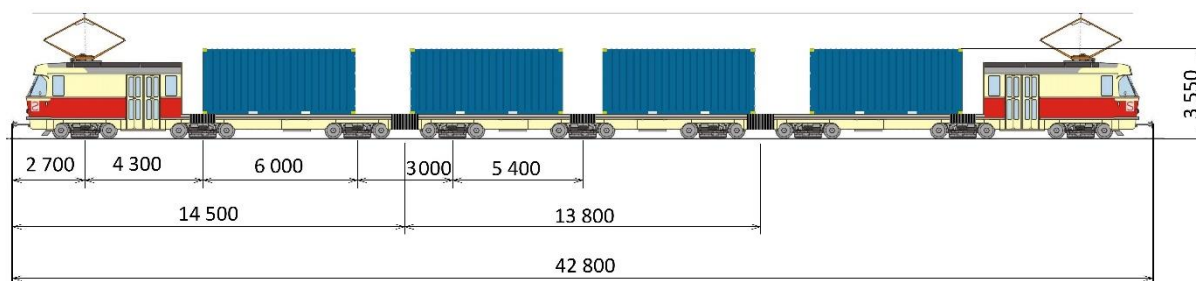
*Tab. 15 Charakteristiky konceptu 5.*

délka soupravy	$L_s$	49 000	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	91 000	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	72,9	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	62 000	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	153 000	kg
počet podvozků	$n_p$	9	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	2,09	m/s <sup>2</sup>
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,85	m/s <sup>2</sup>

Lze říci, že tento koncept kombinuje velké užitečné zatížení s velkým procentem využití užitečné hmotnosti kontejneru a velkou hodnotou zrychlení. Takový koncept je dobře zbilancovaný. Délka soupravy překračuje o 9 m stávající povolenou délku pro provoz tramvají v pražské MHD a v ČR. Tento koncept umožňuje přepravu ISO kontejnerů naložených ze cca 3/4, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 91 tun a tedy činí cca 73 % z maximální přípustné ložné hmotnosti čtyř 20ti stopých ISO kontejnerů.

## 5.6 Koncepte 6.

Je to koncepte osmnáctinápravové šestičlánkové tramvaje. Jedná se o vývoj předchozí koncepte a nahrazení spřahadel kloubovými spoji, tím se však stala souprava nerozpojitelná. Kabiny jsou umístěny na obou stranách pro obousměrný provoz.



Obrázek 30. Koncepte 6. Osmnáctinápravový šestičlánkový vůz.

Výpočet všech parametrů vozů, s výjimkou délky, je zcela podobný výpočtu konceptu 5. Všechny hodnoty jsou stejné. Proto nebudu opakovat výpočty, ale pouze umístím konečnou tabulku charakteristik koncepte 6. Celková délka soupravy překračuje o 2,8 m stávající povolenou délku pro provoz tramvají v pražské MHD a v ČR.

Tab. 16 Charakteristiky koncepte 6.

délka soupravy	$L_s$	42 800	mm
maximální užitečná hmotnost	$m_{už}$	91 000	kg
procento využití užitečné hmotností kontejnerů	$\eta_{už}$	72,9	%
vlastní hmotnost soupravy	$m_v$	62 000	kg
maximální celková hmotnost	$m_c$	153 000	kg
počet podvozků	$n_p$	9	-
maximální teoretické zrychlení při:			
minimální hmotností soupravy (prázdná)	$a_0$	2,09	$m/s^2$
maximální hmotností soupravy	$a_1$	0,85	$m/s^2$

Tento koncept umožňuje přepravu ISO kontejnerů naložených ze cca 3/4, neboť vypočítaná ložná hmotnost je 91 tun a tedy činí cca 73 % z maximální přípustné ložné hmotnosti čtyř 20ti stopých ISO kontejnerů.

## 5.7 Stanovení nejvhodnějšího konceptu.

V této části vybírám nejlepší koncept, který vychází z vypočtených hodnot uvedených při rozboru každého z konceptu. Údaje z předchozích kapitol jsou uvedeny v přehledové tabulce.

Tab. 17 Charakteristiky všech koncepcí.

