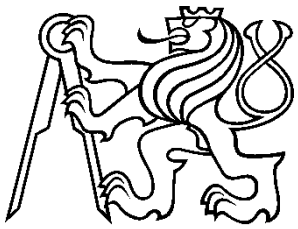
České vysoké učení technické v Praze



Fakulta strojní

Ústav konstruování a částí strojů

Dopravní, letadlová a transportní technika

Diplomová práce

Systemové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla

System solution of a tram gangway system

Bc. Radek Wasserbauer

Autor

Vedoucí práce: Ing. Jakub Chmelař

Akademický rok: 2016/2017

Letní semestr

Zadání

Vložený list

Abstrakt

V diplomové práci je navrženo systémové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla. Na začátku je provedena rešerše v oblasti mezivozových přechodů, souvisejících norem a konstrukčních celků. Následně jsou stanoveny základní parametry systémového řešení a jeho aplikace na konkrétní tramvajové vozidlo a trať. Návrh řešení obsahuje vyšetření kinematiky mezivozového přechodu, konstrukční řešení spojovacích částí a příslušné analytické a MKP pevnostní kontroly. Na závěr je vyřešeno začlenění mezivozového přechodu do interiéru tramvajového vozu.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakubu Chmelařovi za vedení mé diplomové práce, za vstřícnost a trpělivost při konzultacích a za rady při řešení. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost se mnou, pánům doc. Ing. Kolářovi CSc. za poskytnuté informace a vyšetřovací programy, firmě Siemens AG za možnost řešit zajímavou diplomovou práci za podpory a odborných konzultací jejích zaměstnanců.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Systémové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Chmelaře s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze …..... .....

Radek Wasserbauer

Anotační list

Jméno autora:	Radek Wasserbauer
Název DP:	Systemové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla
Anglický název:	System solution of a tram gangway system
Rok:	2017
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor Studia:	Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ú12113 - Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Jakub Chmelař

Bibliografické údaje

počet stran:	89
počet obrázků:	60
počet tabulek:	48
počet příloh:	34
Klíčová slova:	Mezivozový přechod, krycí měch, spojovací kloub, tramvajový článek, interiér
Keywords:	Tram gangway, transition bellows, connecting joint, tram segment, interior

Anotace: V diplomové práci je navrženo systémové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla zahrnující vyšetření kinematiky zvolené tramvajové jednotky, potřebných návrhových a pevnostních výpočtů a integraci mezivozového přechodu do interiéru jednotky.

Abstract: In diploma thesis is drafted a system solution of a tram gangway solution including examination of a tram kinematics, necessary draft and strenght calculations and integration of the tram gangway into a tram interior.

Obsah

Seznam zkratek a symbolů 1

1. Úvod 6

1.1 Dělení kolejové dopravy 6

2. Tramvajové trati 7

2.1 Typy tramvajových kolejnic 7

2.2 Rozšíření rozchodu kolejnic 8

2.3 Náhlá změna nedostatku převýšení 9

2.4 Části trati 9

2.4.1 Přímá kolej 9

2.4.2 Oblouk 10

2.4.3 Protisměrný oblouk 10

2.4.4 Přechodnice 11

3. Konstrukce tramvajového vozidla 12

3.1 Obecné konstrukční informace 12

3.2 Základní parametry tramvajového vozidla 12

3.3 Základní systémy a komponenty 15

3.3.1 Vozová skříň 15

3.3.2 Řídící stanoviště 16

3.3.3 Podvozek 17

3.3.4 Klouby 18

3.3.5 Přechodové měchy 20

3.3.6 Spřáhla 20

3.3.7 Podlahy přechodů 24

4. Typy konstrukce tramvajových vozidel 26

4.1 Vozidla s otočnými podvozky 26

4.1.1 Samostatný vůz 26
4.1.2 Částečně nízkopodlažní tramvaj s otočnými hnacími podvozky 27
4.1.3 Nízkopodlažní tramvaj s otočnými Jacobsovými podvozky 28
4.1.4 Nízkopodlažní tramvaje s nesenými články a otočnými podvozky 28
4.2 Vozidla s neotočnými podvozky 29
4.2.1 Částečně nízkopodlažní tramvaj s krátkými články na neotočných podvozcích, mezi nimiž jsou zavěšeny nízkopodlažní články 29
4.2.2 Stoprocentně nízkopodlažní tramvaj s krátkými články na neotočném pojezdu bez náprav, mezi nimiž jsou zavěšeny nízkopodlažní články 29
4.2.3 Stoprocentně nízkopodlažní vozidlo s dlouhými články spojenými klouby, spočívajícími na částečně otočném podvozku bez náprav 30
4.2.4 Stoprocentně nízkopodlažní vozidlo s krátkými články s velmi nízkou podlahou, zavěšenými na portálech s pojezdem s nezávislými koly 30
4.2.5 Stoprocentně nízkopodlažní tramvaj na neotočném pojezdu bez náprav. 31
4.3 Další řešení 31
5. Návrh typového řešení tramvajového vozidla 33
5.1 Parametry a požadavky města 33
5.2 Volba koncepce a základních parametrů jednotky 34
5.3 Dattenblat 35
5.4 Volba základních parametrů mezivozových přechodů 36
6. Vyšetření kinematiky tramvajové jednotky 37
6.1 Stanovení vyšetřovaných poloh pro kinematiku 37
6.2 Vyšetření kinematiky mezivozového přechodu 38
6.2.1 Oblouk 20m 38
6.2.2 Oblouk 500m 38
6.2.3 Protisměrný oblouk (25m x 10,2m x 31,9m) 39
6.2.4 Protisměrný oblouk (28,8m x 10,9m x 28,2m) 39

6.2.5 Protisměrný oblouk (20m x 20m) 40
6.2.6 Stoupání/klesání 80,15 promile (zakružovací oblouk R=300m a zborcená kolej) 40
6.2.7 Přímá kolej (vlnění) 41
6.2.8 Maximální rozsah pohybů kloubů na pražské trati 41
6.2.9 Výsledný průjezdný profil jednotky 42
7. Zástavba mezivozového přechodu 44
7.1 Silové účinky ve spojovacích kloubech a narážkách 44
7.1.1 Výpočet provozních zatěžujících sil 44
7.1.2 Výpočet mezních zatěžujících sil 44
7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách 45
7.2 Spojovací kloub A-B (C-D) 46
7.3 Pojistný kloub A-B (C-D) 51
7.4 Spojovací kloub B-C 55
7.5 Nosný kloub měchu B-C 62
7.6 Narážky A-B (C-D) 67
7.7 Narážky B-C 68
7.8 Přechodový můstek A-B (C-D) a B-C 69
7.9 Krycí měch A-B (C-D) a B-C 70
7.10 Sestavení mezivozového přechodu 70
7.11 Kontrola kolizí 71
7.12 Systémové řešení 74
8. Řešení navazujících částí interiéru 75
8.1 Uchycení 75
8.2 Interiér mezivozového přechodu 76
8.3 Barevná koncepce jednotky a využití přepravního prostoru 76
Závěr 79

Seznam použité literatury 81

Seznam příloh 83

Seznam obrázků 85

Seznam tabulek 88

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Poznámka
2.2 Rozšíření rozchodu kolejnic		
Δu_1	[mm]	Rozšíření rozchodu kolejnice
Δu_2	[mm]	Rozšíření rozchodu kolejnice
R	[m]	Poloměr oblouku
SOK	-	Rovina paty kolejnice
ΔI	[mm]	Náhlý nedostatek převýšení
6.2 Vyšetření kinematiky mezivozového přechodu		
φ_x	[°]	Natočení kloubu kolem osy x
φ_y	[°]	Natočení kloubu kolem osy y
φ_z	[°]	Natočení kloubu kolem osy z
6.2.9 Výsledný průjezdný profil jednotky		
δ_a	[mm]	Rozšíření průjezdného profilu vně oblouku
δ_i	[mm]	Rozšíření průjezdného profilu uvnitř oblouku
6.2.7 Přímá kolej (vlnění)		
v	[km/h]	Cestovní rychlost
λ	[m]	Délka vlny pohybu dvojkolí
γ	[°]	kuželovitost kola
r	[m]	Valivé poloměry kol
s	[m]	Polovina vzdálenosti styčných kružnic
7.1.1 Výpočet provozních zatěžujících sil		
$P_{nápr}$	[kW]	Výkon na nápravě
P_{celk}	[kW]	Celkový výkon jednotky
$n_{nápr}$	[1]	Počet náprav
$\omega_{nápr}$	[rad/s]	Uhlová rychlost náprav
r_{kola_min}	[m]	Poloměr kola minimální
$M_{k_nápr}$	[Nm]	Kroutící moment na nápravě
$T_{nápr}$	[N]	Adhezní síla na nápravě
a_{brz_nouz}	[m·s^{-2}]	Zábrzdné nouzové zpomalení
m_{clanku}	[kg]	Hmotnost jednoho článku jednotky
7.1.2 Výpočet mezních zatěžujících sil		
F_{br}	[N]	Brzdná síla
$F_{br_krajni_stredni}$	[N]	Brzdná síla při nouzovém zpomalení v kloubu AB
$F_{br_stredni_stredni}$	[N]	Brzdná síla při nouzovém zpomalení v kloubu BC
D_{kola_min}	[m]	Průměr kola minimální
7.2 Spojovací kloub A-B (C-D)		
$D_{čepu_AB}$	[mm]	Průměr čepu kloubu AB

$H_{pouzdra_AB}$	[mm]	Výška pouzdra kulového kloubu AB
$L_{otlačná_AB}$	[mm]	Nejmenší otlačná plocha čepu kloubu AB
$N_{šroubů_AB}$	[1]	Počet šroubů v šroubovém poli kloubu AB
D_{p_AB}	[mm]	Vnější průměr pouzdra kulového kloubu AB
$S_{příčky_AB}$	[mm^2]	Plocha příčky nosiče kloubu AB
H_{t2_AB}	[mm]	Výška tělesa 2 kloubu AB
H_{t1_AB}	[mm]	Výška tělesa 1 kloubu AB
R_{zakr1_AB}	[mm]	Zakružovácí poloměr tělesa 1 kloubu AB
R_{zakr2_AB}	[mm]	Zakružovácí poloměr tělesa 2 kloubu AB
$S_{3\ (M20)}$	[mm^2]	Plocha jádra šroubu M20
C_{dyn}	[N]	Dynamická únosnost kulové kloubu
C_{stat}	[N]	Statická únosnost kulového kloubu
F_{AB_C}	[N]	Zátěžná síla kloubu AB v mezním stavu P-5
$K_{kul_kl_AB}$	[1]	Bezpečnost kulového kloubu
$\sigma_{otl_pp_AB}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí pouzdra kulové kloubu AB
F_{AB_p}	[N]	Zátěžná síla kloubu AB od pohonu
$\sigma_{otl_p_AB_c}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí pouzdra kulové kloubu AB
$K_{otl_p_c_AB}$	[1]	Bezpečnost kulového kloubu v otlačení
R_{e_S355}	[Nmm^{-2}]	Mez kluzu materiálu S355
$\sigma_{otl_p_AB}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí čepu kloubu AB od pohonu
$\sigma_{otl_AB_c}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí čepu kloubu AB od síly ve stavu P-5
$K_{otl_c_AB}$	[1]	Bezpečnost v otlačení čepu kloubu AB
$\tau_{strih_AB_p}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí v čepu kloubu AB od provozní síly
$\tau_{strih_AB_c}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí v čepu kloubu AB od síly ve stavu P-5
τ_{s355}	[Nmm^{-2}]	Mez kluzu materiálu ve smyku S355
$K_{strih_c_AB}$	[1]	Bezpečnost ve střihu čepu kloubu AB
$\sigma_{otl_c_AB_t1}$	[Nmm^{-2}]	Napětí v kritickém průřezu tělesa 1 kloubu AB od síly P-5
$K_{otl_c_T1_AB}$	[1]	Bezpečnost kritického průřezu tělesa 1 kloubu AB
$\sigma_{otl_c_AB_t2}$	[Nmm^{-2}]	Napětí v kritickém průřezu tělesa 2 kloubu AB od síly P-5
$K_{otl_c_T2_AB}$	[1]	Bezpečnost kritického průřezu tělesa 2 kloubu AB
M_{utah_AB}	[Nm]	Utahovací moment šroubu M20 v tělese AB
Q_{0_AB}	[N]	Osová síla ve šroubu kloubu AB
$K_{š_AB}$	[1]	Bezpečnost šroubu M20 v kloubu AB
$\sigma_{nosny_teleso_AB_C}$	[Nmm^{-2}]	Napětí v nosném tělese kloubu AB
$k_{teleso_AB_c}$	[Nmm^{-2}]	Bezpečnost nosného tělesa kloubu AB
R_{e_S235}	[Nmm^{-2}]	Mez kluzu materiálu S235

7.3 Pojistný kloub A-B (C-D)

$D_{čepu_AB_h}$	[mm]	Průměr čepu horního kloubu AB
$L_{otlač_AB_h}$	[mm]	Nejmenší otlačná plocha čepu horního kloubu AB

H_{hranik}	[mm]	Výška hraníku
$B_{t_AB_h}$	[mm]	Šířka tělesa horního kloubu AB
$H_{t_AB_h}$	[mm]	Celková výška tělesa horního kloubu AB
B_{hranik}	[mm]	Šířka hraníku
α_{odklon_AB}	[°]	Úhel odklonu článků
$h_{t_AB_h}$	[mm]	Výška tělesa horního kloubu AB
$\sigma_{otl_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí čepu horního kloubu AB
$\tau_{strih_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí v čepu horního kloubu AB
$F_{hr_AB_od}$	[N]	Osová síla v hraníku
$\sigma_{t_hr_AB}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí hraníku horního kloubu AB
$K_{t_hr_AB}$	[1]	Otlačná bezpečnost hraníku horního kloubu AB
$M_{AB_t_oh}$	[Nm]	Ohybový moment působící na horní těleso kloubu AB
$F_{AB_h_pole}$	[N]	Osová síla v horním tělese kloubu AB
$P_{o_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu AB od osového předpětí
$P_{tah_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu AB od osové síly
$P_{ohyb_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu AB od ohybového momentu
$P_{max_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Maximální tlak pod deskou šroubového spoje
$P_{min_h_AB}$	[Nmm^{-2}]	Minimální tlak pod deskou šroubového spoje
$\tau_{t_sv_AB_H}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od osové síly horního kloubu AB
$\tau_{oh_sv_AB_H}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od ohybového momentu horního kloubu AB
$\tau_{r_sv_AB_H}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od příčné síly horního kloubu AB
$\tau_{red_sv_AB_H}$	[Nmm^{-2}]	Redukované smykové napětí horního kloubu AB
$K_{sv_AB_h}$	[1]	Bezpečnost svarového spoje tělesa horního kloubu AB

7.4 Spojovací kloub B-C

$D_{čepu_BC}$	[mm]	Průměr čepu kloubu BC
$H_{pouzdra_BC}$	[mm]	Výška pouzdra kulového kloubu BC
$L_{otlačná_BC}$	[mm]	Nejmenší otlačná plocha čepu kloubu BC
$N_{šroubů_BC}$	[1]	Počet šroubů v šroubovém poli
D_{p_BC}	[mm]	Vnější průměr pouzdra kulového kloubu BC
H_{t2_BC}	[mm]	Výška tělesa 2 kloubu BC
H_{t1_BC}	[mm]	Výška tělesa 1 kloubu BC
R_{zakr1_BC}	[mm]	Zakružovácí poloměr tělesa 1 kloubu BC
R_{zakr2_BC}	[mm]	Zakružovácí poloměr tělesa 2 kloubu BC
$S_{3\ (M20)}$	[mm^2]	Plocha jádra šroubu M20

7.5 Nosný kloub měchu B-C

$P_{o_h_BC}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu BC od osového předpětí
$P_{tah_h_BC}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu BC od osové síly
$P_{ohyb_h_BC}$	[Nmm^{-2}]	Tlak ve šroubu BC od ohybového momentu
$P_{max_h_BC}$	[Nmm^{-2}]	Maximální tlak pod deskou šroubového spoje
$P_{min_h_BC}$	[Nmm^{-2}]	Minimální tlak pod deskou šroubového spoje

$\tau_{t_sv_BC_d}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od osové síly horního kloubu BC tělesa 1
$\tau_{oh_sv_BC_d}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od ohybového momentu horního kloubu BC tělesa 1
$\tau_{r_sv_BC_d}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od příčné síly horního kloubu BC tělesa 1
$\tau_{red_sv_BC_d}$	[Nmm^{-2}]	Redukované smykové napětí horního kloubu BC tělesa 1
$K_{sv_BC_d}$	[1]	Bezpečnost svarového spoje tělesa horního kloubu BC tělesa 1
$\tau_{t_sv_BC_d2}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od osové síly horního kloubu BC tělesa 2
$\tau_{oh_sv_BC_d2}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od ohybového momentu horního kloubu BC tělesa 2
$\tau_{r_sv_BC_d2}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od příčné síly horního kloubu BC tělesa 2
$\tau_{red_sv_BC_d2}$	[Nmm^{-2}]	Redukované smykové napětí horního kloubu BC tělesa 2
$K_{sv_BC_d2}$	[1]	Bezpečnost svarového spoje tělesa horního kloubu BC tělesa 2
$B_{pásu_BC}$	[mm]	Šířka pásu lemniskáty
$H_{pásu_BC}$	[mm]	Výška pásu lemniskáty
D_{ex_bc}	[mm]	Vnější průměr nosné trubky saní
D_{in_bc}	[mm]	Vnitřní průměr nosné trubky saní
L_{otl_l}	[mm]	Otlačná plocha čepu pásu
Z_{nosn_BC}	[mm]	Vzdálenost kulových kloubu lemniskáty
$m_{měch_BC}$	[kg]	Hmotnost přechodového měchu BC
L_{rameno_lem}	[mm]	Délka ramene vedení lemniskáty
D_{cep_l}	[mm]	Průměr spojovacího čepu pásu lemniskáty
$\tau_{t_sv_BC_h}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od osové síly horního kloubu BC
$\tau_{oh_sv_BC_h}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od ohybového momentu horního kloubu BC
$\tau_{r_sv_BC_h}$	[Nmm^{-2}]	Smykové napětí od příčné síly horního kloubu BC
$\tau_{red_sv_BC_h}$	[Nmm^{-2}]	Redukované smykové napětí horního kloubu BC
$K_{sv_BC_h}$	[1]	Bezpečnost svarového spoje tělesa horního kloubu BC
$\sigma_{oh_bc_tr}$	[Nmm^{-2}]	Osové napětí v pasu lemniskáty
$K_{oh_pasu_tr}$	[1]	Bezpečnost pasu lemniskáty
$\sigma_{otl_BC_l}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí spojovacího čepu BC lemniskáty
$\tau_{strih_BC_l}$	[Nmm^{-2}]	Střižné napětí spojovacího čepu BC lemniskáty

7.6 Narážky A-B (C-D)

B_{stojny_AB}	[mm]	Šířka stojny AB
H_{stojny_AB}	[mm]	Výška stojny AB
$\delta_{odklonu}$	[°]	Úhel odklonu stojny od osy narážky AB
N_{stojen_AB}	[1]	Počet stojen narážky AB
F_{AB_stojna}	[N]	Osová síla ve stejně narážky AB
$F_{AB_odklon_stojna}$	[N]	Osová síla v odkloněné stejně narážky AB
$\sigma_{odklon_stojna_ABl}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí spojovacího čepu BC lemniskáty
K_{stojny_AB}	[1]	Bezpečnost pasu lemniskáty

7.7 Narážky B-C

B_{stojny_BC}	[mm]	Šířka stojny BC
H_{stojny_BC}	[mm]	Výška stojny BC
N_{stojen_BC}	[1]	Počet stojen narážky BC
F_{BC_stojna}	[N]	Osová síla ve stejně narážky BC
$\sigma_{odklon_stojna_BC}$	[Nmm^{-2}]	Otlačné napětí spojovacího čepu BC lemniskáty
K_{stojny_BC}	[1]	Bezpečnost pasu lemniskáty

1. Úvod

Základním způsobem pozemní dopravy osob a nákladu je systém kolejové dopravy. Tento systém, skládající se ze čtyř základních subsystémů – RST (vozidla), INS (tratě), ENE (napájení), CCS (řízení a zabezpečení), je navržen a provozován dle příslušných národních a mezinárodních drážních norem, jejichž dodržováním je zajištěn spolehlivý a bezpečný provoz. V České republice jsou základními normami pro železniční systém Zákon o drahách 266/1994 Sb. a Dopravní řád drah – Vyhláška 173/1995 Sb.

Výhodou železničního systému oproti dalším druhům dopravy je nízká spotřeba elektrické energie na jednotku přepravní práce vyplývající z nízké hodnoty odporu valení, vysoká přepravní kapacita při intenzivnějším využití plochy zabrané dopravní cestou, nízká zátěž životního prostředí a vysoká míra bezpečnosti provozu s dosažením vysoké přepravní rychlosti (adhezní kolejová vozidla v běžném provozu až 350 km/h, magnetická vozidla až 550 km/h). Kolejová doprava kromě zajištění meziměstských spojení pomáhá řešit dopravní obslužnost městských aglomerací, kde by jinak musela být značně rozšířena silniční infrastruktura, což by vedlo v historických lokací k nenávratnému poškození, přemístění či zbourání historických budov a komplexů.

1.1 Dělení kolejové dopravy

Kolejová doprava je dle Zákona o drahách 266/1994 Sb. dělena do sedmi základních skupin:

- Dráha tramvajová
- Dráha železniční speciální (metro)
- Dráha železniční celostátní
- Dráha železniční regionální
- Vlečka
- Dráha trolejbusová
- Dráha lanová

Nejrozsáhlejší síť představují dráhy železniční celostátní a regionální, které se z hlediska systému evropských železnic dále dělí na:

- Vysokorychlostní evropský železniční systém (HS)
- Konvenční evropský železniční systém (CR)

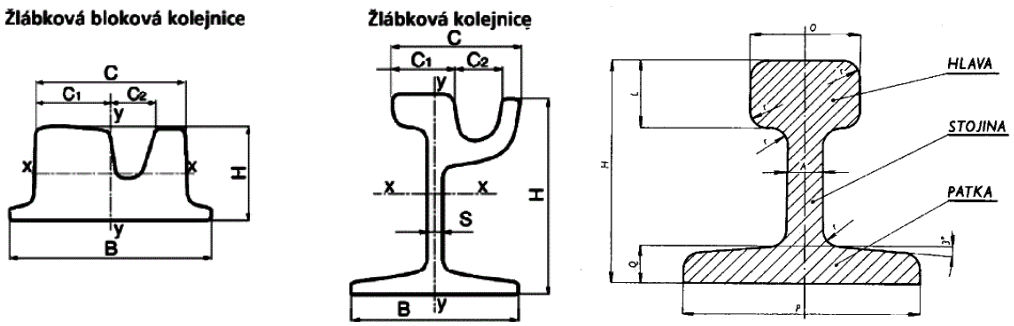
2. Tramvajové trati

Tramvajová trať slouží pro provoz tramvajových vozidel s dovoleným nápravovým zatížením do 11 tun. Sestává z kolejového spodku a kolejového svršku. Spodek tramvajové trati je tvořen zemním tělesem, odvodňovací soustavou, propustmi, opěrnými zárubněmi nebo obkladovými zdmi. Svršek tramvajové trati je tvořen pokladem kolejového svršku, kolejovým svrškem a krytem tramvajové trati. [1]

Hlavní charakteristikou konstrukce kolejové trati je užitý typ konstrukce kolejového svršku (tvar kolejnic a způsob jejich upevnění) a druh podkladu kolejového svršku. Podklad může být vytvořen štěrkovým ložem podsypaným zpravidla stmelenými vrstvami, příčnými pražci, podélnými prahy a pražcovými deskami. Pro snížení hluku lze použít speciální podklady s protihlukovými (protivibračními) matracemi nebo rohožemi. Tramvajová trať je zpravidla opatřena krytem, který musí zamezit přímému prosakování vody do podkladu tramvajové trati a případně umožní pojíždění silničních vozidel po ní. Kryt může být tvořen dlažbou, betonovými bloky, litým betonem, asfaltem nebo vegetací. [1]

2.1 Typy tramvajových kolejnic

Kolejnice je jednou ze základních částí železničního svršku. Přenáší kolovou sílu a absorbuje příčné a podélné síly (rozjezdová a brzdová). Při průjezdu vozidla obloukem přenáší příčnou sílu, tzv. vodící. Zajišťuje hladký pohyb železničního vozidla. Na elektrifikovaných tratích slouží jako vodič zpětného vedení. Tvoří kolejové obvody pro železniční zabezpečovací zařízení. Kolejnice spolu s pražci, upevňovadly a drobným kolejivem tvoří kolejové pole. Kolejové pole v kolejovém loži tvoří železniční svršek. [1]



Obr. 1. *Žlábkové kolejnice [2] / Širokopatní kolejnice [3]*

Pro tramvajové trati se používají tři typy kolejnic – širokopatní, žlábková stojinová a žlábková bloková (viz obr. 1).