		Koncepte					
		1	2	3	4	5	6
Charakteristiky	$L_s$	46 700	43 800	40 500	45 100	19 000	42 800
	$m_{u\dot{z}}$	99 600	86 600	60 600	52 000	91 000	91 000
	$\eta_{u\dot{z}}$	80,5	69	46	38,3	72,9	72,9
	$m_v$	60 400	53 400	39 400	41 000	62 000	62 000
	$m_c$	160 000	140 000	100 000	93 000	153 000	153 000
	$n_p$	8	7	5	6	9	9
	$a_0$	1,91	1,89	1,83	2,11	2,09	2,09
	$a_1$	0,72	0,72	0,72	0,93	0,85	0,85

Chci poznamenat, že hodnota využití užitečné hmotností kontejneru byla vypočítána pro znázornění využití kontejneru. Toto kritérium je v tomto případě funkcí pouze užitečného zatížení tramvaje, protože hmotnost prázdného kontejneru je vždy stejná. Nebudu tedy tuto hodnotu používat pro další srovnání, protože duplikuje jiné kritérium. Místo tohoto kritéria použiji takový parametr, jako je počet jednotlivých vozů, do kterých lze soupravu v případě poruchy rozpojit pro odtahování. To je velmi důležité kritérium, protože čím více jednotlivých vozů, tím menší je jejich hmotnost a tím snazší bude odtažení. Toto kritérium je také spojen se spolehlivostí soupravy tzn., že čím je proces odtahování složitější, tím větší by měla být spolehlivost soupravy. Nebo naopak, souprava by neměla být příliš spolehlivá, pokud s nejsou žádné problémy s odtahováním. Tento kritérium budu značit jako -  $n_p$ . Tím pádem první koncepce mužů rozdělit na 4 vozy, druhou na 3, třetí a čtvrtou rozpojit nemohu, pátou koncepci mohu rozdělit na 3 části. Koncepce šest je kloubová a z prvního pohledu není rozpojitelná. Chtěl bych však upozornit na to, že tuto koncepci lze rozpojovat ve druhém kloubu od kraje, protože tyto klouby nahrazují spřahadla u koncepci 5. Pak lze soupravu rozdělit na 3 části a bez problémů ji po částech odtáhnout. To znamená, že konstrukce kloubu by měla umožňovat snadné rozpojení. Ale pro férové srovnání budu uvažovat, že soupravu lze rozdělit pouze na 2 nestejně části, s tím že na každé části zůstane kabina se standardním připojením. Kritéria, které jsem použil pro srovnání zobrazuje tabulka 18.

*Tab. 18 Kriteriaální tabulka.*

		Koncepce					
		1	2	3	4	5	6
Kritéria	L <sub>s</sub>	46 700	43 800	40 500	45 100	49 000	42 800
	m <sub>už</sub>	99 600	86 600	60 600	52 000	91 000	91 000
	n <sub>v</sub>	4	3	1	1	3	2
	m <sub>v</sub>	60 400	53 400	39 400	41 000	62 000	62 000
	m <sub>c</sub>	160 000	140 000	100 000	93 000	153 000	153 000
	n <sub>p</sub>	8	7	5	6	9	9
	a <sub>0</sub>	1,91	1,89	1,83	2,11	2,09	2,09
	a <sub>1</sub>	0,72	0,72	0,72	0,93	0,85	0,85

Byla použita metoda vícekritériálního rozhodování. Převědu všechny kritéria na stejný typ, tzn. že minimalizační kritéria délky soupravy, vlastní hmotnosti, maximální hmotnosti, a počtu podvozku potřebuju upravit. Vyhledám nejhorší (nejvyšší) hodnotu a od těchto hodnot odečtu hodnotu kritériaální. V našem případě:

$$L'_s = 49000 \text{ mm}, \quad m'_v = 62000 \text{ kg}, \quad m'_c = 160000 \text{ kg}, \quad n'_p = 9 \text{ podvozků.}$$

Upravená kritériaální tabulka tedy bude vypadat následovně.

*Tab. 19 Upravená kritériaální tabulka.*

		Koncepce					
		1	2	3	4	5	6
Kritéria maxim.	L <sub>s</sub>	2 300	5 200	8 500	3 900	0	6 200
	m <sub>už</sub>	99 600	86 600	60 600	52 000	91 000	91 000
	n <sub>v</sub>	4	3	1	1	3	2
	m <sub>v</sub>	1 600	8 600	22 600	21 000	0	0
	m <sub>c</sub>	0	20 000	60 000	67 000	7 000	7 000
	n <sub>p</sub>	1	2	4	3	0	0
	a <sub>0</sub>	1,91	1,89	1,83	2,11	2,09	2,09
	a <sub>1</sub>	0,72	0,72	0,72	0,93	0,85	0,85

Ted' provedu normalizaci kritérii, tzn. odečtu od jednotlivých kritérií minimální hodnotu kritéria a vydělím rozdílem mezi maximální a minimální hodnotou. Z důvodu, že jsem nemohl získat detailnější posouzení „specialistů“ ohledně různých návrhů, určil jsem váhy různých kritérií sám na základě kvalifikovaného odhadu jejich důležitosti. Tak nejdůležitějšími kritéria jsou celková délka, užitečná hmotnost a rozpojitelnost soupravy. Váhy kritérií jsou uvedeny v posledním sloupci rozhodovací tabulky č.20.