Širokopatní je tvarována jako nosník, jehož hmota ve svislém směru je co nejvzdálenější od těžiště, což zaručuje vysokou ohybovou tuhost za přijatelného namáhání jak v příčném, tak v svislém směru. Nejexponovanějšími částmi jsou hlava a pata. Hlava kolejnice je zatěžována svislými, příčnými a podélnými silami, působícími v kontaktu kola s kolejnicí a je v průběhu provozu neustále opotřebována. Dále je namáhána teplotními změnami v průběhu roku.

Žlábková bloková je určena pro tratě, u nichž je rovina temene koleje téměř shodná s rovinou vozovky. Žlábek zaručuje zachování volného prostoru mezi aktivní částí hlavy kolejnice a vozovkou potřebného pro okolek kola. V obloucích se pro zlepšení průjezdnosti používají kolejnice se širším žlábkem. Vzhledem k nízké ohybová tuhosti musí být tento typ kolejnice uložen po celé délce.

Žlábková stojinová je určena pro tratě městských rychlodrah a úseky samostatného tramvajového tělesa, kde není povolena jízda silničních vozidel po kolejovém svršku. Žlábek zaručuje zachování volného prostoru mezi aktivní částí hlavy kolejnice a vozovkou potřebného pro okolek kola. Stojinová verze vytváří pevnější kolejový svršek, má vyšší ohybovou tuhost a zaručuje lepší odvodnění kolejiště. [1]

2.2 Rozšíření rozchodu kolejnic

V kružnicovém oblouku o poloměru menším než 275m musí být normální rozchod koleje zvětšen o hodnotu rozšíření rozchodu koleje Δu dle vzorce (1) kvůli zlepšení průjezdu vozidla obloukem.

$$\Delta u_1 = \frac{7150}{R} - 26 \ldots [mm] \tag{1}$$

Ve zdůvodněných případech a se souhlasem vlastníka infrastruktury pro rychlost do 40 km/h včetně při délce kružnicového oblouku do 50 m včetně lze v obloucích o poloměru 250 m a menších projektovat rozšíření rozchodu koleje dle vzorce:

$$\Delta u_2 = \frac{7000}{R} - 28 \ldots [mm] \tag{2}$$

Oba případy rozšíření rozchodu koleje se realizují posunutím vnitřního kolejnicového pásu ke středu oblouku. Vychází-li hodnota rozšíření rozchodu koleje podle vzorce (1) a (2) větší než 16 mm, projektuje se oblouk s rozšířením rozchodu koleje Δu_{max}=16 mm.

V oblouku se žlábkovými kolejnicemi se rozšíření rozchodu koleje nezřizuje. [4]

2.3 Náhlá změna nedostatku převýšení

Přípustné hodnoty zborcení koleje (náhlého nedostatku převýšení) jsou stanoveny normou ČSN 73 6360 a uvedeny v tab.1.

Tab. 1. Hodnoty náhle změny nedostatky převýšení ΔI [4]

	Hlavní kolej staniční a kolej průběžná traťová			Kolejová spojení a rozvětvení a ostatní koleje		
Rychlost [km/h]	Standartní hodnota (ΔI_n) [mm]	Mezní hodnota (ΔI_{lim}) [mm]	Maximální hodnota (ΔI_{max}) [mm]	Standartní hodnota (ΔI_n) [mm]	Mezní hodnota (ΔI_{lim}) [mm]	Maximální hodnota (ΔI_{max}) [mm]
V≤100	50	85	100	80	100	100
100≤V≤120	40	85	85	60	80	95
120≤V≤170	40	50	60	60	80	80
170≤V≤230	30	40	60	50	60	80

Pro vyšetřovaný případ referenční tramvajové trati platí hodnoty pro rychlost do 100 km/h, tedy první řádek tabulky 1.

2.4 Části trati

Tramvajová trať se skládá z jednotlivých prvků, které kladou na kolejové vozidlo rozdílné požadavky. Základními prvky jsou přímá kolej, oblouk, protisměrný oblouk, přechodnice, které mohou být v rovině, popřípadě v stoupání či klesání. Geometrické uspořádání koleje tramvajových tratí v ČR je normováno dle ČSN 73 6412.

2.4.1 Přímá kolej

Jedná se o nejjednodušší prvek, který je definován jako kolej s nekonečným poloměrem křivosti. Trať by měla být sestavena z co možná nejdelších přímých úseků, protože vozidla zde dosahují bezpečně maximální rychlosti. Nebezpečím při jízdě v přímém úseku je rozvlnění soupravy.

2.4.2 Oblouk

Průjezd obloukem je v dopravě stav, kdy vozidlo mění směr pohybu. Aby mohlo vozidlo zatočit, je nutno zajistit dostatečnou dostředivou sílu. V případě silniční dopravy to znamená dostatečné tření, resp. adhezi mezi koly vozidla a povrchem vozovky, v případě kolejové dopravy zajišťuje vedení kola (resp. dvojkolí) na něm vytvořený okolek. Mezi další opatření, která mají zajistit hladký průjezd obloukem, patří na straně vozidla vhodný návrh konstrukce pojezdu a na straně jízdní dráhy vhodné převýšení a přechodnice. Schopnost vozidla projíždět oblouky o určitém minimálním poloměru je zadaný parametr pro jeho konstrukci. Sjednává se mezi výrobcem a zákazníkem. V České republice je podle Dopravního řádu drah povinně uváděna v technických podmínkách vozidla, a to jednak pro jízdu traťovou rychlostí, jednak pro jízdu za případných omezujících podmínek.

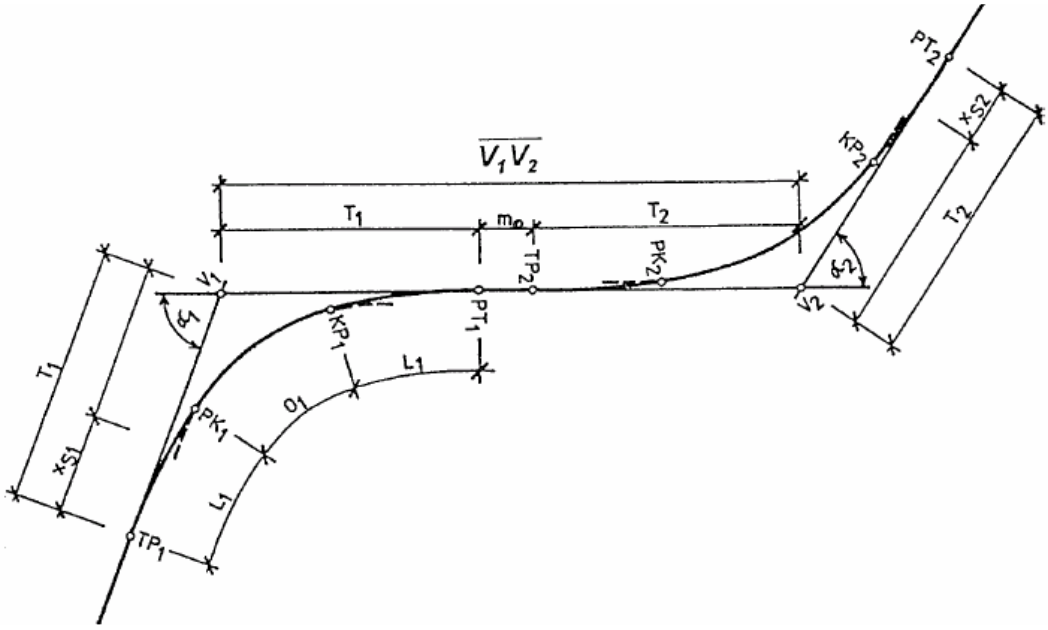
Existují dva základní typy oblouků – prostý kružnicový a kružnicový s přechodnicemi. Použití prostého kružnicového oblouku není vhodné a to zejména z hlediska rychlého nárůstu křivosti. Vhodnější je použití kružnicového oblouku s přechodnicemi. Nárůst křivosti v přechodnici je pozvolnější a pro jízdní geometrii vozidla pohodlnější. [2]

2.4.3 Protisměrný oblouk

Jedná se o dva nebo více na sebe navazujících oblouků, z nichž alespoň jeden má střed křivosti na opačné straně od osy koleje než zbývající oblouky. Názorně viz obr. 2. Klasických příkladem je výhybka. Stejně jako u oblouků klasických existují dva základní typy protisměrných oblouků – bez přechodnic a s přechodnicemi.

Kružnicové protisměrné oblouky bez přechodnic je třeba navrhovat tak, aby mezi nimi byla dostatečně dlouhá mezipřímá podle ČSN 73 6101. Kratší mezipřímou je třeba vyloučit. Mezipřímá je žádoucí pro zabezpečení plynulé jízdy vozidla, aby při jízdě z jednoho do druhého oblouku nedošlo k náhlé změně odstředivého zrychlení, což je dopravně závadné. Při použití protisměrných kružnicových oblouků s přechodnicemi by měla být mezipřímá delší než 15 m, když to není možné, tak mezi protisměrné oblouky vkládáme tzv. vratnou přechodnici, bez mezipřímé. Přechodnice protisměrných kružnicových oblouků se dotýkají v inflexním bodě, v němž mají dvě klotoidy poloměr křivosti $R = \infty$. Parametry obou přechodnic se

mohou lišit, je však žádoucí, aby byly, pokud možno stejné, protože jen v tom případě je přechod příčných rázů (odstředivého zrychlení) zcela plynulý. Podle ČSN 73 6101 poměr jejich parametrů (A2 : A1) nemá být větší jak 1,5 a poměr poloměrů oblouků R2 : R1 se doporučuje menší jak 2, přičemž A2 a R2 jsou větší z hodnot. [5]



Obr. 2. *Protisměrný oblouk [5]*

2.4.4 Přechodnice

Přechodnice je část tratě, ve které trať přechází z přímého směru do oblouku konstantního poloměru, případně přechází z oblouku daného poloměru do oblouku jiného poloměru. Účelem přechodnice je odstranit náraz dostředivé síly vznikající při přechodu tělesa z přímočarého pohybu na kruhový pohyb (průjezdu obloukem), resp. zajistit pozvolný nárůst této síly. Moderní přechodnice nepoužívají ani lineární nárůst křivosti, ale jejich průběh je dále upraven s ohledem na konstrukci vozidel a požadavek na plynulou a měkkou změnu mezi ustálenou polohou vozidla v přímé a v kruhovém oblouku. Přechodnice je zpravidla kombinována se vzestupnicí, to znamená, že v přechodnici se zároveň plynule zvedá vnější kolejnicový pás na hodnotu odpovídající převýšení navazujícího kruhového oblouku. [6]

3. Konstrukce tramvajového vozidla

3.1 Obecné konstrukční informace

Z důvodu historických sporů a nejednotnosti při vytváření tramvajových systémů existuje mnoho typů kolejových rozchodů (od 1435 mm po 1000 mm). Pro každé město je tedy nutné vymýšlet nové nebo upravit stávající řešení, což dále prodražuje zavedení a udržování tramvajové dopravy. Každé město má různé požadavky, různý reliéf, různou kvalitu infrastruktury, což určuje typ vozidla, který může být nasazen.

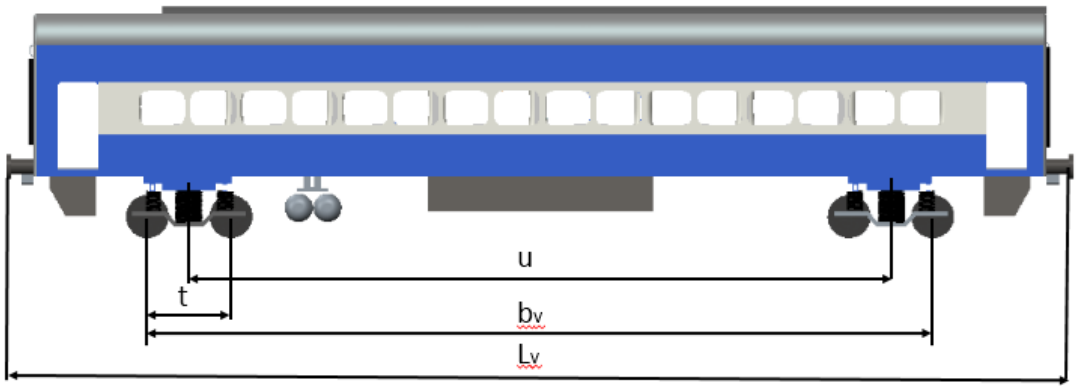
Obecně je pro tramvaj uvažován maximální sklon trati do 80 promile, vzdálenost stanic 0,5 km, traťová rychlost 50 km/h, přípustná hmotnost na dvojkolí do 11 t, napájecí napětí 600 V nebo 750 V, spotřebu energie 100kwh/1000tkm s rekuperací, cestovní rychlost 19 km/h. Tramvaj neobsahuje zabezpečovací zařízení, protože jezdí „na dohled“, což komplikuje zavedení autonomní tramvaje. Konstrukce tramvaje je řízena dle norem UIC, EN, DIN, TL, ČSN a dalších místních předpisů, proto je nutné před návrhem vozidla si místní normy prostudovat.

3.2 Základní parametry tramvajového vozidla

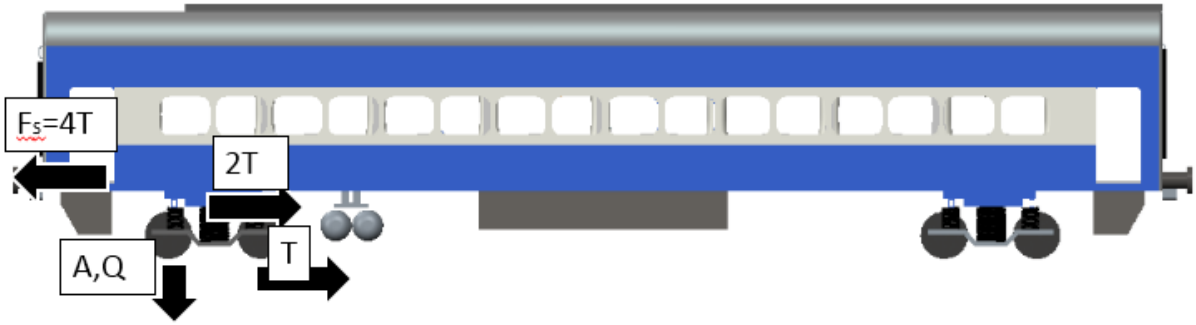
Základní parametry uvedené v tabulkách 2 až 4 charakterizují kolejové vozidlo rozměrově, hmotnostně a dle základních silových účinků na něj. Definují vozidlo dle norem UIC, zaručují spřažitelnost vozidel, tvar průjezdného profilu, chování při průjezdu obloukem, setrvačné momenty, navržení vypružení atd.

Při volbě základních parametrů je nutno brát ohled na účel navrhovaného vozidla, přání a požadavky zákazníka, technické možnosti výroby, parametry trati, na které bude vozidlo provozováno a ekonomickou stránku, protože velké množství parametrů je na sobě závislých a v některých případech jsou i navzájem protichůdné. Při hledání vhodné kombinace těchto parametrů je tedy nutné volit kompromis, který ale nemusí být někdy snadné nalézt, pokud jsou požadované parametry extrémní.

Hlavní kritérium je vždy spokojenost zákazníka.



Obr. 3. *Délkové parametry [1]*



Obr. 4. *Silové účinky [1]*

Tab. 2. Rozměrové parametry [1]

Délka vozidla	**L_v**	Udává celkovou délku vozidla měřenou přes nestlačené nárazníky. V případě použití samočinných spřáhel udává vzdálenost měřenou od svislých os spřahovacích hlav.
Šířka vozidla	**B_v**	Udává maximální šířku vozidla v příčném směru včetně pevných částí přesahujících boční okraj skříně.
Výška vozidla	**H_v**	Pro prázdné vozidlo se zcela novými, jízdou neopotřebenými částmi pojezdu je definována mezi nejvyšší pevnou částí vozidla a SOKem.
Rozvor vozidla	**b_v**	Vzdálenost os dvojkolí či náprav u nepodvozkových vozidel.
Vzdálenost otočných čepů	**u**	U podvozkových vozidel udává vzdálenost svislých os, kolem kterých se podvozky vzhledem ke skříni vozidla otáčejí. U neotočných podvozků udává vzdálenost mezi středy dvou po sobě následujících podvozků.
Rozvor podvozku	**t**	Udává vzdálenost os vnějších náprav podvozků u podvozkového vozidla.
Rozvor sousedních náprav	**t_s**	Udává vzdálenost os vnějších náprav u vícenápravového podvozku nebo nepodvozkového vozidla.
Rozvor vnějších krajních náprav	**t_{ka}**	Udává vzdálenost os vnějších náprav u podvozkových vozidel.
Rozvor vnitřních náprav	**t_{ki}**	Udává vzdálenost os vnitřních náprav u podvozkových vozidel.

Tab. 3. Hmotnostní parametry [1]

Vlastní hmotnost vozidla	m_v	Je hmotnost prázdného vystrojeného vozidla (vozidlo s pohonnou jednotkou a veškerým příslušenstvím a pracovními látkami).
Užitečná hmotnost	$m_{už}$	Udává maximální dovolené zatížení, jímž může být vozidlo zatíženo.
Celková hmotnost vozidla	m_c	Jedná se o součet vlastní a užitečné hmotnosti vozidla.
Jmenovitá hmotnost na nápravu	m_{jn}	Udává příslušnou teoretickou hmotnost připadající na jednu nápravu či dvojkolí.
Skutečná hmotnost na nápravu	m_n	Udává příslušnou skutečnou hmotnost připadající na jednu nápravu či dvojkolí stanovenou zvážením vyrobeného vozidla.
Hmotnost na m délky vozidla	m_l	Stanovuje hmotnost vozidla na 1 m jeho délky.

Tab. 4. Silové účinky [1]

Tíha vozidla	G_v	Udává svislý silový účinek vlastní hmotnosti vozidla na kolejnici.
Užitečné zatížení	$G_{už}$	Je definováno jako součin užitečné hmotnosti vozidla a gravitačního zrychlení.
Celková tíha vozidla	G_c	Udává svislý silový účinek celkové hmotnosti vozidla na kolejnici.
Nápravová síla	**A**	Je definována jako součin hmotnosti na nápravu a gravitačního zrychlení.
Kolová síla	**Q**	Je svislá síla působící mezi kolem a kolejnicí.
Vodící síla	**Y**	Výsledná vnější síla, kterou kolejnice působí v příčném směru na kolo.
Řídící síla	**P**	Je vnější síla, rovnoběžná s osou dvojkolí, kterou kolejnice působí v příčném směru na okolek nabíhajícího kola.
Rámová síla	**H**	Je výslednicí všech příčných vodorovných sil působících na dvojkolí.
Tažná síla na obvodu kol	T_x	Je tečná síla, působící mezi kolem a kolejnicí ve směru rovnoběžném směru jízdy a podle jízdního režimu má charakter hnací nebo brzdné síly.
Síla v podélném vedení ložisek dvojkolí	L_d	Je podélná síla, působící mezi skříní nápravového ložiska a jejím vedením vůči rámu vozidla či podvozku.
Síla ve spojení podvozku se skříní vozidla	F_{ps}	Výsledná podélná síla, vyvozená podvozkem a působící na spojení podvozku a skříně vozidla.
Síla na háku či na nárazníčích	F_s	Výsledná vnější síla, působící na vozidlo na jeho háku či jeho nárazníčích.

3.3 Základní systémy a komponenty

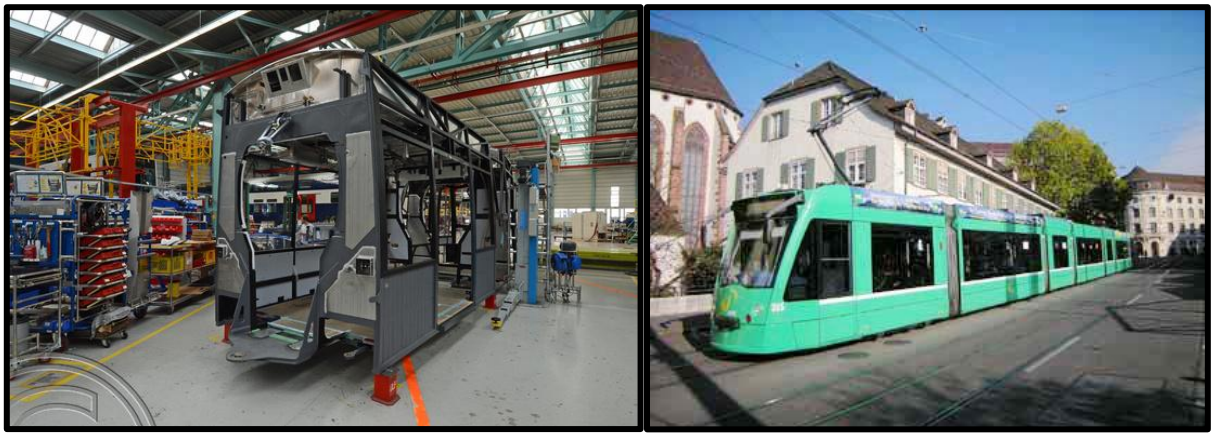
Tramvajové vozidlo je komplexní a složitý celek sestávající z mnoha systémů, subsystémů a komponent, které musí dohromady zajistit požadované výsledné vlastnosti vozidla. Mezi základní konstrukční celky je možné např. uvést:

- Vozová skříň
- Podvozek
- Spřáhla a absorbéry
- Mezivozové přechody
- Izolace, obklady, interiér
- Okna, dveře
- Kabina řidiče
- Ventilace, chlazení, topení, osvětlení
- Trakční pohon, brzdy
- a další

Ty základní jsou rozvedeny v následujících podkapitolách.

3.3.1 Vozová skříň

Skříň vozidla je tvořena bočnicemi, čelnicemi a střechou a v případě řídícího vozu čelnicí pro stanoviště řidiče. Nosnou funkci plní předepjaté vyztužené obložené plechy bočnic a střechy skříně a profilovaný plech podlahy, který přenáší podélné síly.



Obr. 5. *Hrubá stavba tramvajového článku [7] / Combino Basel sestavené ze 4 podvozkových a 3 nesených článků [8]*

Základní materiál pro hrubou stavbu je hliník, který je používán z důvodu požadavku nižší hmotnosti vozidla či jednotky. Nejčastějším typem stavby u moderních vozidel je integrální stavba skříně, kdy tubus skříně je tvořen z malého počtu rozměrných velkoplošných protlačovaných profilů. [1]

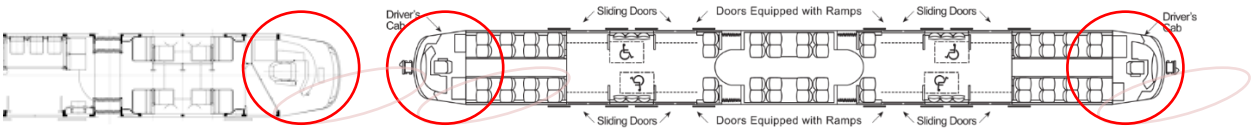
Podrobné požadavky na hrubou stavbu jsou předepsány normami UIC 566, UIC 660, DIN 5510-4, EN 12663-2, EN 15227. Vozová skříň musí dále splňovat normy EN 15227 a GM/RT 2100, které se týkají „crash pevnosti“ vozové skříně. Crash pevnost skříně zajišťuje vyšší šanci na přežití cestujících či dalších účastníků provozu v případě nehody. Tramvajové vozidlo je konstruováno tak, aby pohltilo část deformační energie v prostorech, kde to není nebezpečné cestujícím a zvyšuje tak možnost přežití osoby, která se dostala do kontaktu s tramvají.

Vozová skříň s obložením a dalšími částmi tvoří dohromady celek zvaný článek. Článek je základní stavební jednotky tramvajové jednotky. Článek může být podvozkový nebo nesený. Typ, řazení a počet podvozkových či nesených článků určuje základní vlastnosti celé jednotky – chování při jízdě v monotoním či protisměrném oblouku a v přímém úseku, průjezdnost oblouků s malým poloměrem, zatěžování infrastruktury, stabilitu jednotky, atd.

3.3.2 Řídící stanoviště

Řídící stanoviště je místo určené pro řidiče tramvaje. Vůz nebo souprava může mít stanoviště jedno (v případě jednosměrné soupravy – Siemens Combino) nebo stanoviště dvě umístěné na obou koncích soupravy (Siemens S70 viz obr.6).

Souprava s jedním stanovištěm strojvůdce se na konci své linky otáčí, zatímco u soupravy se dvěma stanovišti stačí přesunutí strojvedoucího z jednoho stanoviště na druhé. Výhodou použití jednoho řídícího stanoviště je zvětšení prostoru pro přepravu cestujících, který může být dále rozšířen v případě použití dveří pouze na jedné straně soupravy (Electron T5L64). Takovéto řešení lze použít pouze v případě, že nástupiště zastávky, ve kterých do/ze soupravy nastupují/vystupují cestující, jsou situovány výhradně na jednu stranu pro jeden směr jízdy. Tímto řešením je snížena hmotnost jednotky.



Obr. 6. *Jednosměrné Combino Erfurt / Obousměrná S70 [9]*

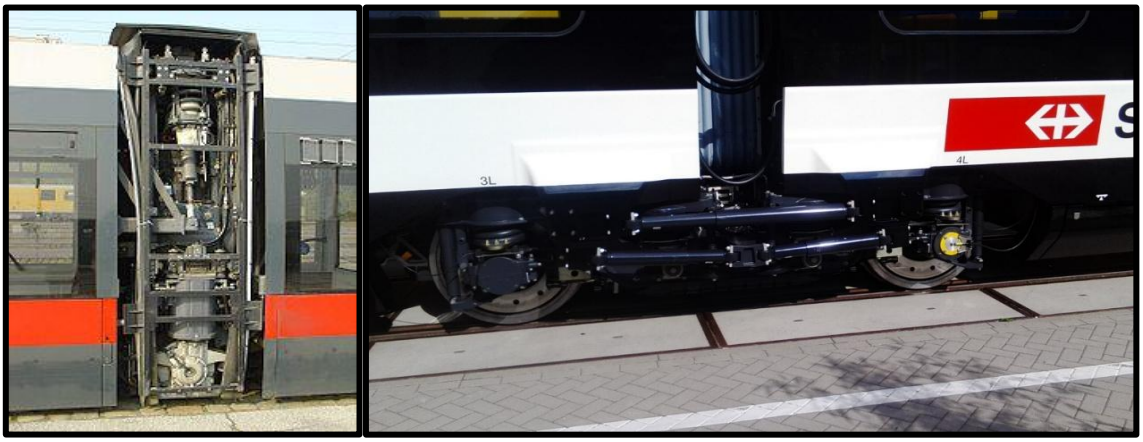
3.3.3 Podvozek

Podvozek u podvozkového vozidla nebo dvojkolí u rámových vozidel tvoří pojezdovou část – pojezd vozidla, který zajišťuje vazbu vozidlo-kolej, tedy nesení, směrové vedení, přenos hnacích a brzdných sil. Jeho hlavní součástí je dvojkolí, které v klasické podobě tvoří dvě ocelová kola spojena tuhou nápravou nebo v případě nízkopodlažního vozidla jsou nesena na čepech portálové nápravy a uložena v nápravových ložiscích (normovány dle UIC 510, UIC 515, UIC 810-1, UIC 812-1, DIN 50049-3.2, TL 918004, TL 918057, TL 918060). Dalšími částmi pojezd vozidel jsou rámy podvozků (normovány dle UIC 505-1, UIC 510-3, UIC 511, UIC 515), součásti pohonné či brzdné soustavy. Rámy podvozků jsou tvořeny z podélníků, příčníků a čelníků a jsou koncipovánu buď jako torzně tuhé nebo torzně poddajné. V případě vícestupňového vypružení je součástí rámu podvozku i druhý stupeň vypružení. Vypružení je normováno dle UIC 517, DIN 2077, DIN 2089, DIN 2096. [1]

Tramvajový podvozek může být otočný nebo pevně spojený se skříní vozidla. Otočný podvozek zabírá větší prostor, je těžší, dražší, brání celonízkopodlažnímu provedení tramvaje, neboť velmi zužuje uličku mezivozového přechodu a u dlouhých jednotek z krátkých článků hrozí větší nebezpečí vlnění v přímém úseku. Mezi jeho výhody patří menší opotřebení infrastruktury, menší namáhání skříně vozidla a větší míra pohodlí pro cestující.

Neotočný podvozek dovoluje nízkopodlažní provedení celé jednotky, větší stabilitu v přímém úseku, nižší celkovou hmotnost, ale zvyšuje namáhání skříně vozidla, infrastruktury a poskytuje menší pohodlí cestujícím kvůli chybějícímu sekundárnímu vypružení. Řešením, jak využít předností obou koncepcí, je dynamicky otočný podvozek – podvozek je ve skříni spojen pružně: moment sil působících mezi podvozkem a skříní je úměrný úhlu natočení podvozku - skříň sleduje natočení podvozku bez rázů a s mírnou prodlevou.

Tramvaj může být řešena i jako bezpodvozková s portálovými nápravami (ULF Wien viz obr.7). Portálové nápravy dovolují velmi nízkou výšku podlahy (až 190 mm). Vypružení je řešeno zástavbou do svislého směru. Jejich nevýhodou je malý počet dvojkolí a tím požadavek na velmi redukovanou hmotnost vozidla a vysoká cena jak podvozku, tak celého vozidla.



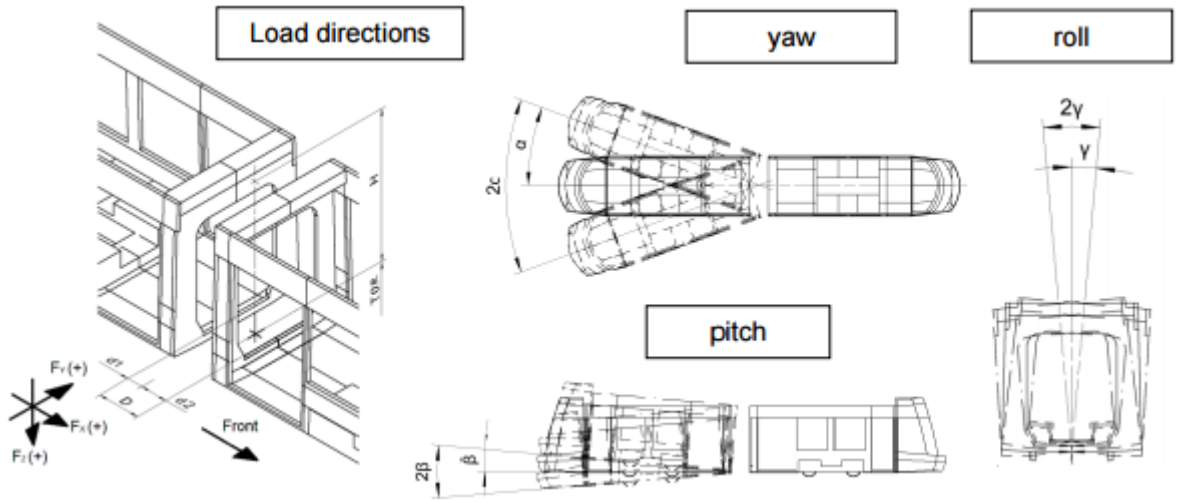
Obr. 7. *Portálová náprava ULF Wien [10] / Jacobsův podvozek [autor]*

Podvozek může nést jeden článek nebo být společný pro více článků (Jacobsův podvozek viz obr.7). Jacobsův podvozek je levnější, jednodušší a lehčí než klasický podvozek, snižuje počet dvojkolí v jednotce a zlepšuje stabilitu vozidla v přímé trati a tím zvyšuje i bezpečnost v případě vykolejení. Nevýhodou je permanentní spojení článků, které může být rozebráno jen v dílnách. Méně dvojkolí znamená vyšší zátěž na ta zbývající. Konstrukce skříni, vzhledem k místě podepření podvozky oproti zatížení, musí být silnější (horší nosník). [11]

3.3.4 Klouby

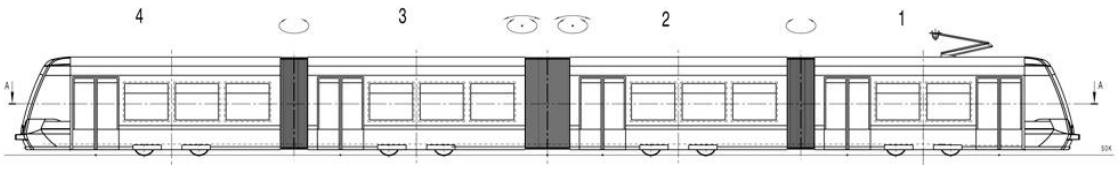
Klouby slouží k otočnému spojení jednotlivých článků tramvajového vozidla. Jsou umístěny na rozhraní článků v místě mezivozového přechodu. Spojení článků může být provedeno jedním kloubem v úrovni podlahy nebo střechy či dvěma klouby. Dále se klouby ve spojení řadí do série kvůli dostatečnému uvolnění spojení článků. Volba typu a počtů kloubů tedy závisí na namáhání spojení a potřebném počtu stupňů volnosti spojení (viz obr. 8).

Klouby jsou citlivým místem konstrukce a je nutno je mazat a chránit proti vniku nečistot. Nejrozšířenějším řešením jsou zapouzdřené kulové klouby s trvalou náplní maziva, u kterých odpadá potřeba doplňování maziva a častého servisu. Toto řešení umožňuje aplikovat jeden univerzální typ kulového kloubu na všechny klouby jednotky a snížit tak výrobní náklady.



Obr. 8. *Typy namáhání kloubu [12]*

Namáhání je závislé na složení jednotky. Jednotka bez nesených článků má klouby namáhané pouze podélně. U jednotky s nesenými články musí klouby přenést i hmotnost samotného neseného článku.

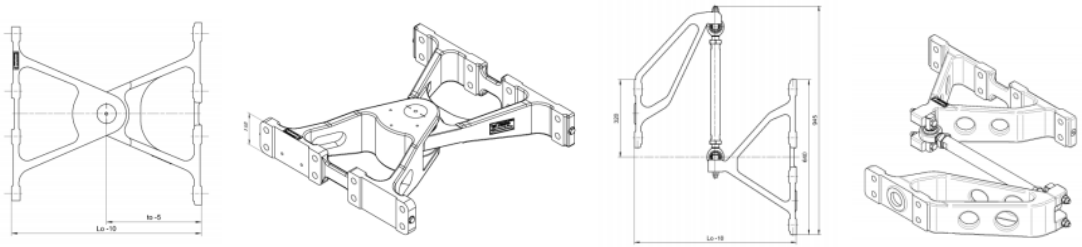


Obr. 9. *Počet stupňů volnosti kloubů [13]*

Pro zajištění potřebného počtu stupňů volnosti se užívají dva základní typy kloubů:

- Kloub s jedním stupněm volnosti – mezi články 4-3 a 2-1 (viz obr. 10)

- Kloub se třemi stupni volnosti – mezi články 2-3 (viz obr. 10)



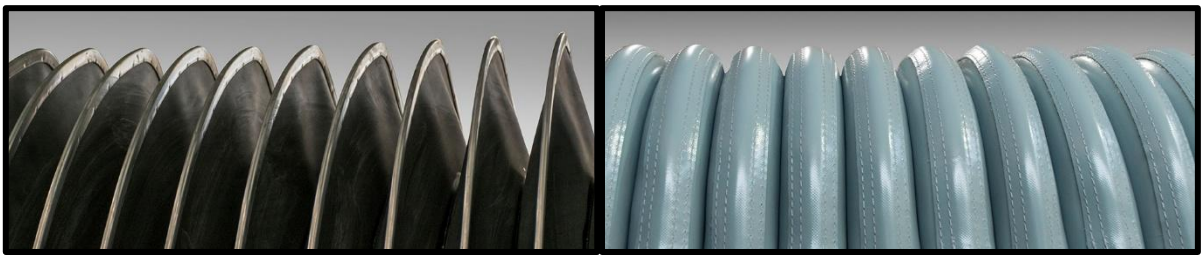
Obr. 10. *Kloub s jedním stupněm volnosti [12] / Kloub se třemi stupni volnosti [12]*

Pro určení potřebných stupňů volnosti platí, že jednotka musí být dostatečně uvolněna, aby se do konstrukce nevnášela přídavná zatížení a vozidlo mohlo být bezpečně provozováno na požadované trati. Nedostatečné uvolnění spojení článků vede ke zvýšenému namáhání skříně vozidla, popřípadě zlomení jednotky v oblouku.

3.3.5 Přechodové měchy

Přechodové měchy zajišťují zakrytí mezivozového přechodu železničního vozidla. Jejich účel je zamezit průniku vlivů počasí či prostředí do prostoru přepravy cestujících a poškození vnitřních komponent a mechanismů. Je vyvinuto velké množství typových řešení, které splňují parametry ochrany, pohyblivosti, hmotnosti, hladiny hluku atp.

Samotná konstrukce měchů využívá nýtového konfigurace z kůže s výztuží z protlačovaných hliníkových profilů. Ostatní části jsou tvořeny z tkaniny potažené z obou stran elastomerem (např.: polyvinylchloridem - PVC) či termoplastem nebo kaučukem či silikonem. Jsou spojeny lepidlem nebo šitím a nakonec zesílené okolo vnějšího obrysu zvlnění pomocí hliníkových profilů, které jsou ohnuty do příslušného tvaru a na něž je tkanina upnuta. Tepelná odolnost je od -40°C do 80°C. [14]



Obr. 11. *Přechodový měch typu Faltenbalg [15] / Přechodový měch typu Wellenbalg [15]*

Rozlišují se dva základní typy měchů – Faltenbalg a Wellenbalg (obr. 11). Faltenbalg je velmi levný s jednoduchou konstrukcí. Wellenbalg dobře odhlučňuje, lépe tepelně izoluje a je tlakově těsný a tlaku odolný. Pro tramvajová vozidla se používají přechodové měchy dvouvrstvé, které lépe splňují podmínky nepropustnosti a zvukotěsnosti. Konstrukce měchů musí splňovat normy UIC 561, GM/RT 2100, DIN EN 16286, požární bezpečnost DIN 45545 a další.

3.3.6 Spřáhla

Spřáhla zajišťují spojení dvou či více vozidel či jednotek dohromady. Spojení spřáhel je naprosto pevné, bez vzájemných pohybů ve svislém směru, což přispívá ke klidnému chodu vlakové soupravy. Spřáhla přenášejí tažné i tlačné síly. Uložení spřáhel umožňuje nejen výkyv do stran, ale i ve svislém směru pro vyrovnání nestejné výšky spřáhel a svislých pohybů vozidel během jízdy. Mezi soupravami se používají automatická spřáhla, mezi vozy jednotky semipermanentní spřáhla, které je nutno pro rozpojení rozmontovat v dílně.

Základní části spřáhla jsou hlava (oddělovací zařízení, vývody tlakového vzduchu, vyhřívání hlavy, kabelové propojení), nárazník (deformovatelná trubka, hydrostatický nárazník, plyno-kapalinový tlumič) a ložiska-centrování (EFG, kulové ložisko, ochrana proti přetížení).

Automatická spřáhla

Typ Scharfenberg

Nespojené spřáhlo je pružnými prvky drženo v ose vozidla. V podélném směru je spřáhlo odpružené, u novějších variant zpravidla s tlumičem. Toto odpružení pohlcuje energii vozidel při spojování. Při spojování vozidel mohou být spřáhla vzájemně přesazena - uvádí se až 370 mm vodorovně a 140 mm svisle. Rychlost spojování není stanovena jednotně, obecně se uvádí rychlost pomalé chůze - do 2 km/h, v praxi se najíždí raději pomaleji. Ke hrubému srovnání spřáhel slouží naváděcí tyče ve spodní části a k jemnému navedení slouží kuželová část kolem táhla, která se zasune do otvoru druhého spřáhla (obě součásti viditelné na obr. 12). Čelo kuželové části přitom stlačí nárazník (název součásti uvnitř spřáhla) a dojde k odjištění táhla srdcovky. Čep na konci spojovacího táhla je v tomto okamžiku ve vybrání otočné části - srdcovky a pružina otočí srdcovku se zaklesnutým táhlem do spojené polohy. Rozpojování se děje pneumaticky, elektricky nebo ručně. Srdcovka se přetočí do rozpojené polohy, zajistí a vozidla mohou od sebe odjet.

Obr. 12. *Spřáhlo sharfenberg [16]*

Jednopolohový mechanismus

U jednopolohového mechanismu je pouze jedna stabilní pozice u spojeného i rozpojeného spřáhla. Při spojování se nejprve druhým spřáhlem stlačí spojovací táhlo; tím se zároveň natáčí srdcovka do spojovací pozice. V okamžiku, kdy čep táhla zapadne do vybrání v srdcovce, pružiny vrátí srdcovky do výchozí polohy a spřáhla jsou spojena. Pružiny zajišťují spřáhla proti rozpojení. Vybrání v srdcovce a čep spojující ve spřáhle táhlo se srdcovkou jsou umístěny tak, aby srdcovka byla v rovnováze.

Obr. 13. *Spřahování u jednopolohového mechanismu [17]*

Dvoupolohový mechanismus

Oproti jednopolohovému mechanismu se zde rozlišuje spojená a rozpojená poloha. V rozpojené poloze jsou srdcovky natočeny tak, že spojovací čep téměř nevyčuhuje z naváděcího kužele. V této poloze je mechanismus zajištěn západkovou tyčí, která vyčnívá na boku hlavy spřáhla. Při spojování zatlačí kužel druhého spřáhla na nárazník, dojde k vyvléknutí západkové tyče a pružiny natočí srdcovky do spojené pozice. Západkovou tyč lze na boku hlavy uvolnit i ručně. Při rozpojování je přemožena síla pružin, srdcovky se natočí do rozpojené pozice a západková tyč je samočinně v této pozici zajistí.

Typ Tomlinson

Spřáhlo Tomlinson bylo vyvinuto firmou Ohio brass company a je nejrozšířenějším typem automatického spřáhla v Severní Americe. Je složeno ze dvou čtvercových ocelových háků, které při spojení do sebe zapadnou. Spřáhlo obsahuje nad a pod hákem vedení stlačeného vzduchu. Je používáno u klasických železničních jednotek, jednotek metra, vysokorychlostních souprav a tramvají.

Obr. 14. *Spřáhlo Tomlinson [18] / Typ BSI Compact [18]*

Typ BSI Compact

Tento typ je rozšířen u vozidel provozovaných ve Spojeném království. Hlava spřáhla plní funkci jak táhla, tak nárazníku, tak že nárazníky nejsou potřeba. Hlava spřáhla obsahuje i elektrické a vzduchové vedení. Hlavy spřáhel při spřažení jsou pevně zafixovány a veškeré pohyby v spřáhle jsou umožněny pouze na pivotu.

Typ Tightlock H

Tento typ má univerzální použití. Při spřaženém spřáhlu je mezi hlavami spřáhel zamezeno všem pohybům. Všechny vertikální, horizontální a podélné pohyby jsou umožněny na pivotu. Spřažení je dosaženo kontaktem, pohybuje-li se jedno vozidlo směrem k jinému při nízké rychlosti a alespoň jedno koleno je v otevřené poloze. Rozpojení je řešeno automaticky, ale lze jej provést i manuálně. Spojení vozidel v obloucích a vozidel různých výšek je ulehčeno vodícími křídélky. Hlava spřáhla obsahuje elektrické a pneumatické vedení.

Typ Albert

Tento typ spřáhla byl dříve využíván pro klasické spojení jednotek. Dnes se využívá pro svou jednoduchost, nízkou cenu a váhu jako nouzové spřáhlo po odtažení nepojízdné jednotky.

Obr. 15. *Typ Albert [18]*

Semipermanentní spřáhla

Existuje mnoho různých typů, jejichž použití je závislé na typu vozidla, výrobci a datu výroby. Jako každý typ rozhraní je kompatibilní pouze s ostatními vozidly vybavenými identickou vazbou. Většina zařízení, kromě detailu konstrukce hlavy spřáhla, odpovídá automatickému koncovému spřáhlu. Některé druhy těchto spřáhel proto nesou pneumatické a elektrické komunikace mezi vozidly.

Swinghead

Nejrozšířenějším typem je typ Swinghead 10A profile AAR na otočném kloubu, který může být vyosen pro spřažení se hákovým spřáhlem dle UIC. Toto spřáhlo velmi dobře tlumí podélné rázy a zaručuje rychlou a snadnou spřažitelnost při zachování kompatibility se hákovým spřáhlem. Tento typ neobsahuje vzduchové a elektrické vedení. [19]

Pro konstrukci spřáhel platí normy DIN EN 12663-1 (namáhání), DIN 25201-2.