Tab. 20 Normalizovaná kritériální tabulka.

		Koncepce						Váhy
		1	2	3	4	5	6	
Kritéria norm.	L <sub>s</sub>	0,27	0,61	1,00	0,46	0,00	0,73	0,20
	m <sub>už</sub>	1,00	0,73	0,18	0,00	0,82	0,82	0,20
	n <sub>v</sub>	1,00	0,67	0,00	0,00	0,67	0,33	0,20
	m <sub>v</sub>	0,07	0,38	1,00	0,93	0,00	0,00	0,05
	m <sub>c</sub>	0,00	0,30	0,90	1,00	0,10	0,10	0,05
	n <sub>p</sub>	0,25	0,50	1,00	0,75	0,00	0,00	0,10
	a <sub>0</sub>	0,29	0,21	0,00	1,00	0,93	0,93	0,10
	a <sub>1</sub>	0,00	0,00	0,00	1,00	0,62	0,62	0,10

Nyní se body vynásobí váhou kritéria a obdržíme další tabulku s váhovým hodnocením.

Tab. 21 Vážené hodnocení koncepcí.

		Koncepce					
		1	2	3	4	5	6
Vážené hodnocení	L <sub>s</sub>	0,05	0,12	0,20	0,09	0,00	0,15
	m <sub>už</sub>	0,20	0,15	0,04	0,00	0,16	0,16
	n <sub>v</sub>	0,20	0,13	0,00	0,00	0,13	0,07
	m <sub>v</sub>	0,00	0,02	0,05	0,05	0,00	0,00
	m <sub>c</sub>	0,00	0,01	0,04	0,05	0,01	0,01
	n <sub>p</sub>	0,03	0,05	0,10	0,08	0,00	0,00
	a <sub>0</sub>	0,03	0,02	0,00	0,10	0,09	0,09
	a <sub>1</sub>	0,00	0,00	0,00	0,10	0,06	0,06
<b>Σ</b>		0,51	0,51	0,43	0,46	0,46	0,54

Součet všech charakteristik konceptů dává porovnatelné celkové hodnocení jednotlivých koncepcí.

Jak je patrné z tabulky č. 21, nejvíce bodů má varianta č. 6, viz obr. 30. Největší příspěvek k vítězství této varianty dává malá délka soupravy, velká hodnota užitečné hmotnosti a dobré dynamické vlastnosti.



## 6. Závěr.

V této bakalářské práci jsem zkoumal, kde a jak jsou nákladní tramvaje používány nebo byly používány ve světě. Ukázal jsem na to, že nákladní tramvaj může být dobrým způsobem dodání zboží ve městech současnosti nebo v blízké budoucnosti.

Byla zkontrolována průjezdová charakteristika nákladního tramvajového vozů s 20 stopým ISO kontejnerem jestli je v souladu s normou pro obrys vozidla. Je stanoveno, že takový vůz může existovat. Předběžně jsem ukázal největší přípustné rozměry rámu v příčném řezu. V bakalářské práci byl proveden návrh metody výpočtu maximální užitečné hmotnosti nákladního tramvajového vozu. Byly stanoveny potřebné parametry pro další výpočty a srovnání možných konceptů.

Dále jsem navrhl šest možných konceptů nákladní soupravy pro přepravu čtyř kontejnerů. Z vypočtených dat a pomocí srovnání byla vybrána nejvhodnější koncepce číslo 6. Je to koncepce osmnáctnápravového, šestičlánkového vozu, jehož základní návrh dokládám typovým výkresem. Vybraný vůz má hlavní výhodu v tom, že jeho délka může být mnohem kratší než délka tramvají klasické konstrukce, tj. soupravy tvořené čtyřnápravovými vozy, při zachování slušných dynamických charakteristik. Procento využití užitečné hmotnosti kontejnerů je 72,9%, přičemž maximální zrychlení plné tramvaje může dosahovat  $a_1 = 0,85 \text{ ms}^{-2}$  (u osobní tramvaje T3 tato hodnota přibližně stanoví  $a_{1T3} = 1,07 \text{ ms}^{-2}$ ).