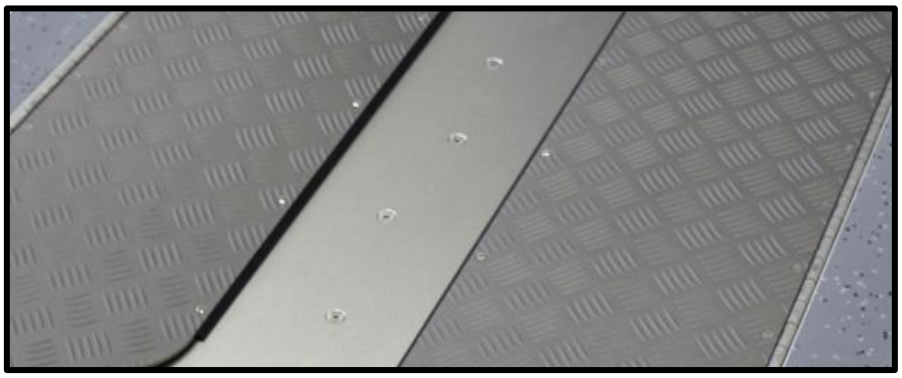
3.3.7 Podlahy přechodů

V tramvajovém mezivozovém přechodu zajišťují zakrytí kloubu a možnost přesunu cestujících mezi vozy. Přechody mohou být koncipovány jako jednodílné, dvoudílné či vícedílné. Jednodílné jsou levnější, ale komplikují rozpojení vozů. Samotný můstek pro přechod cestujících může být klasický přechodový nebo článkový.

Přechodový můstek

Základní částí je lávka, která sestává z kloubového podlahového prvku s otočnou deskou. Standardní model je vybaven protiskluzovou deskou. Povrch je vyroben z eloxovaného hliníku, který je extrémně odolný proti opotřebení a šachovnicový povrch mu dává výborné neklouzavé vlastnosti. Další výhodou eloxovaného hliníku je vysoká odolnost proti korozi a odolnost proti oděru. Můstek může být jednodílný nebo dělený do sekcí.

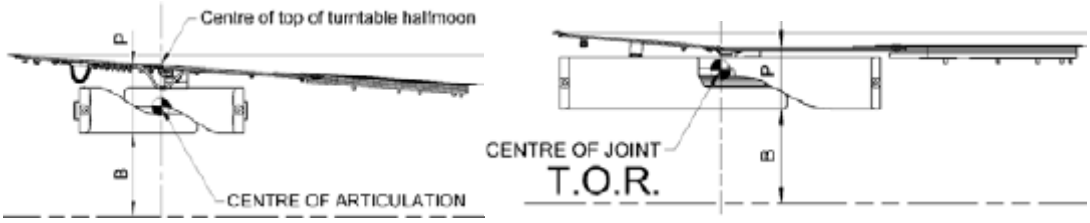
Obr. 16. *Otočné desky na dvojitém kloubu [20]*



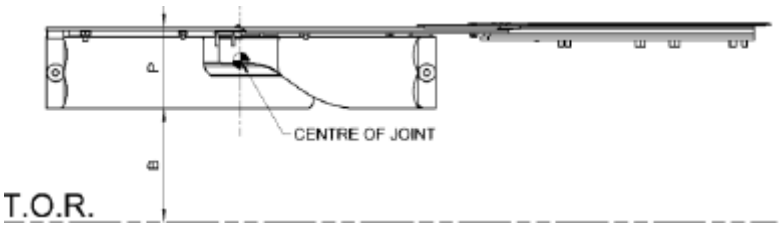
Obr. 17. *Článkový můstek [20]*

Článkový můstek

Sestává z panelů navzájem se překrývajících a pohyblivě uložených. Můžou být jak vodorovné (viz obr. 19) tak zkosené (viz obr. 18), což umožňuje otočné spojení článků s různou výškou podlahy.



Obr. 18. *Skloněné provedení / Provedení se zlomem [12]*



Obr. 19. *Rovinné provedení [12]*

4. Typy konstrukce tramvajových vozidel

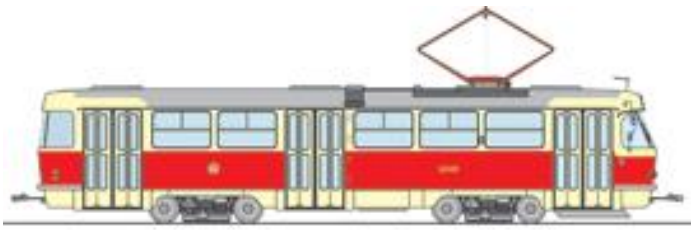
Konstrukce tramvajových vozidel mohou být rozděleny podle rozsáhlého množství kritérií. Pro rozdělení typů konstrukce jsou zvoleny za nejdůležitější kritéria typ použitého podvozku (otočný vs. neotočný), který určuje většinu dalších vlastností tramvajového vozidla a podíl nízkopodlažnosti, který je žádaný cestujícími a dopravními podniky.

4.1 Vozidla s otočnými podvozky

Přítomnosti nízkopodlažního oddílu, jehož přítomnost či absence je z pohledu cestujícího nejdůležitějším kritériem na konstrukci tramvajového vozidla z důvodu pohodlí nástupu do vozidla a výstupu z něj, není u starších typů těchto vozidel pravidlem. U nových vozidel s otočnými podvozky není lehké splnit vnitřní bezbariérovost právě kvůli otočným podvozkům, které zabírají velký prostor, popřípadě pokud jsou použity otočné jacobsovy podvozky, tak vzniká velmi úzká ulička v mezivozovém přechodu. Výhodou otočných podvozků je větší obratnost, menší namáhání skříně vozu a infrastruktury. Nevýhodou je vyšší cena, hmotnost a velký zástavbový prostor.

4.1.1 Samostatný vůz

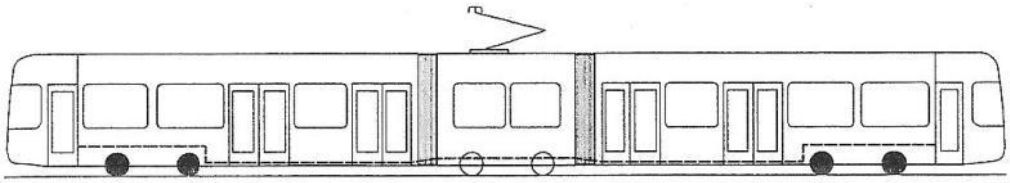
Jedná se o starší typy tramvajových vozidel, které nemají nízkopodlažní oddíl pro cestující na vozíku, kočárky a lidi s omezenou pohyblivostí. V dnešní době se již nevyrábí a stávající vozidla vyrobená v modifikaci bez nízkopodlažního oddílu jsou někdy přestavována na vozidla s nízkopodlažním oddílem. Pro nás nejznámějším zástupcem je Tatra T3 viz obr. 25 a její nízkopodlažní úprava Tatra T3R.PLF. Tento typ řešení konstrukce samostatného vozidla s dvěma podvozky již není dál rozvíjen. Byl nahrazen tramvajovými jednotkami, které svými parametry lépe splňují požadavky na vozidlo městské hromadné dopravy cestujících.



Obr. 20. *Tatra T3 [21]*

Výhody	Nevýhody
Jednoduchý konstrukce s nízko položeným těžištěm (vysoká stabilita)	Ve spřažené soupravě se veze nevyužité mrtvé místo (neobsazená stanoviště řidičů)
Přívětivé chování k infrastruktuře, průjezdnost oblouků o malém poloměru	Absence nízkopodlažního oddílu (nepohodlné, delší nástupní a výstupní časy a z toho plynoucí nižší cestovní rychlost)
Celistvý interiér bez vnitřních rozdělovacích prvků	Absence mezivozového přechodu (neprůchodnost mezi vozy)

4.1.2 Částečně nízkopodlažní tramvaj s otočnými hnacími podvozky

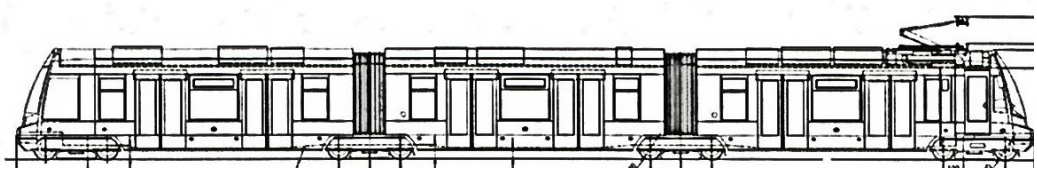


Obr. 21. *Schéma uspořádání pojezdu prvních nízkopodlažních tramvají pro Grenoble [22]*

Tento typ byl používán zpočátku místo tradičních podvozkových vozů, protože svými parametry zachoval možnost průjezdu ostrých oblouků, které ve městech, kde tramvajové trati vedou trasou původní koněspřežné pouliční dráhy nebo kde se při stavbě s ohledem na historické okolní budovy či jiné omezující podmínky, nemůžou stavět oblouky o větších poloměrech s přechodnicemi pro plynulou jízdu. Schody v interiéru znamenají nižší komfort pro cestující a složitější členění interiéru vozidla.

Výhody	Nevýhody
Ucelená jednotka s nízkopodlažním oddílem	Schody v interiéru (není vnitřně bezbariérová)
Vlídnost k infrastruktuře (malý úhel náběhu)	Dveře u řidiče nejsou nízkopodlažní (zpomalení výstupu a nástupu a tím i snížení cestovní rychlosti)
Průchodnost malými oblouky	Není modulární

4.1.3 Nízkopodlažní tramvaj s otočnými Jacobsovými podvozky

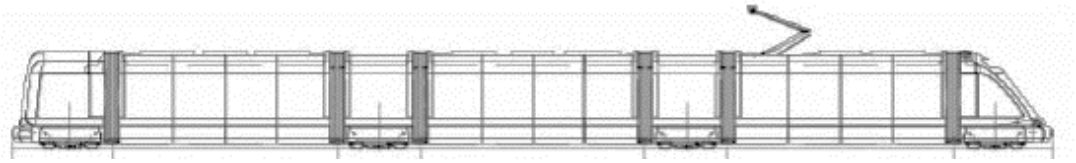


Obr. 22. *Škoda for city 15T [23]*

Celonízkopodlažní jednotka bez schodů v interiéru. Je schopná projíždět oblouky s malým poloměrem a lze ji konstrukčně libovolně prodlužovat. Články kvůli umístění podvozků jsou vyztuženy, což vzhledem k limitu nápravového zatížení vede k velkému počtu podvozků na délku tramvaje.

Výhody	Nevýhody
Snadná a rychlá výměna cestujících (vyšší cestovní rychlost)	Střednědlouhé a těžké články (větší počet podvozků na jednotku délky)
Vlídnost k infrastruktuře (malý úhel náběhu), Průchodnost malými oblouky	Úzká ulička mezivozového přechodu
Vnitřní i vnější bezbariérovost	Členěný interiér

4.1.4 Nízkopodlažní tramvaje s nesenými články a otočnými podvozky



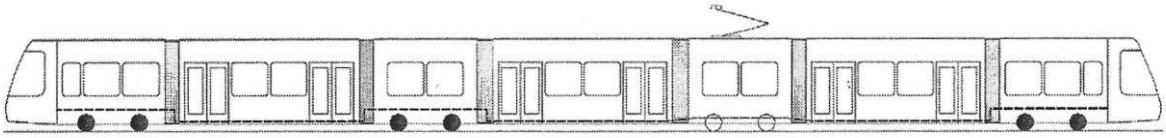
Obr. 23. *Flexity Milan [24]*

Bombardier Flexity Outlook tramvaj pro Milán byl navržen pro bezpečný a ekonomický provoz veřejné dopravy, jakož i pro další zlepšení každodenního dopravního toku. Navíc tento jednosměrný vozidla snižuje spotřebu energie v důsledku výrazného snížení hmotnosti a použitím rekuperace. Průjezdností obloukem o poloměru 18 metrů usnadňuje manévrování ulicemi Milána. Se 350 mm je zaručen vstup výška hladký přenos cestující i pro lidi s kočárky nebo těžkými zavazadly. [24]

Výhody	Nevýhody
Snadná a rychlá výměna cestujících (vyšší cestovní rychlost)	Velké množství drahých a těžkých otočných podvozků a přechodů
Vlídnost k infrastruktuře (malý úhel náběhu), Průchodnost malými oblouky	Koncový článek slouží jako podpora bez odpovídající kapacity
Vnitřní i vnější bezbariérovost	Značná členitost interiéru (nižší kapacita)

4.2 Vozidla s neotočnými podvozky

4.2.1 Částečně nízkopodlažní tramvaj s krátkými články na neotočných podvozcích, mezi nimiž jsou zavěšeny nízkopodlažní články

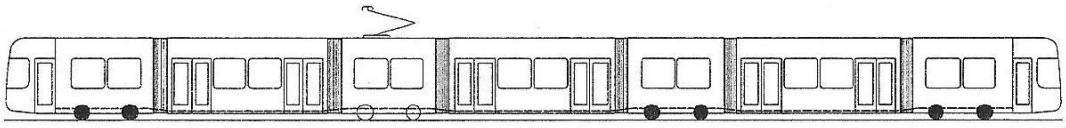


Obr. 24. *Schéma uspořádání pojezdu sedmičlánkové tramvaje NGT8DD [22]*

Skupina, která je vhodná pro kvalitní nové tratě spíše rychlodrážního charakteru (bez prudkých oblouků). Na tratích v uliční síti zvyšují opotřebení kol i kolejnic z důvodu většího rozestupu pojezdů a vyšší počet kloubových spojení znamená vyšší náklady na údržbu. Tento typ je používaný pro svou relativní jednoduchost, což vede k velkému množství variant uspořádání jednotky.

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá a univerzální konstrukce	Velké množství pojezdů a přechodů (náročná údržba)
Velkokapacitní	Není vnitřně bezbariérová
Vysoká cestovní rychlost	Nepřívětivá vůči infrastruktuře (velký úhel náběhu), neprůjezdnost oblouky s malým poloměrem

4.2.2 Stoprocentně nízkopodlažní tramvaj s krátkými články na neotočném pojezdu bez náprav, mezi nimiž jsou zavěšeny nízkopodlažní články

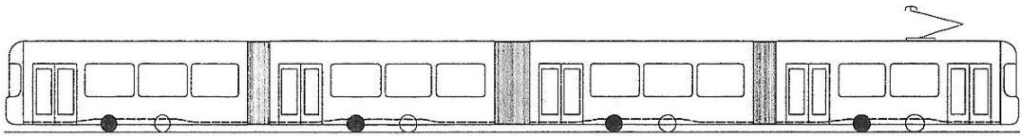


Obr. 25. *Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje s krátkými nosnými články s beznápravovými podvozky [22]*

Tato skupina je modifikací předchozí skupiny. Má stejné nevýhody, avšak odstraněním schodů v interiéru se zjednodušil a zpřístupnil vnitřní prostor jednotky. Jedná se o tramvaje bez klasických náprav. Vyžadují velmi kvalitní tratě s dokonalou geometrií kolejnic.

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá a univerzální konstrukce	Velké množství pojezdů a přechodů (náročná údržba)
Velkokapacitní, nízkopodlažní	Velmi namáhané pojezdové články
Vysoká cestovní rychlost	Nepřívětivá vůči infrastruktuře (velký úhel náběhu), neprůjezdnost oblouky s malým poloměrem

4.2.3 Stoprocentně nízkopodlažní vozidlo s dlouhými články spojenými klouby, spočívajícími na částečně otočném podvozku bez náprav

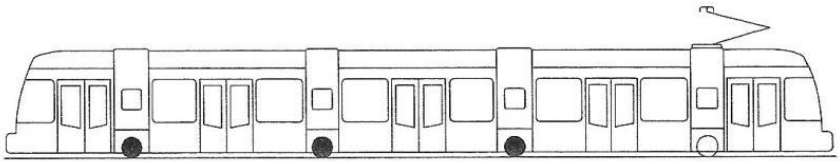


Obr. 26. *Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje GT8N [22]*

Pro tuto skupinu bylo potřeba dořešit kinematiku při vjezdu/výjezdu do/z oblouku a stabilizaci článků při jízdě vyšší rychlostí na přímé trati (vlnění jednotky). Nevýhodou je úzká ulička mezi částečně otočnými podvozky). Jedná se o tramvaje bez klasických náprav. Vyžadují velmi kvalitní tratě s dokonalou geometrií kolejnic.

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá a univerzální konstrukce	Velké množství pojezdů a přechodů (náročná údržba)
Velkokapacitní, nízkopodlažní	Složitý a členitý interiér
Vysoká cestovní rychlost, Průjezdnost malými oblouky	Nepřívětivá vůči infrastruktuře (velký úhel náběhu)
Malé namáhání spojovacích kloubů	Nižší komfort jízdy

4.2.4 Stoprocentně nízkopodlažní vozidlo s krátkými články s velmi nízkou podlahou, zavěšenými na portálech s pojezdem s nezávislými koly

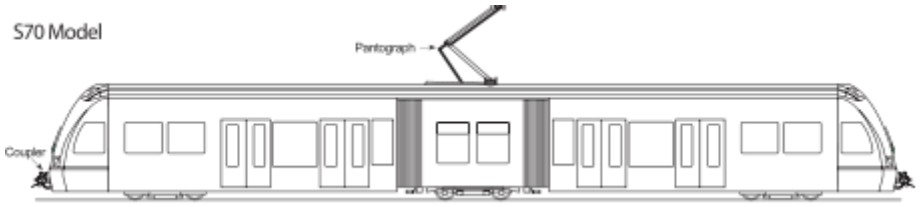


Obr. 27. *Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje ULF [22]*

Skupina ULF (Ultra Low Floor) je použita ve Vídni či v Oradee. Hlavním rysem je nízko položená podlaha (190 mm nad temenem kolejnice), která poskytuje dokonalý přístup do/z vozidla. Jedná se o tramvaje bez klasických náprav. Vyžadují velmi kvalitní tratě s dokonalou geometrií kolejnic.

Výhody	Nevýhody
Nízkopodlažní, vysoká cestovní rychlost	Drahé na pořízení i provoz
Ucelený interiér, Vysoký komfort cestovní (nízká nástupní výška)	Vyžaduje velmi kvalitní tratě
Průchodnost oblouky s malým poloměrem	Malý počet náprav (nutná velká úspora hmotnosti)

4.2.5 Stoprocentně nízkopodlažní tramvaj na neotočném pojezdu bez náprav



Obr. 28. *S70 [13]*

Tento typ je obdobou ucelené jednotky s otočnými podvozky. Odstraněním otočných podvozků je dosaženo nízké podlahy po celé délce vozidla.

Výhody	Nevýhody
Ucelená jednotka s nízkopodlažním oddílem	Při spřažení vozí mrtvý prostor
Průchodnost malými oblouky	Nižší komfort jízdy pro cestující

4.3 Další řešení

Jelikož ve státech ani městech nejsou tramvajové tratě unifikované, tak vznikla celá řada konstrukčních řešení tramvajových vozidel jak nízkopodlažních, tak částečně nízkopodlažních. Jejich výhody či nevýhody jsou typově stejné jako u předchozích skupin.

- Ucelené krátké jednotky se nedají univerzálně prodlužovat.
- Neotočné podvozky snižují komfort jízdy / otočné zvyšují.
- Neotočné podvozky zvyšují nároky na kvalitu infrastruktury a snižují průchodnost oblouky s malým poloměrem / otočné snižují, zvyšují.
- Jednotky s nesenými články jsou univerzální na délku, ale zvyšující počet článků, podvozků a přechodů zvyšuje cenu údržby a zvyšuje pravděpodobnost poruchy.
- Jacobsovy podvozky snižují množství podvozků, ale zvyšují nároky na pevnost článků a snížení jejich hmotnosti.
- Velmi členitý interiér snižuje přehlednost a kapacitu.
- U vozidel s větším množstvím kloubových spojení musí být dbáno, aby se dané vozidlo během jízdy nezlomilo. Musí mít tedy správný počet stupňů volnosti v kloubech, kdy platí, že na každém lichém/sudém kloubu musí být daný počet stupňů volnosti o jeden vyšší než a sudém/lichém kloubu.

Obr. 29. *Koncepce vícečlánkových tramvají [22]*

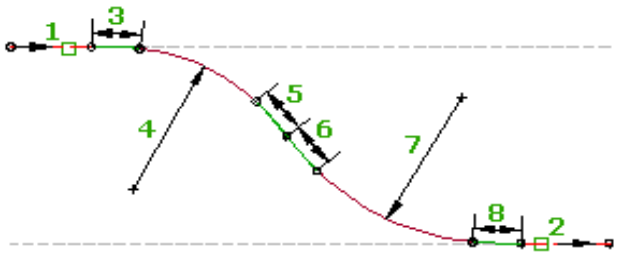
5. Návrh typového řešení tramvajového vozidla

5.1 Parametry a požadavky města

Návrh typového řešení tramvajového vozidla je proveden pro město Praha o následujících parametrech a s následujícími požadavky (viz tab. 5).

Tab. 5. Parametry města Praha

Parametr	Hodnota
Počet obyvatel (k 30.9.2016)	1 276 000
Typ systému	Páteřní systém společně s metrem
Poloha (klima)	Středomořské (-20°C do 40°C)
Nejmenší výška nástupiště	Nástup z úrovně vozovky
Obrat	Koncový okruh
Max. délka jednotky	40m
Minimální poloměr průjezdného horizontálního/vertikálního oblouku	20m/300m
Průjezd protisměrným obloukem o parametrech – R1xL(mezipřímá)xR2	1) 25m x 10,2m x 31,9m (obr. 30) 2) 28,8m x 10,9m x 28,2m (obr. 30)
Průjezd protisměrným obloukem bez mezipřímě o parametrech R1 x R2	20m x 20m (obr. 30)
Stoupání/klesání	80,15 promile
Stav infrastruktury	Modernizovaná, pravidelně udržovaná
Požadovaná přepravní kapacita jednotky	200os/jednotka
Rozchod	1435mm
Průjezdný profil	ČSN 280312
Průměrná vzdálenost stanic	0,5km
Zvláštní požadavky města	
100% nízkopodlažnost vnější i vnitřní	
- **Protisměrný oblouk s mezipřímou obsahuje členy 1 až 8** - **Protisměrný oblouk bez mezipřímé neobsahuje členy 5 a 6**	



Obr. 30. *Schéma protisměrného oblouku*

5.2 Volba koncepce a základních parametrů jednotky

Dle rešerše je zvolena koncepce 4.2.3 Stoprocentně nízkopodlažní vozidlo s dlouhými články spojenými klouby, spočívajícími na částečně otočném podvozku bez náprav. Koncepce je přizpůsobena požadavkům města a parametrům tratě zvětšením počtu nástupních/výstupních dveří a změnou geometrických specifikací článků.

Hnacími nápravami jsou každé dvě na prvním, druhém a čtvrtém článku. Podvozky jsou otočné s nezávislými koly. Kloubová spojení mezi jednotlivými články jsou zvolena mezi prvním a druhým článkem a třetím a čtvrtým článkem jeden kloub se třemi stupni volnosti. Mezi druhým a třetím článkem jsou zvoleny dva sériově řazené klouby se třemi stupni volnosti pro dostatečné rozvolnění jednotky a zajištění průjezdu tratí. Všechny spojovací klouby v rovině podlahy jednotky jsou zvoleny shodné z důvodu úspory nákladů.

Pro správnou funkci jednotky jsou doplněny klouby mezi prvním a druhým článkem a třetím a čtvrtým článkem o horní kloub omezující rozsah kývání článku o 2° na každou stranu od svislé roviny jednotky.