Vzhledem k tomu, že první a poslední podvozek tramvaje je staticky zatížen pouze hmotností kabiny, při dalším návrhu, by se mohl vyměnit standartní podvozek za jednonápravový a tím by se snížila celková délka soupravy.

Užitečné zatížení celé soupravy je cca 91 tun, z toho 8,8 tun je hmotnost samotných kontejnerů. Souprava dokáže přepravit čtyři 20 stopé ISO kontejnery o hmotnosti 22,75 tun každý, tzn. hmotnost nákladu uvnitř kontejneru může být až do 20,55 tuny. Na základě výsledku, že ISO kontejnery nejsou naloženy na maximální hmotnost, by bylo možné k přepravě pro tramvajovou soupravu použít jiných speciálních kontejnerů s nižší hmotností.

Při navrhování nákladní tramvaje je nutné vzít v úvahu skutečnost, že pro realizaci možnosti vykládání ISO kontejnerů v prostorách mimo trolejové vedení s čerpání elektrické energie je nutné použití větší (kapacitnější) baterie. O její navýšení hmotnosti je nutné snížit hmotnost užitečného zatížení. Rovněž tak, použití samonakládacího zařízení, jako například Sidelifter, které má také značnou hmotnost by nám snížilo hmotnost užitečného (ložného) zatížení.

Jednou z nejdůležitějších nevýhod všech těchto konceptů je jejich příliš velká délka. V České republice je maximální povolená délka soupravy tramvají a kloubové tramvaje včetně spřahadel ohraničena zákonem č. 341/2002 na 40 metru. V Evropské unii, ale takové legislativní omezení maximální délky rozšířené není. Například v Maďarsku nejsou výjimkou soupravy tramvají délky dosahující 55 metru. V Irsku, Německu a Francii je provoz delších souprav než 40 metru zcela běžný.

## 7. Použitá literatura.

- [1] “Zákaz vjezdu kamionů do centra Prahy” PRAHATV [online]. Dostupné z: <https://prahatv.eu/zpravy/praha/praha/4095/zakaz-vjezdu-kamionu-do-centra-prahy>
- [2] Sidelifter – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sidelifter>
- [3] KOLÁŘ, Josef. Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2009. 276 s. ISBN 978-80-01-04262-5. Základní rozdělení nákladních a osobních vozů. Str.6.
- [4] Грузовой трамвай - Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9\\_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9)
- [5] “Nákladní tramvaj "CarGo Tram" v Drážďanech” [online]. Dostupné z: <http://spzold.logout.cz/mhd/cargotram.html>
- [6] CarGoTram (Dresden) – Wikipedie(de). [online]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/CarGoTram\\_\(Dresden\)](https://de.wikipedia.org/wiki/CarGoTram_(Dresden))
- [7] CarGoTram – Wikipedie(eng). [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CarGoTram>
- [8] Písek – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Písek\\_\(materiál\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Písek_(materiál))
- [9] Technické údaje tramvaje T3. [online]. Dostupné z: <http://tram.webzdarma.cz/vozidla/t-t3.htm>
- [10] Mazací tramvaj 5572 – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mazac%C3%AD\\_tramvaj\\_5572](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mazac%C3%AD_tramvaj_5572)
- [11] Cargo tram Zurich [online]. Dostupné z: [http://www.proaktiva.ch/tram/zurich/cargotram\\_index.html](http://www.proaktiva.ch/tram/zurich/cargotram_index.html)
- [12] ИВАНОВ М.Д. Трамвайные вагоны Т-3. Москва “Транспорт” 1977г. 240 с. § 9. Центральное подвешивание тележки. с.40-44
- [13] Характеристики железнодорожных платформ. Транспусь. [online]. Dostupné z: <https://www.transru.ru/articles/harakteristiki-zheleznodorozhnyh-platform/>
- [14] Тележки грузовых вагонов. [online]. Dostupné z: [http://xn--b1amah.xn--d1ad.xn--p1ai/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B6%D0%BA%D0%B8\\_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85\\_%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2](http://xn--b1amah.xn--d1ad.xn--p1ai/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B6%D0%BA%D0%B8_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D1%85_%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2)
- [15] Sgnss 55. [online]. Dostupné z: <https://www.cdcargo.cz/sgnss-55>
- [16] Podvozky nákladních vozů ČSD/ČD. [online]. Dostupné z: <https://www.parostroj.net/katalog/nv/clanky/Podvozky/podvozky.php3>
- [17] ИВАНОВ М.Д. Трамвайные вагоны Т-3. Москва “Транспорт” 1977г. 240 с. § 7. Основные особенности тележек вагона Т3. с.22
- [18] ИВАНОВ М.Д. Трамвайные вагоны Т-3. Москва “Транспорт” 1977г. 240 с. § 2. Общие сведения об узлах и агрегатах вагона Т3. с.7