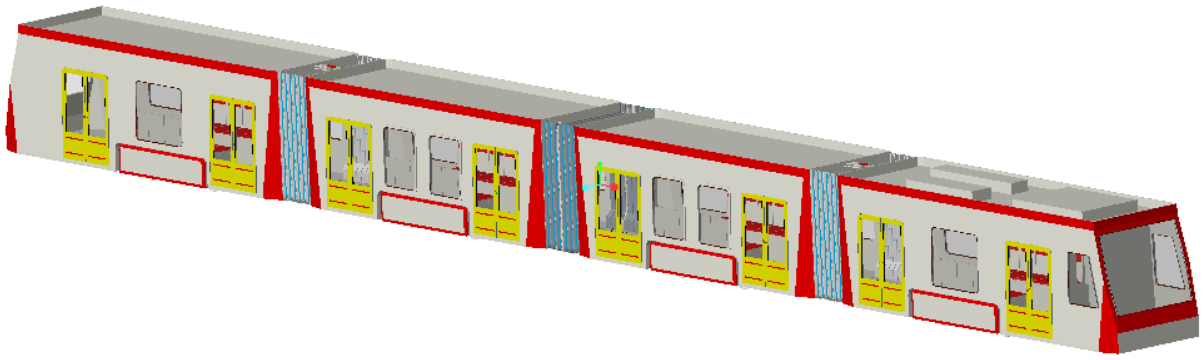
Typový výkres jednotky přiložen jako příloha č. 32.

Tab. 6. Zvolené parametry tramvajové jednotky

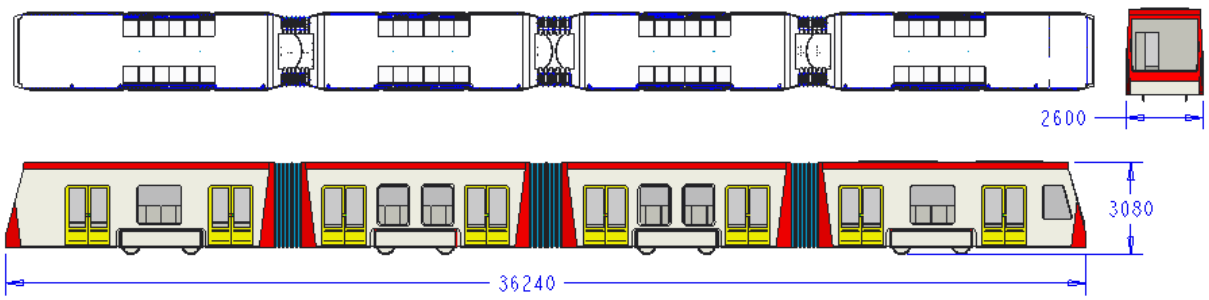
Parametr	Hodnota
Počet článků	4
Typ článků	Podvozkové
Typ podvozků	Otočné
Jednosměrná/obousměrná	Jednosměrná
Délka krajního článku	9000mm
Délka středního článku	7680mm
Šířka jednotky	2600mm
Celková délka jednotky	36240mm
Průměr kol	600mm
Rozvor podvozku	2000mm
Vzdálenost otočných čepů A-B	8040mm
Vzdálenost otočných čepů B-C	9160mm
Výška podlahy nad TK	300mm

5.3 Dattenblat

Tramvajová jednotka S1 pro Prahu



Technické parametry tramvajové jednotky S1	
Vozidlo	Čtyřčlánková nízkopodlažní jednotka
Složení náprav	Bo´Bo´2´Bo´
Napájecí napětí	600V DC
Rozchod vozidla	1435mm
Délka jednotky	36240mm
Výška jednotky	3080mm
Šířka jednotky	2600mm
Průměr kol (max/min)	600mm/520mm
Kuželovitost kol	1:20
Nízkopodlažnost	100%
Nástupní výška	300mm
Kapacita	220os
Maximální rychlost	70Km/h
Stoupání	80,15 promile
Hmotnost prázdné jednotky	45t
Výkon jednotky	540kW



5.4 Volba základních parametrů mezivozových přechodů

Volím základní parametry systémového řešení mezivozových přechodů. Přechod mezi články 1-2 (3-4) je spojen jednoduchým spojovacím kloubem. Přechod mezi články 2-3 je spojen dvojitým kloubem kvůli zajištění dostatečného počtu stupňů volnosti jednotky a umožnění tak jejího plynulého průjezdu tramvajovou tratí. Přechody mezi články 1-2 a 3-4 jsou zvoleny identické z důvodu podobného namáhání kloubů, stejného potřebného rozsahu kloubů a úspory nákladů.

Tab. 7. Zvolené základní parametry mezivozových přechodů

Parametr	Přechod 1-2 (3-4)	Přechod (2-3)
Délka [mm]	900	1080
Výška [mm]	2625	2625
Šířka [mm]	2332	2332
Typ měchu	Dvouvrstvý, wallenbalg	Dvouvrstvý, wallenbalg
Tloušťka stěny měch [mm]	3	3
Připojení k hrubé stavbě	06-S-2017	03-S-2017
Délka přechodového můstku [mm]	1040	1333

Tab. 8. Zvolený rozsah pohybů spojovacích kloubů

Shrnutí	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	±2	±35
Kloub 2-3	±5	±6	±70 (2x35)
Kloub 3-4	0	±2	±35

Pro použití mezivozových přechodů o zvolených parametrech musí jednotka zvládnout průjezd trati bez překročení rozsahu pohybů uvedených v tab.8. a splňovat rozměrové parametry. Mezivozové přechody jsou určeny pro tramvajové jednotky s podvozkovými články a sudým počtem článků.

6. Vyšetření kinematiky tramvajové jednotky

Kinematika jednotky je vyšetřena pro pražskou tramvajovou síť. Potřebné parametry tratí byly získány od pana ing. Pence ze technického úseku DPP hl. m. Prahy. Vyšetřením kinematiky je ověřena možnost použití systémového řešení mezivozového přechodu pro zvolenou jednotku v provozních podmínkách pražské tramvajové sítě.

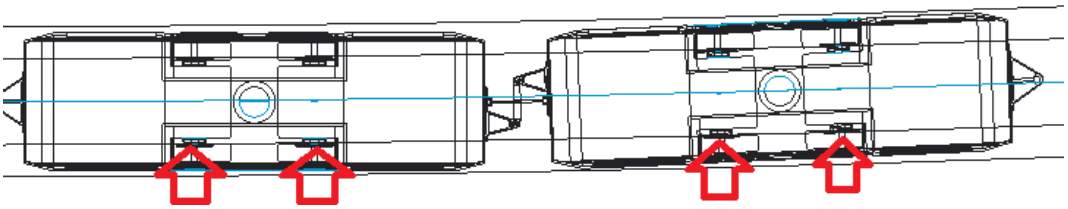
6.1 Stanovení vyšetřovaných poloh pro kinematiku

Pro vyšetření kinematiky mezivozového přechodu byly stanoveny kritické provozní případy, ve kterých bude přechod na trati provozován. Všechny případy jsou vyšetřeny pro žlábkovou blokovou kolejnici, pro kterou platí zachování normálního rozchodu v oblouku (viz norma ČSN 736360). Dále je uvažován celkový posun skříně vozidla v příčném směru na primárním i sekundárním vypružení o 20 mm.

- Oblouk o poloměru R=20 m bez přechodnice
- Oblouk o poloměru R=500 m bez přechodnice
- Zadané protisměrné oblouky s mezipřímou a bez mezipřímé koleje.
- Zadané maximální stoupání/ klesání s postavením jednotky na zborcené koleji
- Jízda v přímé koleji

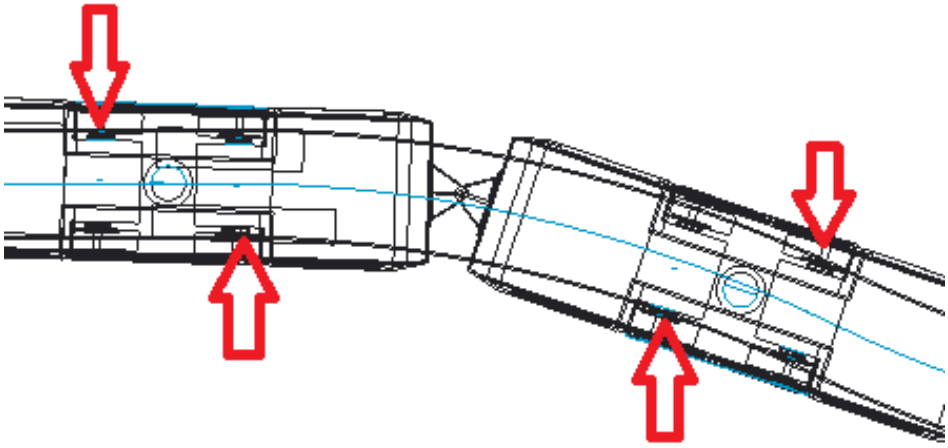
Dle normy by kinematika měla být vyšetřena pro 18 stanovených poloměrů oblouků. Vzhledem k cílům práce jsou zvoleny jen extrémní případy, tedy R=20m a R=500m.

Vyšetření tětivové polohy bude provedeno dle obr. 31. Při tětivové poloze jsou vyčerpány příčné vůle dvojkolí směrem k vnější kolejnici. Červené šipky značí místo vyčerpání příčné vůle (kontakt čelní plochy okolku kola s kolejnicí).



Obr. 31. *Vyšetření tětivové polohy [autor]*

Vyšetření vzpříčené polohy bude provedeno dle obr. 32. Při vzpříčené poloze je vyčerpána vůle dvojkolí v příčném směru u jednotlivých dvojkolí podvozku na protiběžné straně. Následný podvozek otáčí vyčerpání příčných vůlí.



Obr. 32. *Vyšetření vzpříčené polohy [autor]*

6.2 Vyšetření kinematiky mezivozového přechodu

6.2.1 Oblouk 20m

Tab. 9. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±18.2
Kloub 2-3	±3.98	0	±23
Kloub 3-4	0	0	±18.2

Tab. 10. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – vzpříčená poloha 1

Vzpříčená poloha 1	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±24.7
Kloub 2-3	±3.98	0	±28.5
Kloub 3-4	0	0	±24.7

Tab. 11. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – vzpříčená poloha 2

Vzpříčená poloha 2	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±20
Kloub 2-3	±3.98	0	±17
Kloub 3-4	0	0	±20

Grafické znázornění vyšetření v přílohách 1,2 a 3.

6.2.2 Oblouk 500m

Tab. 12. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±1
Kloub 2-3	±3.98	0	±1.5
Kloub 3-4	0	0	±1

Tab. 13. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – vzpříčená poloha 1

Vzpříčená poloha 1	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±3
Kloub 2-3	±3.98	0	±4
Kloub 3-4	0	0	±3

Tab. 14. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – vzpříčená poloha 2

Vzpříčená poloha 2	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±3
Kloub 2-3	±3.98	0	±5
Kloub 3-4	0	0	±3

Grafické znázornění vyšetření v přílohách 4,5 a 6.

6.2.3 Protisměrný oblouk (25m x 10,2m x 31,9m)

Tab. 15. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±15
Kloub 2-3	±3.98	0	±3
Kloub 3-4	0	0	±15

Tab. 16. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – vzpříčená poloha 1

Vzpříčená poloha 1	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±15
Kloub 2-3	±3.98	0	±2
Kloub 3-4	0	0	±15

Tab. 17. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – vzpříčená poloha 2

Vzpříčená poloha 2	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±17.4
Kloub 2-3	±3.98	0	±4.5
Kloub 3-4	0	0	±17.4

Grafické znázornění vyšetření v přílohách 7,8 a 9.

6.2.4 Protisměrný oblouk (28,8m x 10,9m x 28,2m)

Tab. 18. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±11.8
Kloub 2-3	±3.98	0	±6
Kloub 3-4	0	0	±11.8

Tab. 19. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – vzpříčená poloha 1

Vzpříčená poloha 1	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±11.5
Kloub 2-3	±3.98	0	±2
Kloub 3-4	0	0	±11.5

Tab. 20. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – vzpříčená poloha 2

Vzpříčená poloha 2	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±12
Kloub 2-3	±3.98	0	±3.7
Kloub 3-4	0	0	±12

Grafické znázornění vyšetření v přílohách 10,11 a 12.

6.2.5 Protisměrný oblouk (20m x 20m)

Tab. 21. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±15.5
Kloub 2-3	±3.98	0	±8
Kloub 3-4	0	0	±15.5

Tab. 22. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – vzpříčená poloha 1

Vzpříčená poloha 1	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±19.5
Kloub 2-3	±3.98	0	±18
Kloub 3-4	0	0	±19.5

Tab. 23. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – vzpříčená poloha 2

Vzpříčená poloha 2	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±18.8
Kloub 2-3	±3.98	0	±11.5
Kloub 3-4	0	0	±18.8

Grafické znázornění vyšetření v přílohách 13,14 a 15.

6.2.6 Stoupání/klesání 80,15 promile (zakružovací oblouk R=300m a zborcená kolej)

Tab. 24. Rozsah pohybů kloubů v stoupání – tětivová poloha

Tětivová poloha	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	0
Kloub 2-3	±3.98	±4.58	0
Kloub 3-4	0	0	0

Grafické znázornění vyšetření v příloze 16.

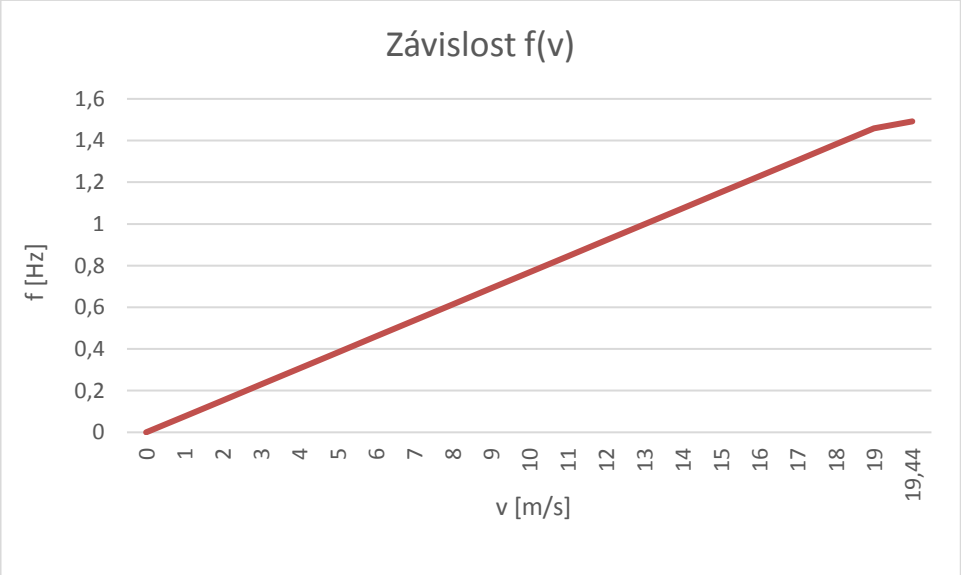
6.2.7 Přímá kolej (vlnění)

Zvolená koncepce je velmi náchylná na nestabilitu při jízdě v přímé koleji. Stabilita jízdy v přímé koleji se určí Klingelovým vztahem. Pokud je délka vlny příliš krátká, tak dojde k rozkmitání jednotky a následnému vykolejení. Tento parametr je závislý pouze na geometrických vlastnostech jednotky a nezávislý na rychlosti jízdy. Optimální délka vlny je 10m až 15m.

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{r \cdot s}{\gamma}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0{,}3 \cdot 0{,}7175}{0.05}} = 13{,}03m \tag{3}$$

$$f = \frac{1}{\lambda} \cdot v = \frac{v}{13{,}03}; f_{\max} = \frac{19{,}44}{13{,}03} = 1{,}492Hz \tag{4}$$

Kritické hodnoty vlastních frekvencí konstrukčních částí jsou všechny frekvence nižší než 1,492Hz.



6.2.8 Maximální rozsah pohybů kloubů na pražské trati

Tab. 25. Maximální rozsah pohybů kloubů

Shrnutí	Rozsah φ(x) [°]	Rozsah φ(y) [°]	Rozsah φ(z) [°]
Kloub 1-2	0	0	±24.7
Kloub 2-3	±3.98	±4.58	±28.5
Kloub 3-4	0	0	±24.7

Rozsah pohybů kloubů je v mezích stanovených pro pohyby kloubů systémového řešení mezivozového přechodu v tab. 8. Systémové řešení může být pro tramvajovou jednotku S1 použito.

6.2.9 Výsledný průjezdný profil jednotky

Ve vyšetřovaných obloucích je průjezdný profil rozšířen na vnějším okraji o hodnotu δa a na vnitřním o δi. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 26.

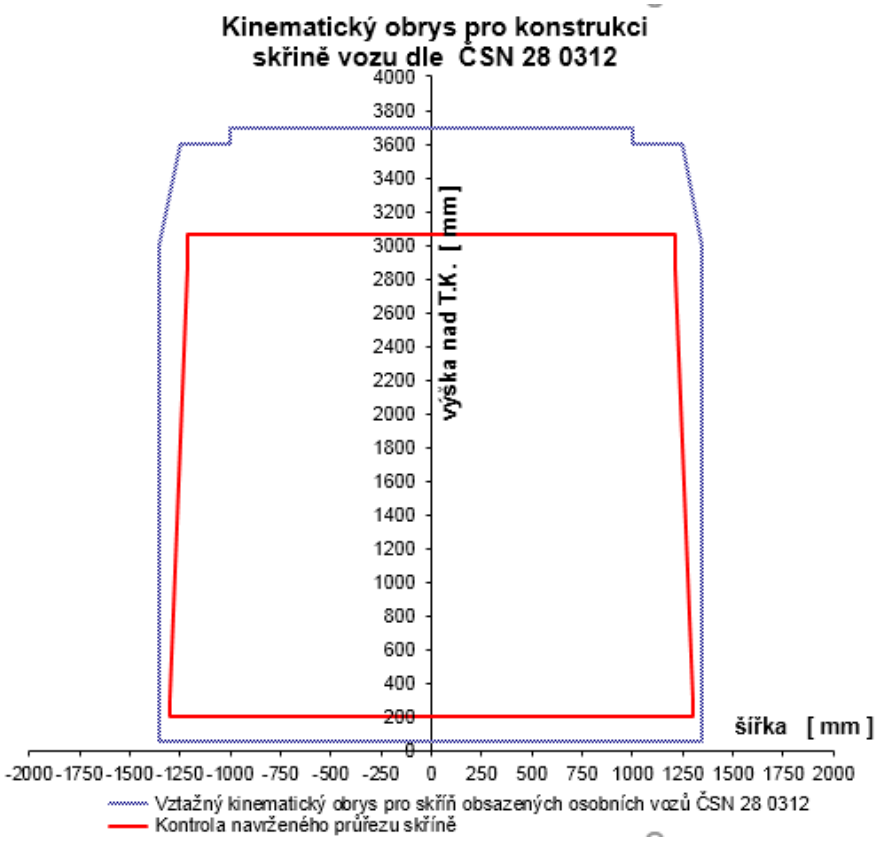
Tab. 26. Vyšetřované oblouky

Poloměr oblouku R [m]	Rozšíření δa [mm]	Rozšíření δi [mm]
20	650	310
500	10	0

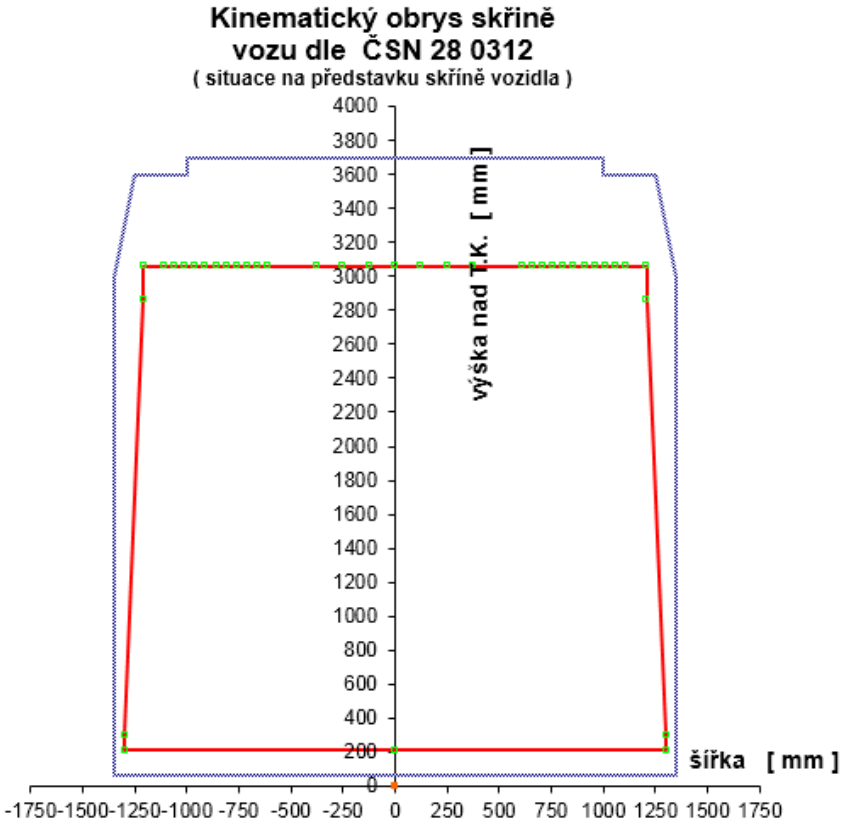
Průjezdný profil je stanoven dle ČSN 28 0312 se vstupními hodnotami viz tab. 27. Průjezdný profil jednotky vyhovuje normovanému průjezdnému profilu. Průjezdný profil je vyšetřen programem os-vozy [26].