## 8. Seznam obrázků.

- [1] “Kamionová doprava v Česku už nemá kam růst. Železnice zůstává pozadu” iDNES [online]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/kamiony-se-zbozim-plni-dalnice-zeleznicni-preprava-zbozi-zustava-pozadu.A151230\\_2215009\\_eko-doprava\\_rts](https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/kamiony-se-zbozim-plni-dalnice-zeleznicni-preprava-zbozi-zustava-pozadu.A151230_2215009_eko-doprava_rts)
- [2] “Lepší kamiony v Praze, než na vesnici. Magistrát zřejmě ustoupí od zákazu” iDNES [online]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/praha-magistrat-kamion-doprava-zakaz-vjezd-naklad.A181112\\_190702\\_eko-doprava\\_mato](https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/praha-magistrat-kamion-doprava-zakaz-vjezd-naklad.A181112_190702_eko-doprava_mato)
- [3] G&S Transport sidelifter trailer in action. Video. [online]. Dostupné z: <https://youtu.be/EELbI2hcdx8>
- [4] “Volkswagen lanza un nuevo plan de financiación para todas las versiones de Amarok” [online]. Dostupné z: <http://riouruguayseguros.com/site/volkswagen-lanza-un-nuevo-plan-de-financiacion-para-todas-las-versiones-de-amarok/>
- [5] Electric cargo tram helps deliver car parts to the assembly plant in the Great Garden district of Dresden. [online]. Dostupné z: <https://twitter.com/katboybna/status/996064224563679233>
- [6] CarGoTram – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CarGoTram>
- [7] Грузовой трамвай – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9\\_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9)
- [8] Umístění nákladového prostoru na tramvaji pro zimní posyp.
- [9] Грузовой трамвай – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9\\_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B2%D0%B0%D0%B9)
- [10] Umístění nákladového prostoru na tramvaji pro mytí tratě.
- [11] Mazací tramvaj 5572 – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mazac%C3%AD\\_tramvaj\\_5572](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mazac%C3%AD_tramvaj_5572)
- [12] “Cargo-Tram and E-Tram. bulky and electric waste collection by tram in Zurich” Eltis. [online]. Dostupné z: <https://www.eltis.org/discover/case-studies/cargo-tram-and-e-tram-bulky-and-electric-waste-collection-tram-zurich>
- [13] Cargo tram Zurich [online]. Dostupné z: [http://www.proaktiva.ch/tram/zurich/cargotram\\_index.html](http://www.proaktiva.ch/tram/zurich/cargotram_index.html)
- [14] 20 stopový kontejner ISO 668
- [15] Průjezdový průřez tramvajové trati dle ČSN 28 0318.
- [16] Průjezdový průřez tramvajové trati a nákladního vozu.
- [17] Graf závislosti hmotnosti rámu na užitečné hmotnosti.
- [18] Vůz 13-9004. [online]. Dostupné z: <https://www.transru.ru/articles/harakteristiki-zheleznodorozhnyh-platform/>
- [19] Podvozek 18-100. [online]. Dostupné z: <https://www.transru.ru/articles/harakteristiki-zheleznodorozhnyh-platform/>
- [20] Vůz Sgnss. Wagon Sgnss-z. [online]. Dostupné z: [http://www.ddsv.hr/vagon\\_sgnss-z\\_eng\\_1.html](http://www.ddsv.hr/vagon_sgnss-z_eng_1.html)

- [21] Podvozek Y25 Ls(s)d1. Podvozky nákladních vozů ČSD/ČD. [online]. Dostupné z: <https://www.parostroj.net/katalog/nv/clanky/Podvozky/podvozky.php3>
- [22] Měření rozměru nosníku rámu T3 během exkurze.
- [23] Ram tramvaje T3.
- [24] Zjednodušené schéma rozdělení hmotnosti vozu.
- [25] Koncepce 1. Souprava čtyř čtyřnápravových vozů.
- [26] Koncepce 2. Souprava dvou čtyřnápravových vozů a jednoho vloženého článkového šestinápravového vozu.
- [27] Koncepce 3. Desetinápravový čtyřčlánkový vůz.
- [28] Koncepce 4. Dvanáctinápravový šestičlánkový vůz.
- [29] Koncepce 5. Souprava tvořena ze třech šestinápravových článkových vozů.
- [30] Koncepce 6. Osmnáctinápravový šestičlánkový vůz.