Tab. 27. Vstupní hodnoty pro výpočet kinematické obrysu [26]

Vstupní data výpočtu			
Délka vozové skříně	L_S =	9,000	[m]
Vzdálenost otočných čepů	a =	0,000	[m]
Rozvor podvozku	p =	2,000	[m]
Rozchod koleje e_{Kolmax} = 1,465 m	e_{Kolmax} =	1,435	[m]
Rozchod dvojkolí $e_{Dv\ max.\ opotř.}$ = 1,41 m	$e_{Dv\ opotř.}$ =	1,425	[m]
Příčná vůle ve vedení dvojkolí	q =	0,005	[m]
Příčná vůle podvozek - skříň	w_p =	0,015	[m]
Vnější příčná vůle podvozek - skříň v oblouku R_o = 250 m	w_{a250} =	0,0150	[m]
Vnitřní příčná vůle podvozek - skříň v oblouku R_o = 250 m	w_{i250} =	0,015	[m]
Vnější příčná vůle podvozek - skříň v oblouku R_o = 150 m	w_{a150} =	0,0150	[m]
Vnitřní příčná vůle podvozek - skříň v oblouku R_o = 150 m	w_{i150} =	0,015	[m]
Výška pólu náklonění vozové skříně nad rovinou T.K.	h_C =	0,500	[m]
Součinitel náklonu vozové skříně	s =	0,300	[-]
Úhel náklonu vozové skříně	η =	1,000	[^{0}]
Vzdálenost vnějšího řezu od roviny otočného čepu podvozku	n_a =	1,350	[m]
Vzdálenost vnitřního řezu od roviny otočného čepu podvozku	n_i =	4,500	[m]
Příčná vzdálenost středů pružin druhotného vypružení	$2w_2$ =	2,000	[m]
Stlačení pružin druhotného vypružení na narážku	$s_{Z(-)}$ =	0,058	[m]
Stlačení pružin prvotního vypružení na narážku	$p_{Z(-)}$ =	0,050	[m]
Odlehčovací zdvih pružin sekundárního vypružení na narážku	$s_{Z(+)}$ =	0,040	[m]
Odlehčovací zdvih pružin primárního vypružení na narážku	$p_{Z(+)}$ =	0,039	[m]
Tolerance výškového stavění vozové skříně kompenzující ojetí kol	Δhr_K =	0,015	[m]
Opotřebení kola dvojkolí (vztažené na poloměr kola)	Δr_K =	0,015	[m]
Minimální poloměr vydutého zaoblení lomu sklonu koleje -sedla	R_{V1} =	300	[m]
Min. poloměr vypuklého zaoblení lomu sklonu koleje - vrcholu	R_{V2} =	300	[m]



Obr. 33. *Průjezdný profil skříně jednotky [26]*



Obr. 34. *Průjezdný profil čela tramvajové jednotky [26]*

7. Zástavba mezivozového přechodu

7.1 Silové účinky ve spojovacích kloubech a narážkách

Klouby budou namáhány ve třech stavech – provozní, mezní a crash. V jednotce se nenacházejí nesené články, proto budou klouby 1-2, 2-3 a 3-4 namáhány při provozním stavu (při zanedbání setrvačných sil působících při rozjezdu, zpomalení, jízdě obloukem a vlastní hmotnosti) pouze hnacími tahovými silami mezi články. Mezi články 1-2 k zatížení kloubu teoreticky nedojde. V případě mezního stavu (nerovnoměrného chodu elektromotorů, poruchy elektromotorů či nouzových brzd) musí být spojení schopné zachovat celistvost jednotky bez poškození jednotlivých komponent. Při zatěžovacím stavu dle EN 12663(-1,-2) P-5 jednotka musí odolat předepsanému zatížení.

7.1.1 Výpočet provozních zatěžujících sil

Výpočet maximální hnací síly na obvodu jedné nápravy při 70 km/h (v Praze je maximální povolená rychlost 60 km/h, ale dimenzování na vyšší rychlost rozšiřuje možnost použití systémového řešení):

$$P_{nápr} = P_{celk} / n_{nápr} = 540/6 = 90kW \tag{5}$$

$$\omega_{nápr} = v_{\max} / r_{kola_\min} = \frac{70/3{,}6}{0{,}26} = 74{,}786 rad/s \tag{6}$$

$$M_{K_nápr} = P_{nápr} / \omega_{nápr} = 90000/74{,}786 = 1203{,}43Nm \tag{7}$$

$$T_{nápr} = M_{K_nápr} / r_{kola_\min} = 1203{,}43/0{,}26 = 4628{,}58N \tag{8}$$

Vzhledem k nehnanému 2. článku jsou namáhány klouby 1-2 a 2-3 nápravovou silou, kdy nehnaný článek táhnou/tlačí.

7.1.2 Výpočet mezních zatěžujících sil

Nejhorší případ zatížení při provozním stavu bude selhání magnetických nápravových brzd při plné rychlosti na všech článcích kromě jediného. Normou je stanoveno minimální zpomalení vyvozené na jednotce nouzovými brzdami na $3ms^{-2}$. Hmotnost jednoho prázdného článku je 11 t. Potřebná brzdná síla na jednom článku se vypočte dle:

$$F_{br} = m_{clanku} \cdot a_{brz_nouz} = 11000 \cdot 3 = 33kN \quad (9)$$

Při selhání nouzových brzd na třech článcích se rozloží brzdný účinek jedné brzdy na celou jednotku a přitíží spojovací klouby. Nejhorší situace nastane, pokud sepnuté brzdy budou na krajním článku. Namáhání spojovací kloubů v tomto případě se vypočte dle:

$$F_{br_krajni_stedni} = \frac{3}{4} \cdot F_{br} = \frac{3}{4} \cdot 33 = 27{,}75kN \quad (10)$$

$$F_{br_stredni_stredni} = \frac{1}{2} \cdot F_{br} = \frac{1}{2} \cdot 33 = 16{,}5kN \quad (11)$$

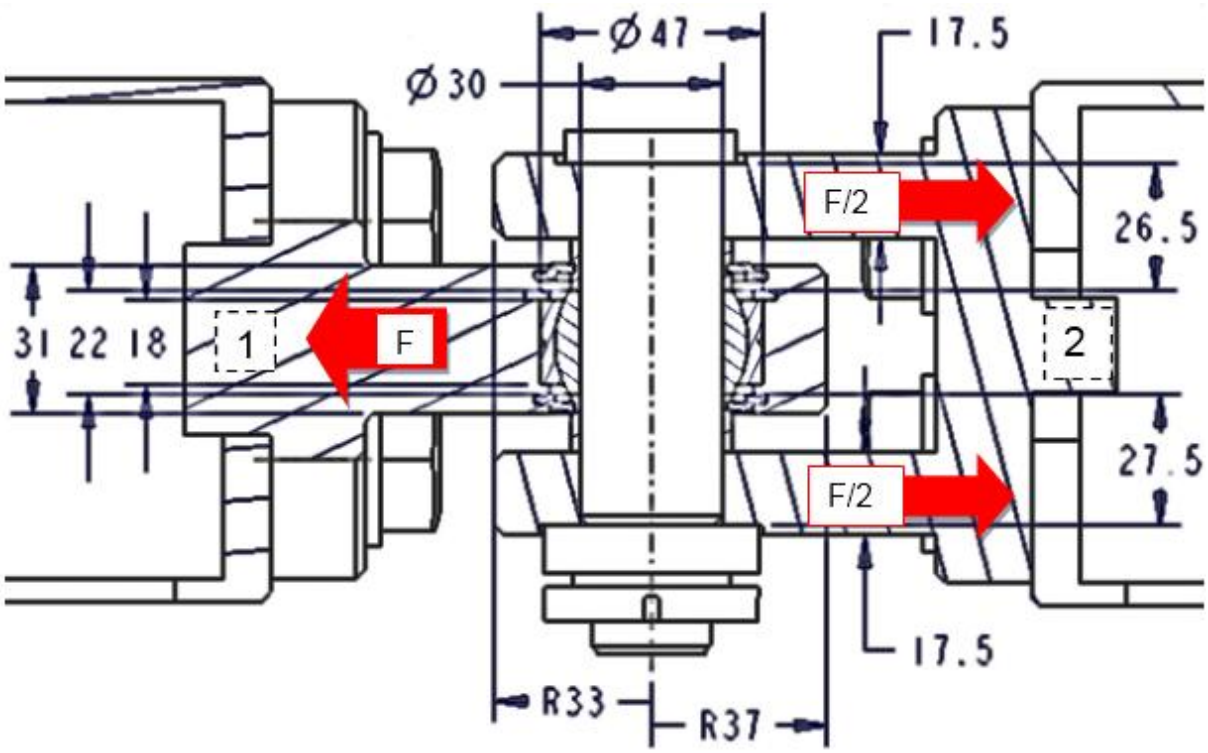
7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách

Zatěžující síly kloubů jsou stanoveny normou EN 12663-1 pro tramvajovou jednotku kategorie P-5. Vzhledem k velikostem a charakteru sil je uvažováno dimenzování částí od zatěžující síly v provozním stavu k nekonečné životnosti. Zatěžující síla v mezním stavu je výrazně menší než předepsané zatížení při zatěžovacím stavu P5 a jelikož obě jsou vztahovány k mezi kluzu materiálu součásti (předepsáno normou EN 12663-1), tak dimenzování je provedeno na větší z dvojice zatěžujících sil. Kontrola na únavu je provedena u vybraných kritických částí, kde únavová mez materiálu je úměrně menší oproti mezi kluzu jako síla v provozním stavu vůči síle v zatěžujícím stavu, protože u případů, kde tomu tak není, je tato kontrola splněna automaticky.

Tab. 28. Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách

	Zatěžující síla v provozním stavu [kN]	Zatěžující síla v mezním stavu [kN]	Zatěžující síla v zatěžujícím stavu P-5 [kN]
Spojovací kloub 1-2	4,63	24,75	200
Spojovací kloub 2-3	4,63	16,5	200
Spojovací kloub 3-4	0	24,75	200
Narážka 1-2	0	0	100
Narážka 2-3	0	0	100
Narážka 3-4	0	0	100

7.2 Spojovací kloub A-B (C-D)



Obr. 35. *Schéma zatížení spojovacího kloubu A-B (C-D) [autor]*

Kulový kloub je nakupovaný GE30ES s únosností C_{dyn}=62kN a C_{stat}=310kN. Zátěžné síly byly stanoveny v kapitole 7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách. Geometrické parametry jsou uvedeny v tab. 28. Materiály dílů jsou kromě kulového kloubu S235 a S355. Dle doporučení EN 12663-2 je pro svařenec mez kluzu materiálu snížena na 214Nmm^{-2} a 323Nmm^{-2}. Kulový kloub je zde využíván pro rotaci kolem osy z v rozsahu ±35° a kolem osy x v rozsahu ±2°. V ose y je tuhý, což zajišťuje konstrukce horního kloubu.

Tab. 29. Geometrické parametry kloubu AB

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$D_{čepu_AB}$	30mm	H_{t1_AB}	31mm
$H_{pouzdra_AB}$	18mm	H_{t2_AB}	17,5mm
$L_{otlačná_AB}$	22mm	R_{zakr1_AB}	37mm
$N_{šroubů_AB}$	8	$S_{3\ (M20)}$	217mm^2
D_{p_AB}	47mm	R_{zakr2_AB}	33mm
$S_{příčky_AB}$	1000mm		

Kontrola únosnosti kulového kloubu – statická zkouška, předepsáno normou EN 12663-1

$$k_{kul_kl_AB} = \frac{C_{stat}}{F_{AB_c}} = \frac{310}{200} = 1{,}55 \tag{12}$$

Kontrola na otlačení pouzdra kulového kloubu

$$\sigma_{otl_pp_AB} = \frac{F_{AB_p}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_p}}{D_{p_AB} \cdot H_{pouzdra_AB}} = \frac{4629}{47 \cdot 18} = 6{,}14 Nmm^{-2} \leq p_{dov} = 10 Nmm^{-2} \tag{13}$$

$$\sigma_{otl_p_AB_c} = \frac{F_{AB_c}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{D_{p_AB} \cdot H_{pouzdra_AB}} = \frac{200000}{47 \cdot 18} = 236 Nmm^{-2} \tag{14}$$

$$k_{otl_p_c_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{otl_p_AB_c}} = \frac{355}{236} = 1{,}5 \tag{15}$$

Kontrola na otlačení spojovacího čepu

$$\sigma_{otl_p_AB} = \frac{F_{AB_p}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_p}}{D_{cepu_AB} \cdot l_{otlacna_AB}} = \frac{4629}{30 \cdot 22} = 7{,}7 Nmm^{-2} \leq p_{dov} = 10 Nmm^{-2} \tag{16}$$

$$\sigma_{otl_AB_c} = \frac{F_{AB_c}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{D_{cepu_AB} \cdot l_{otlacna_AB}} = \frac{200000}{30 \cdot 22} = 303 Nmm^{-2} \tag{17}$$

$$k_{otl_c_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{otl_AB_c}} = \frac{355}{303} = 1{,}17 \tag{18}$$

Kontrola na střih spojovacího čepu (pevnost ve střihu zjištěna jako 0,4x násobek meze pevnosti v tahu materiálu)

$$\tau_{strih_AB_p} = \frac{F_{AB_p}}{S_{strih_AB}} = \frac{F_{AB_p}}{2 \cdot \pi \cdot r_{čepu_AB}^{\ 2}} = \frac{4629}{2 \cdot \pi \cdot 15^2} = 3{,}28 Nmm^{-2} \leq \tau_{dov} = 10 Nmm^{-2} \tag{19}$$

$$\tau_{strih_AB_c} = \frac{F_{AB_c}}{S_{strih_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{2 \cdot \pi \cdot r_{cepu_AB}^{\ 2}} = \frac{200000}{2 \cdot \pi \cdot 15^2} = 141{,}54 Nmm^{-2} \tag{20}$$

$$k_{strih_c_AB} = \frac{\tau_{S355}}{\tau_{strih_AB_c}} = \frac{200}{141{,}54} = 1{,}4 \tag{21}$$

Kontrola na ohyb spojovacího čepu není provedena z důvodu těsného uložení mezi válcovou plochou čepu a vnitřní válcovou plochou kulového kloubu.

Kontrola kritického průřezu tělesa kloubu I

$$\sigma_{otl_c}^{AB_t1} = \frac{F_{AB_c}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{(2 \cdot R_{zakr1_AB} - D_{p_AB}) \cdot H_{t1_AB}} = \frac{200000}{(2 \cdot 37 - 47) \cdot 31} = 239 Nmm^{-2} \quad (22)$$

$$k_{otl_c_T1_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{otl_AB_c_T1}} = \frac{323}{239} = 1{,}35 \quad (23)$$

Kontrola kritického průřezu tělesa kloubu II

$$\sigma_{otl_c}^{AB_t2} = \frac{F_{AB_c}}{S_{otl_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{(2 \cdot R_{zakr2_AB} - D_{p_AB}) \cdot H_{t2_AB}} = \frac{\frac{200000}{2}}{(2 \cdot 33 - 47) \cdot 17{,}5} = 300{,}75 Nmm^{-2} \quad (24)$$

$$k_{otl_c_T2_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{otl_AB_c_T2}} = \frac{323}{300{,}75} = 1{,}07 \quad (25)$$

Kontrola šroubového spojení kloub-nosný rám

Šroubové spojení je realizováno osmi šrouby M20x2,5x65 ČSN EN 21014-12.9 v rozteči 40 mm od sebe kvůli montážnímu prostoru.

Tab. 30. Parametry šroubového spoje AB

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$N_{šr_AB}$	8	**$D_{2š_AB}$**	18,376mm
Typ šroubu	M25x2,5; 12.9	**$D_{3š_AB}$**	16,933mm
$S_{š_AB}$	2,5mm	**F_{th_AB}**	0,14
$\gamma_{š_AB}$	2,48°	**R_{mat_AB}**	17,25mm
$\Phi_{š_AB}$	9,18°	**M_{utah_AB}**	400Nm
$D_{m_AB_e}$	40mm	**$D_{m_AB_i}$**	25mm
$H_{1š_AB}$	1,3525mm	**$Z_{š_AB}$**	8

$$Q_{o_AB} = \frac{M_{utah_AB}}{\frac{d_{2š_AB}}{2} \cdot tg(\gamma_{š_AB} + \varphi_{š_AB}^{'}) + f_{th_AB} \cdot R_{mat_AB}} = \\ = \frac{400000}{\frac{18{,}376}{2} \cdot tg(2{,}48 + 9{,}18) + 0{,}14 \cdot 17{,}25} = 92856N \quad (26)$$

$$F_{zat_AB_C/1š} = \frac{F_{AB_c}}{N_{šr_AB}} = \frac{200000}{8} = 25000N \le Q_{o_AB} \tag{27}$$

$$p_{z_AB} = \frac{Q_{o_AB} + F_{zat_AB_C/1š}}{\pi \cdot d_{2š_AB} \cdot H_{1š_AB} \cdot z_{š_AB}} = \frac{92856 + 25000}{\pi \cdot 18{,}376 \cdot 1{,}3525 \cdot 8} = \\ = 188{,}77MPa \le p_{dov_z_AB} = 200MPa \tag{28}$$

$$p_{m_AB} = \frac{Q_{o_AB} + F_{zat_AB_C/1š}}{\frac{\pi \cdot d_{m_AB_e}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{m_AB_i}^2}{4}} = \frac{92856 + 25000}{\frac{\pi \cdot 40^2}{4} - \frac{\pi \cdot 25^2}{4}} = \\ = 153{,}98MPa \le p_{dov_m_AB} = 200MPa \tag{29}$$

$$\sigma_{red_š_AB} = \sqrt{\frac{Q_{0_AB}}{S_{3_AB}} + 3 \cdot \frac{M_{kš_AB}}{W_{kš_AB}}} = 524{,}65Nmm^{-2} \tag{30}$$

$$k_{š_AB} = \frac{R_{e_š}}{\sigma_{red_š_AB}} = \frac{1000}{524{,}65} = 1{,}9 \tag{31}$$

Hodnoty dovolených tlaků jsou stanoveny dle [25].

Kontrola svarového spoje tělesa kloubu je provedena pro případ B-C, kdy je větší zatížení kloubu.

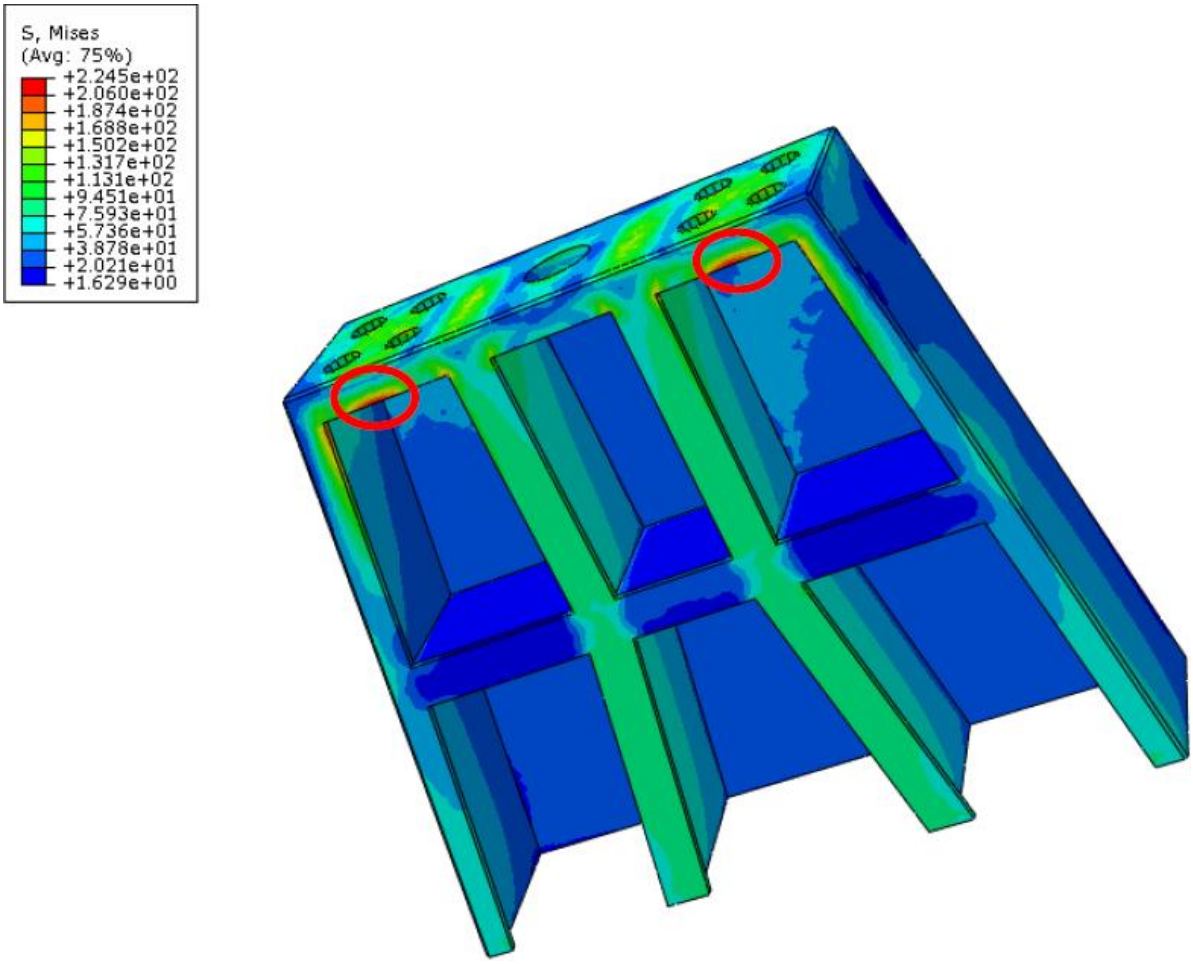
Kontrola nosného rámu (analytická kontrola je orientační vzhledem ke složitosti svařence, vyhodnocení o vyhovení je provedeno MKP viz příloha 17)

$$\sigma_{nosny_teleso_AB_c} = \frac{F_{AB_c}}{S_{teleso_AB}} = \frac{F_{AB_c}}{4 \cdot S_{pricky_AB}} = \frac{200000}{4 \cdot 1000} = 50Nmm^{-2} \tag{32}$$

$$k_{teleso_AB_c} = \frac{R_{e_S235}}{\sigma_{nosny_teleso_AB_C}} = \frac{214}{50} = 4{,}28 \tag{33}$$

MKP kontrola nosného rámu (podrobně v příloze)

Maximální hodnoty je dosaženo na vnitřní hraně spodní výztuže (viz obr. 36). Napětí ve stojnách nosiče odpovídá hodnotám analytického výpočtu (viz tab. 31). Mez kluzu materiálu není překročena a pevnostní kontrola tak vyhovuje. Nosný rám je možno dále optimalizovat úpravou plechů z nichž je sestaven, což ovšem vyloučí použití normalizovaných dílů na sestavení a ve výsledku nosný rám prodraží.



Obr. 36. *MKP kontrola nosného rámu [autor]*

Tab. 31. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa

Vyšetřované místo	**Stojna nosného tělesa**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	50	57
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	11,4 %	Vyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.2 Spojovací kloub A-B (C-D)	

Všechny kontroly vyhovují.

7.3 Pojistný kloub A-B (C-D)

Horní kloub slouží k pojištění článku proti převržení. Kloubu je dovolen rozsah ±2° při rotaci kolem osy x. Materiály dílů jsou kromě kulového kloubu S235 a S355.

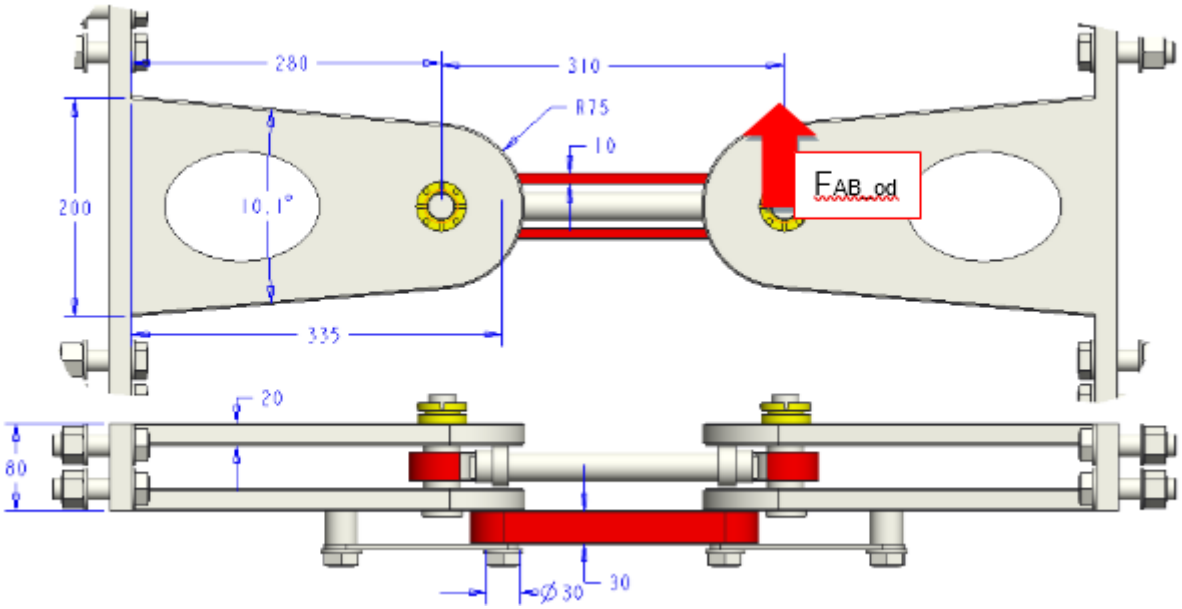
Na dorazu je kloub namáhán silou od hmotnosti článku a maximálního dovoleného odstředivého zrychlení při průjezdu obloukem zvýšeného o 0,2 ms^{-2} kvůli zvýšení bezpečnosti. Hodnota odstředivého zrychlení při průjezdu obloukem je kontrolována senzory a bezpečnostním softwarem, který nedovolí řidiči jet s vyšším zrychlením pro jakoukoliv část jednotky.

Toto opatření je zavedeno z důvodu nebezpečí vykolejení zadních podvozků jednotky v případě, že řidič začne zrychlovat, když jeho článek se dostane do přímého směru jízdy a zadní stále projíždí obloukem. Výpočet zatěžující síly dle vzorce:

$$F_{AB_od} = m_{clanku} \cdot a_{od_\max} = 11000 \cdot 1 = 11kN \tag{34}$$

Tab. 32. Geometrické parametry horního kloubu AB (CD)

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$D_{čepu_AB_h}$	30mm	B_{hranik}	10mm
$L_{otlač_AB_h}$	30mm	α_{odklon_AB}	20°
H_{hranik}	30mm	$R_{těleso}$	150mm
$B_{t_AB_h}$	150+0,1*x(mm)	$h_{t_AB_h}$	40mm
$H_{t_AB_h}$	80mm		



Obr. 37. *Schéma zatížení horního kloubu AB [autor]*

Kontrola čepu na otlačení

$$\sigma_{otl_h_AB} = \frac{F_{AB_od}}{S_{otl_AB_h}} = \frac{F_{AB_od}}{D_{cepu_AB_h} \cdot l_{otlacna_AB_h}} = \frac{11000}{30 \cdot 30} = \\ = 12{,}22 Nmm^{-2} \leq p_{dov} = 15 Nmm^{-2} \quad (35)$$

Kontrola čepu na střih

$$\tau_{strih_h_AB} = \frac{F_{AB_od}}{S_{strih_AB_h}} = \frac{F_{AB_od}}{2 \cdot \pi \cdot r_{čepu_AB_h}^{\ 2}} = \frac{11000}{2 \cdot \pi \cdot 15^2} = 7{,}78 Nmm^{-2} \leq \tau_{dov} = 10 Nmm^{-2} \quad (36)$$

Kontrola hraníku na tah

$$F^{hr}_{AB_od} = F_{AB_od} \cdot \sin(\alpha) = 11000 \cdot \sin(20°) = 3762{,}22 N \quad (37)$$

$$\sigma_{t_hr_AB} = \frac{F^{hr}_{AB_od}}{S_{t_AB}} = \frac{F^{hr}_{AB_od}}{H_{hranik} \cdot B_{hranik}} = \frac{3762{,}22}{30 \cdot 10} = 12{,}54 Nmm^{-2} \quad (38)$$

$$k_{t_hr_AB} = \frac{R_{e_S235}}{\sigma_{t_hr_AB}} = \frac{235}{12{,}54} = 18{,}74 \quad (39)$$

Kontrola tělesa kloubu na ohyb

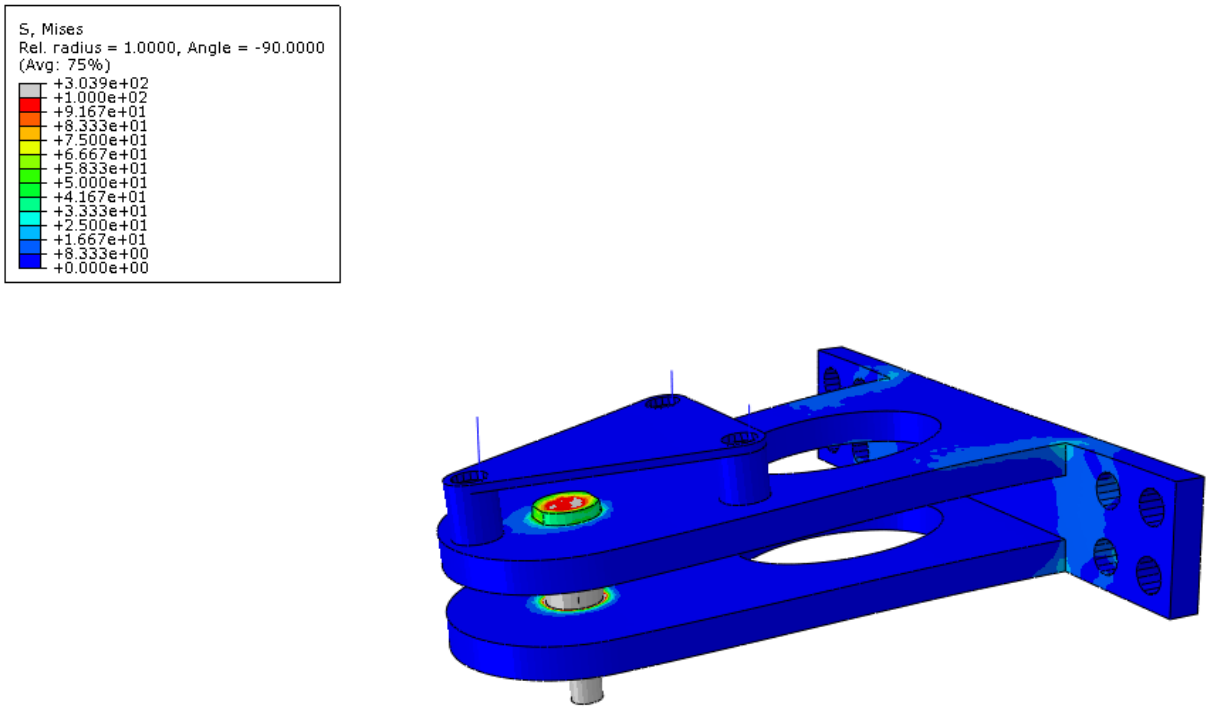
$$M_{AB_t_oh} = F_{AB_od} \cdot R_{telesa} = 11000 \cdot 335 = 3685000 Nmm \quad (40)$$

$$\sigma_{oh_hr_AB} = \frac{M_{AB_t_oh}}{W_{o_t_AB}} = \frac{M_{AB_t_oh}}{\frac{\frac{1}{12} \cdot B^3_{t_AB:h} \cdot H_{t_AB:H} - \frac{1}{12} \cdot B^3_{t_AB:h} \cdot h_{t_AB:H}}{\frac{B_{t_AB:H}}{2}}} = 13{,}42 Nmm^{-2} \quad (41)$$

$$k_{oh_t_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{oh_hr_AB}} = \frac{323}{13{,}42} = 24 \quad (42)$$

MKP kontrola tělesa kloubu na ohyb (podrobněji popsáno viz příloha 20)

Hodnota napětí v kritickém místě tělesa – připojovacím svaru (viz obr. 38) dle MKP 21 Nmm^{-2}, což je o 7,6 Nmm^{-2} více než je zjištěno analytickým výpočtem (viz tab. 33). Důvodem je diskretizační chyba sítě v místě průniku tří ploch.



Obr. 38. *MKP kontrola AB horní těleso [autor]*

Na obr. 38 jsou vidět i napětí v dalších analyticky kontrolovaných místech. Čep pro hraník je nejvíce namáhán u místa kontaktu s tělesem kloubu. Napětí je zde vrubovým účinkem hrany podstatně vyšší než analyticky vypočtená hodnota. Napětí na opěrné ploše čepu je shodné s napětím získaným analytickým výpočtem. Navržené odlehčení kloubu svým tvarem a velikostí zachovává dostatečnou pevnost a tuhost tělesa kloubu.

Tab. 33. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa horního kloubu AB

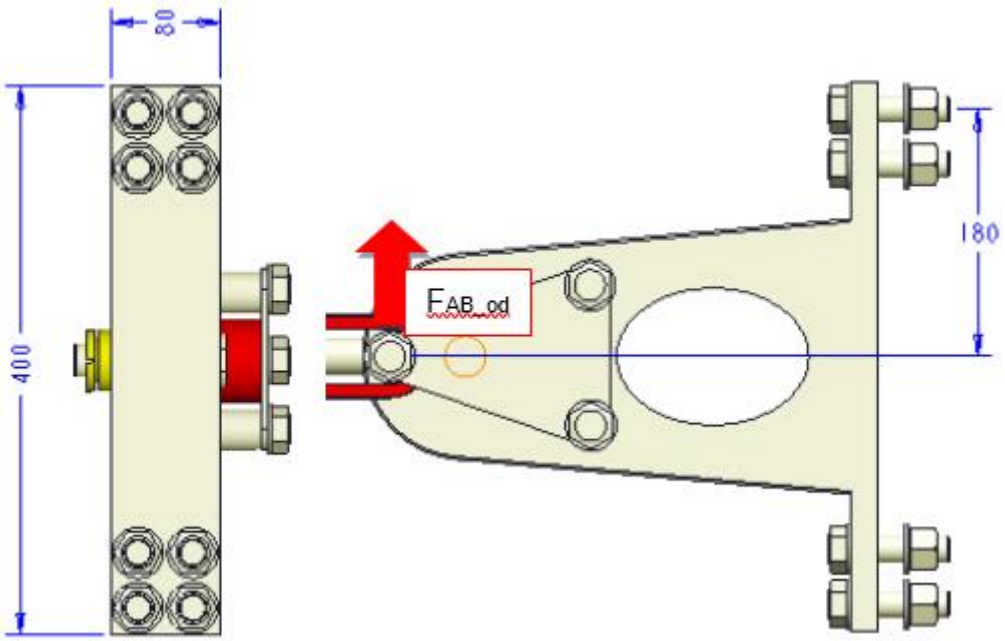
Vyšetřované místo	**Svar připojující nosné plechy**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	13,42	21
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	56 %	Nevyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.3 Pojistný kloub A-B (C-D)	

Kontrola šroubového pole na ohyb

Šroubové spojení je realizováno osmi šrouby M20x2,5x65 ČSN EN 21014-12.9 v minimální rozteči 40 mm od sebe kvůli montážnímu prostoru.

Výpočet zatěžující síly v ose kloubu

$$F_{AB_h_pole} = F_{AB_od} \cdot (\cos(\alpha_{odklon_AB}) \cdot tg(\alpha_{odklon_AB}) - \sin(\alpha_{odklon_AB}) \cdot \cos(\alpha_{odklon_AB})) =$$
$$11000 \cdot (\cos(20) \cdot tg(20) - \sin(20) \cdot \cos(20)) = 226N \quad (43)$$



Obr. 39. *Schéma šroubového pole horního kloubu AB [autor]*

Tab. 34. Parametry šroubového pole horního kloubu AB

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$N_{š_h_AB}$	8	S_{3_M20}	217mm^2
$Q_{š_h_AB}$	179811N	$x_{AB_h_kraj}$	180mm
$S_{podst_h_AB}$	32000mm^2	$R_{čep_AB_h}$	335mm

$$p_{o_h_AB} = \frac{n_{š_h_AB} \cdot Q_{š_h_AB}}{S_{podst_h_AB}} = \frac{8 \cdot 179811}{32000} = 45Nmm^{-2} \quad (44)$$

$$p_{tah_h_AB} = \frac{F_{AB_h_pole}}{n_{sr_celk_AB_h} \cdot S_{3_M20}} = \frac{226}{8 \cdot 217} = 0{,}13Nmm^{-2} \quad (45)$$

$$p_{ohyb_h_AB_max} = \frac{F_{AB_od} \cdot r_{čep_AB_h} \cdot x_{AB_h_kraj}}{n_{sr_rada} \cdot S_{sroubu_rada} \cdot x^2_{AB_h_kraj}} = \frac{11000 \cdot 335 \cdot 180}{2 \cdot 217 \cdot 180^2} = 43{,}17Nmm^{-2} \quad (46)$$

$$p_{max_h_AB} = p_{0_h_AB} - p_{tah_h_AB} + p_{ohyb_h_AB_max} = 45 - 0{,}13 + 43{,}17 = 88{,}04Nmm^{-2} \quad (47)$$

$$p_{min_h_AB} = p_{0_h_AB} - p_{tah_h_AB} - p_{ohyb_h_AB_max} = 45 - 0{,}13 - 43{,}17 = 1{,}7Nmm^{-2} \quad (48)$$

Kontrola svarů tělesa (2x koutový 200 a15)

$$\tau_{t_sv_AB_h} = \frac{F_{AB_h_pole}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_AB_h} \cdot h_{sv_AB_h}} = \frac{24177}{2 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 15} = 20 Nmm^{-2} \tag{49}$$

$$\tau_{oh_sv_AB_h} = \frac{F_{AB_od} \cdot r_{cep_AB_h}}{\frac{1}{3} \cdot l_{sv_AB_h}^3 \cdot h_{red_sv_AB:h}} = \frac{11000 \cdot 335}{\frac{1}{3} \cdot 200^2 \cdot 40} = 6{,}9 Nmm^{-2} \tag{50}$$

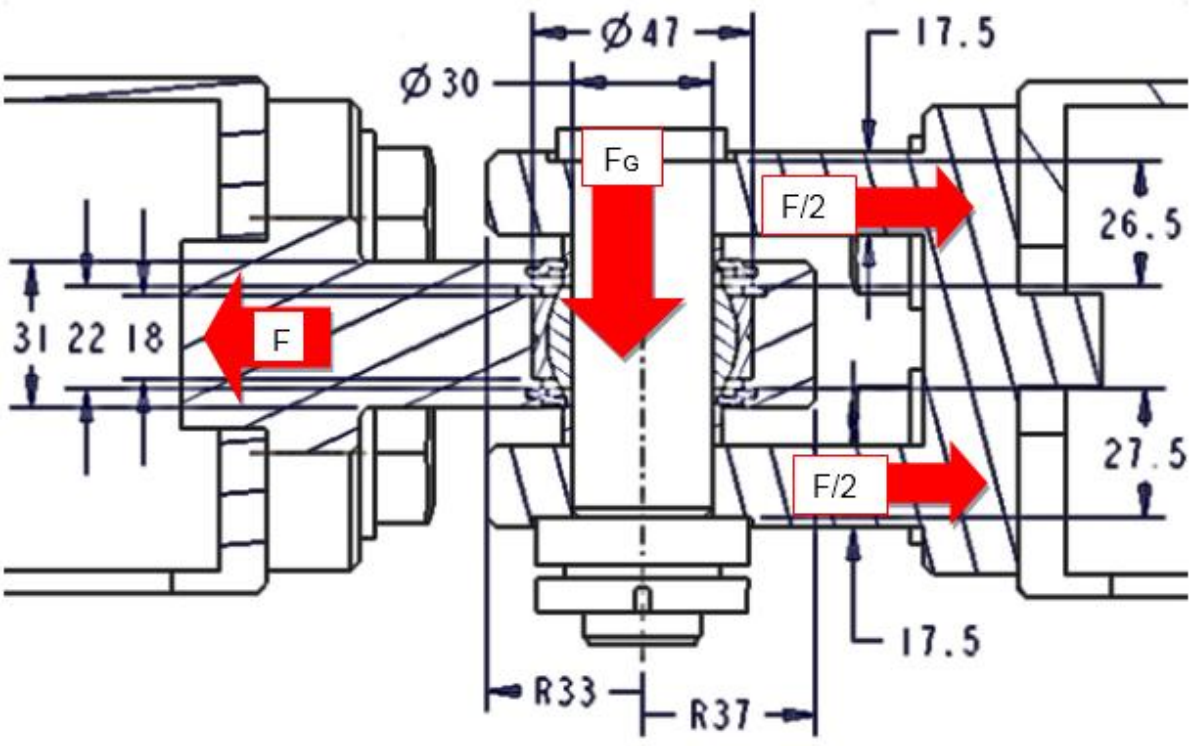
$$\tau_{r_sv_AB_h} = \frac{F_{AB_od}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_AB_h} \cdot h_{sv_AB_h}} = \frac{11000}{2 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 15} = 0{,}91 Nmm^{-2} \tag{51}$$

$$\tau_{red_AB_h} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{t_sv_AB_h} + \tau_{oh_sv_AB_h}}{\alpha_\tau}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{r_sv_AB_h}}{\alpha_\Updownarrow}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{20 + 6{,}9}{0{,}6}\right)^2 + \left(\frac{0{,}91}{0{,}5}\right)^2} = 45{,}34 Nmm^{-2} \tag{52}$$

$$k_{sv_AB_h} = \frac{R_{e_S355}}{\tau_{red_AB_h}} = \frac{323}{45{,}34} = 7{,}12 \tag{53}$$

Všechny kontroly vyhovují.

7.4 Spojovací kloub B-C

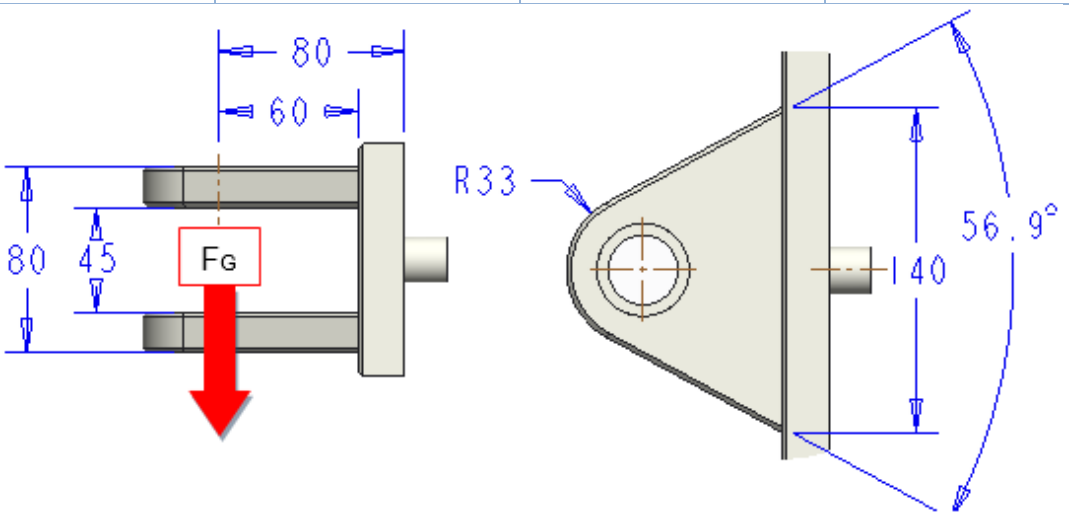


Obr. 40. *Schéma zatížení spodního kloubu BC [autor]*

Jedná se o dva kulové klouby spojené mezimostem nesoucím narážky. Kulový kloub je nakupovaný GE30ES s únosností C_{dyn}=62kN a C_{stat}=310kN. Zátěžné síly byly stanoveny v kapitole 7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách. Geometrické parametry jsou uvedeny v tab. 29. Materiály všech dílů kromě kulového kloubu jsou S235 a S355. Dle doporučení EN 12663-2 je pro svařenec mez kluzu materiálu snížena na 214Nmm^{-2} a 323Nmm^{-2}. Kulový kloub je zde využíván pro rotaci kolem osy z v rozsahu ±35°, kolem osy x v rozsahu ±6° a kolem osy y v rozsahu ±5°.

Tab. 35. Geometrické parametry kloubu BC

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$D_{čepu_BC}$	30mm	H_{t1_BC}	31mm
H_{p_BC}	18mm	H_{t2_BC}	17,5mm
$L_{otlačna_BC}$	22mm	R_{zakr1_BC}	37mm
$N_{šroubů}$ (M20)	8	S_3 (M20)	217mm^2
D_{p_BC}	47mm	R_{zakr2_BC}	33mm
R_F_G	80mm	F_{G_BC}	421,83N
B_{t_BC}	66+1,057*x(mm)	h_{t_BC}	45mm
H_{t_BC}	80mm		



Obr. 41. *Schéma tělesa I horního kloubu AB (CD) [autor]*

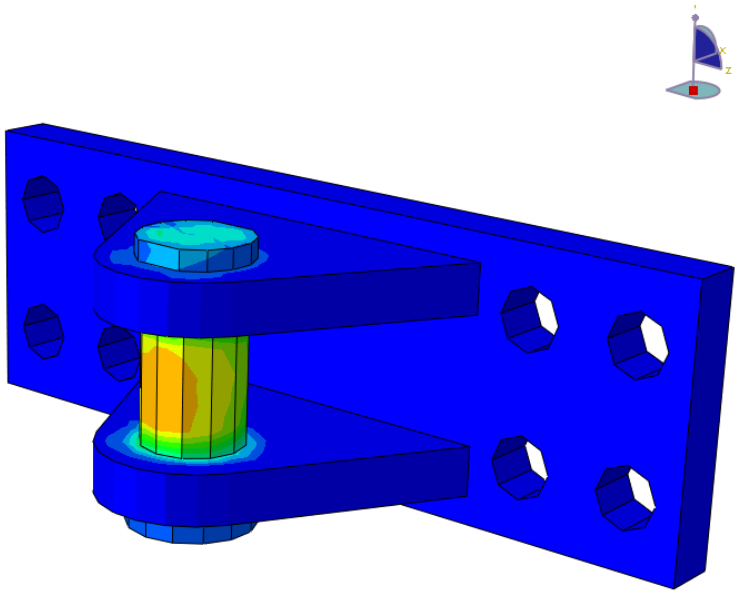
Kontrola tělesa kloubu I na ohyb od mezimostu

$$M_{BC_t_oh} = F_{G_BC} \cdot R_{Fg} = 421{,}83 \cdot 60 = 25309 Nmm \quad (54)$$

$$\sigma_{oh_t_BC} = \frac{M_{BC_t_oh}}{W_{o_t_BC}} = \frac{M_{BC_t_oh}}{\frac{\frac{1}{12} \cdot B_{t_BC} \cdot H_{t_BC}^3 - \frac{1}{12} \cdot B_{t_BC} \cdot h_{t_BC}^3}{\frac{H_{t_BC}}{2}}} = 0{,}22 Nmm^{-2} \quad (55)$$

$$k_{oh_t_AB} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{oh_t_BC}} = \frac{323}{0{,}22} = 1468 \quad (56)$$

Kontrola tělesa kloubu I na ohyb od mezimostu provedena metodou MKP (Podrobněji v příloze 18. Těleso II není na ohyb od mezimostu namáháno.)



Obr. 42. *MKP kontrola tělesa dolního kloubu BC [autor]*

Na obr. 42 jsou vidět, že napětí v kritickém místě svaru tělesa je velmi nízké. Hodnota 2,4 Nmm^{-2} je sice 20x vyšší než hodnota vypočtená, což je ovlivněno diskretizační chybou sítě v daném místě, ale na životnost konstrukce to nemá vliv. Porovnání výsledů výpočtu svaru tělesa je uvedeno v tab. 36.

Tab. 36. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa kloubu BC

Vyšetřované místo	**Svar nosného tělesa**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	0,22	0,6
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	172 %	Nevyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.4 Spojovací kloub B-C	

Kontrola únosnosti kulového kloubu je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola na otlačení pouzdra kulového kloubu je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola na otlačení spojovacího čepu je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola na střih spojovacího čepu je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

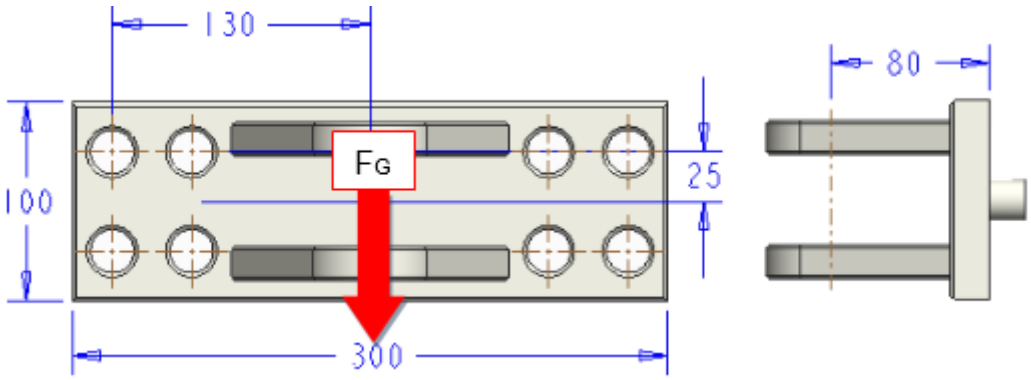
Kontrola kritického průřezu tělesa kloubu I je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola kritického průřezu tělesa kloubu II je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola šroubového spojení kloub-nosný rám je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D).

Kontrola na ohyb šroubového pole

Šroubové spojení je realizováno osmi šrouby M20x25x65 ČSN EN 21014-12.9 v minimální rozteči 40 mm od sebe kvůli montážnímu prostoru.



Obr. 43. *Schéma šroubového pole dolního kloubu BC [autor]*

Tab. 37. Parametry šroubového pole dolního kloubu BC

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$N_{š_d_BC}$	8	S_{3_M20}	217mm^2
$Q_{š_d_BC}$	92856N	$X_{BC_d_kraj}$	25mm
$S_{podst_d_BC}$	30000mm^2	$R_{čep_BC_d}$	80mm

$$p_{o_d_BC} = \frac{n_{š_d_BC} \cdot Q_{š_d_BC}}{S_{podst_d_BC}} = \frac{8 \cdot 92856}{30000} = 24{,}76 Nmm^{-2}; p_{tah_d_BC} = 0 Nmm^{-2} \quad (57)$$

$$p_{ohyb_d_BC_\max} = \frac{F_{G_BC} \cdot r_{čep_BC_d} \cdot x_{BC_d_kraj}}{n_{sr_rada} \cdot S_{sroubu_rada} \cdot x^2_{BC_d_kraj}} = \frac{421 \cdot 80 \cdot 25}{4 \cdot 217 \cdot 25^2} = 1{,}55 Nmm^{-2} \quad (58)$$

$$p_{\max_d_BC} = p_{0_d_BC} - p_{tah_d_BC} + p_{ohyb_d_BC_\max} = 24{,}76 - 0 + 1{,}55 = 26{,}3 Nmm^{-2} \quad (59)$$

$$p_{\min_d_BC} = p_{0_d_BC} - p_{tah_d_BC} - p_{ohyb_d_BC_\max} = 24{,}76 - 0 - 1{,}55 = 23{,}2 Nmm^{-2} \quad (60)$$

Kontrola svarů tělesa 1 (2x koutový 120 a15)

$$\tau_{t_sv_BC_d} = \frac{F_{AB_c}}{2 \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h_{sv_BC_d}} = \frac{200000}{2 \cdot 120 \cdot 15} = 55{,}55 Nmm^{-2} \quad (61)$$

$$\tau_{oh_sv_BC_d} = \frac{F_{G_BC} \cdot r_{cep_BC_d_sv}}{\frac{1}{3} \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h^2{}_{red_sv_BC_d}} = \frac{421 \cdot 60}{\frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 30^2} = 0{,}7 Nmm^{-2} \quad (62)$$

$$\tau_{r_sv_BC_d} = \frac{F_{G_BC}}{2 \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h_{sv_BC_d}} = \frac{421}{2 \cdot 120 \cdot 15} = 0{,}12 Nmm^{-2} \quad (63)$$

$$\tau_{red_BC_d} = \sqrt{(\frac{\tau_{t_sv_BC_d} + \tau_{oh_sv_BC_d}}{\alpha_\tau})^2 + (\frac{\tau_{r_sv_BC_d}}{\alpha_\Updownarrow})^2} = 93{,}75 Nmm^{-2} \quad (64)$$

$$k_{sv_BC_d} = \frac{R_{e_S355}}{\tau_{red_BC_d}} = \frac{323}{93{,}75} = 3{,}44 \quad (65)$$

Kontrola svarů tělesa 2 (4x koutový 120 a15)

$$\tau_{t_sv_BC_d2} = \frac{F_{AB_c}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h_{sv_BC_d}} = \frac{200000}{2 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 15} = 27{,}78 Nmm^{-2} \quad (66)$$

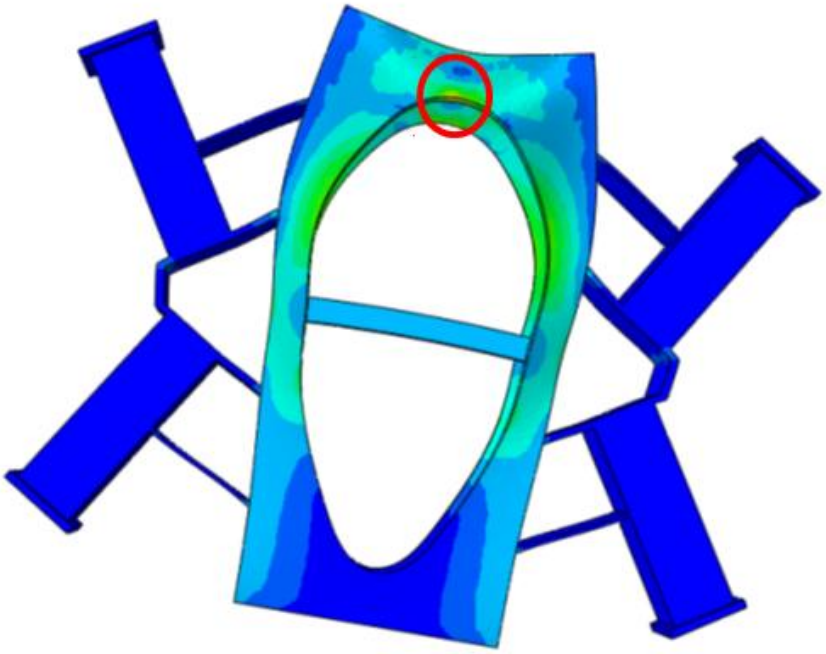
$$\tau_{oh_sv_BC_d2} = \frac{F_{G_BC} \cdot r_{cep_BC_d_sv}}{\frac{1}{3} \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h^2{}_{red_sv_BC_d}} = \frac{421 \cdot 60}{\frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 30^2} = 0{,}7 Nmm^{-2} \quad (67)$$

$$\tau_{r_sv_BC_d2} = \frac{F_{G_BC}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_BC_d} \cdot h_{sv_BC_d}} = \frac{421}{2 \cdot 2 \cdot 120 \cdot 30} = 0{,}03 Nmm^{-2} \quad (68)$$

$$\tau_{red_BC_d2} = \sqrt{(\frac{\tau_{t_sv_BC_d2} + \tau_{oh_sv_BC_d2}}{\alpha_\tau})^2 + (\frac{\tau_{r_sv_B_d2}}{\alpha_\Updownarrow})^2} = 47{,}46 Nmm^{-2} \quad (69)$$

$$k_{sv_BC_d2} = \frac{R_{e_S355}}{\tau_{red_BC_d2}} = \frac{323}{47,46} = 6,8 \quad (70)$$

Kontrola mezimostu je provedena vzhledem ke složitosti konstrukce metodou MKP (Podrobněji v příloze 19).

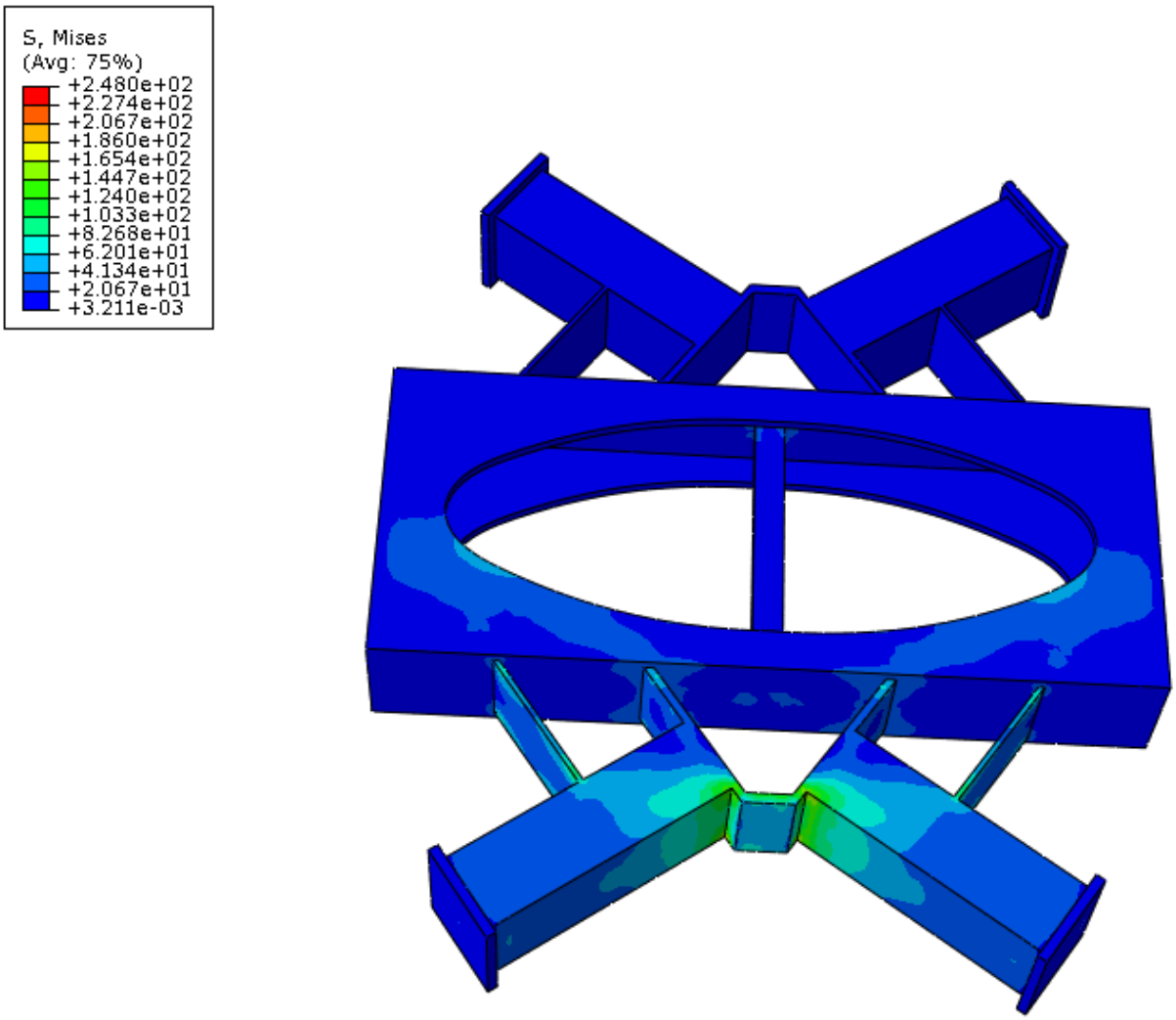


Obr. 44. *MKP kontrola mezimostu [autor]*

Špička napětí je na očekávaném místě konstrukce. Její hodnota 168 Nmm^{-2} je nižší než je mez kluzu materiálu mezimostu a těleso tak splňuje pevnostní kontrolu. Kritickým místem konstrukce je také rozpěrná výztuha uprostřed tělesa, ve které není vysoké napětí, ale svary připevňující jí k hlavnímu tělesu mezimostu je nutno pečlivě zkontrolovat, protože jejich selhání by vedlo ke ztrátě funkce tělesa mezimostu. Integrovanou součástí mezimostu jsou narážky pro přechod BC, jejichž porovnání výsledků kontrol jsou uvedeny v tab. 38.

Tab. 38. Porovnání MKP a analytického výpočtu u narážek mezimostu kloubu BC

Vyšetřované místo	**Nosný plech narážky**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	166	144
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	11,5 %	Vyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.7 Narážky B-C	



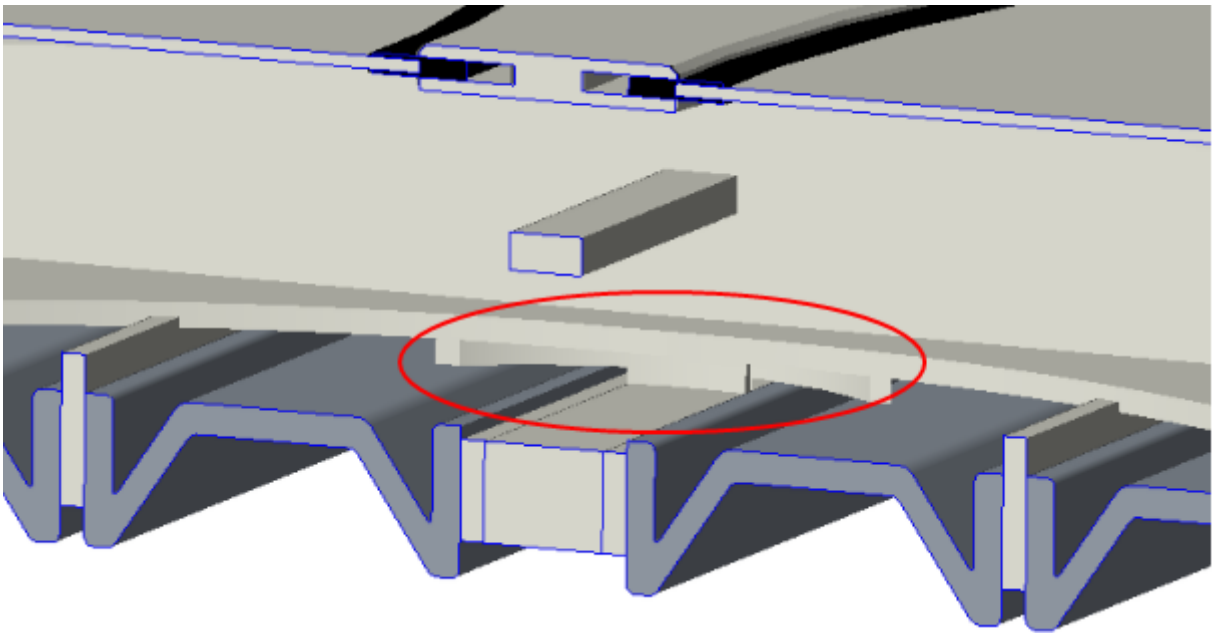
Obr. 45. *MKP kontrola integrovaných narážek mezimostu [autor]*

Špička napětí je na očekávaném místě připojení nosného plechu narážek k hlavnímu tělesu mezimostu. Její hodnota 248 Nmm^{-2} je nižší než je mez kluzu materiálu mezimostu a těleso tak splňuje pevnostní kontrolu. Kritickým místem konstrukce je také místo připojení narážky k nosnému plechu narážek, ve kterém není vysoké napětí, ale svary připevňující je k nosnému plechu narážek je nutno pečlivě zkontrolovat, protože jejich selhání by vedlo ke ztrátě funkce tělesa mezimostu.

Všechny kontroly vyhovují.

7.5 Nosný kloub měchu B-C

Kloub zajišťuje nesení, vedení a středění krycího měchu. Středění je řešeno lemniskátovým mechanismem, který zajišťuje vždy centrální pozici nosného kulového kloubu. Dalším možným řešením je centrování zajištěné přes pružiny na nosných trubkách, které je konstrukčně jednodušší, ale pružiny jsou náchylnější na únavu a vedlo by to ke zvýšení pravděpodobnosti poruchy celého nosného kloubu. Výkyvu měchu do stran brání narážka pod mezimostem (viz obr. 46). Parametry mechanismu jsou uvedeny v tab. 39.



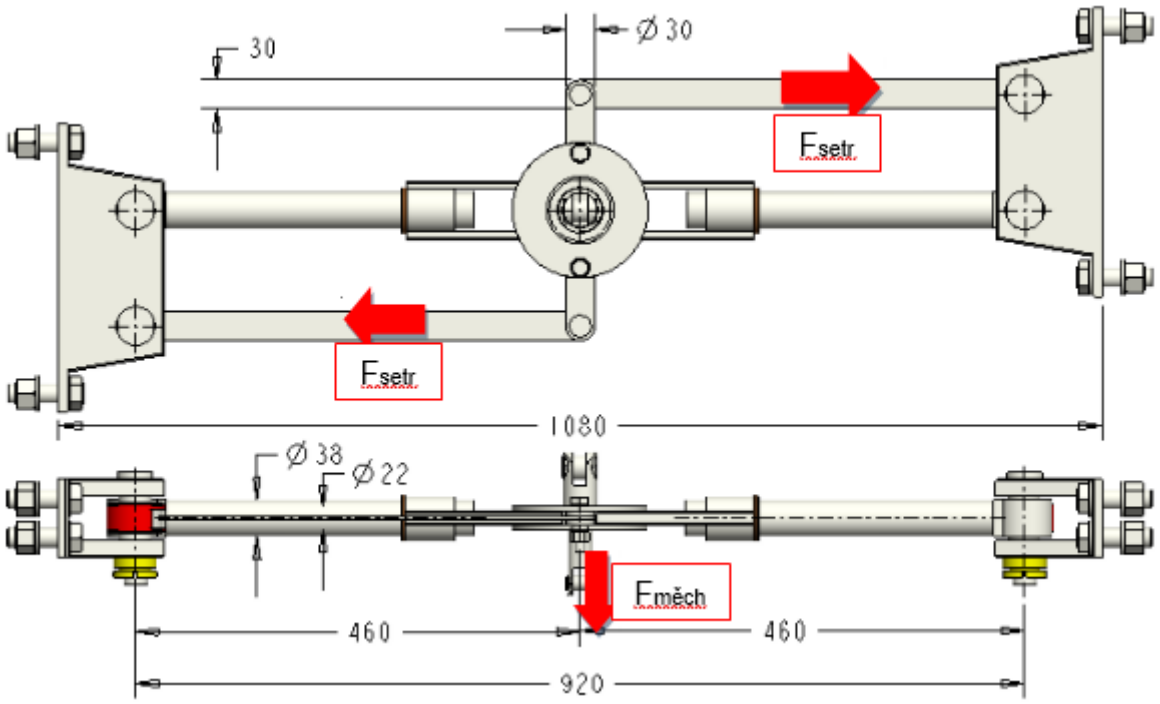
Obr. 46. *Narážky rámu měchu BC [autor]*

Tab. 39. Parametry nosného kloubu měchu B-C

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$B_{pásu_BC}$	30mm	Z_{nosn_BC}	920mm
$H_{pásu_BC}$	5mm	$m_{měch_cast_BC}$	400kg
D_{ex_bc}	38mm	$m_{měch_BC}$	600kg
D_{in_bc}	22mm	D_{cep_l}	18mm
L_{otl_l}	5mm	L_{rameno_lem}	130mm

Ve vodorovném směru je kloub zatížen setrvačnými účinky hmoty kloubu při rozjezdu a brzdění. Maximální namáhání nastane při sepnutí rychlobrzdy.

$$F_{setr_BC_mech} = m_{mech_BC} \cdot a_{br} = 600 \cdot 3 = 1800N \tag{71}$$



Obr. 47. *Schéma vodorovného zatížení nosného kloubu měchu BC [autor]*

Napětí v pásu

$$\sigma_{t_pasu_bc} = \frac{F_{setr_BC_mech}}{B_{pasu_BC} \cdot H_{pasu_BC}} = \frac{1800}{30 \cdot 5} = 12 Nmm^{-2} \tag{72}$$

$$k_{t_pasu_BC} = \frac{R_{e_S235}}{\sigma_{t_pasu_BC}} = \frac{235}{12} = 19{,}58 \tag{73}$$

Ve svislém směru je mechanismus namáhán na ohyb od vlastní tíhy měchu.

$$\sigma_{óh_BC_tr} = \frac{\frac{F_{mech}(400kg)}{2} \cdot \frac{Z_{nosn}}{2}}{\frac{\frac{\pi \cdot D_{ex}^4}{64} - \frac{\pi \cdot D_{in}^4}{64}}{\frac{D_{ex}}{2}}} = \frac{\frac{3924}{2} \cdot \frac{920}{2}}{\frac{\frac{\pi \cdot 38^4}{64} - \frac{\pi \cdot 22^4}{64}}{\frac{38}{2}}} = 188{,}835 Nmm^{-2} \tag{74}$$

$$k_{oh_pasu_tr} = \frac{R_{e_S355}}{\sigma_{oh_BC_tr}} = \frac{355}{188{,}835} = 1{,}88 \tag{75}$$

Vyšší bezpečnost je vhodná vzhledem k zanedbání vlastní váhy mechanismu a středních nosných saní s přídavnými silami při jízdě v oblouku.

Kontrola svarů tělesa (4x koutový 215 a15)

$$\tau_{t_sv_BC_h} = \frac{F_{setr_BC_mech}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_BC_h} \cdot h_{sv_BC_h}} = \frac{1800}{2 \cdot 2 \cdot 215 \cdot 15} = 0{,}14 Nmm^{-2} \tag{76}$$

$$\tau_{oh_sv_BC_h} = \frac{\frac{F_{mech}}{2} \cdot \frac{Z_{nosn}}{2}}{\frac{1}{3} \cdot l_{sv_BC_h} \cdot h^2_{red_sv_BC_h}} = \frac{2943 \cdot 460}{\frac{1}{3} \cdot 215 \cdot 60^2} = 5{,}24 Nmm^{-2} \tag{77}$$

$$\tau_{r_sv_BC_h} = \frac{\frac{F_{mech}}{2}}{2 \cdot 2 \cdot l_{sv_BC_h} \cdot h_{sv_BC_h}} = \frac{2943}{2 \cdot 2 \cdot 215 \cdot 30} = 0{,}114 Nmm^{-2} \tag{78}$$

$$\tau_{red_BC_h} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{t_sv_BC_h} + \tau_{oh_sv_BC_h}}{\alpha_\tau}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{r_sv_BC_h}}{\alpha_\Updownarrow}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0{,}14 + 5{,}24}{0{,}6}\right)^2 + \left(\frac{0{,}114}{0{,}5}\right)^2} = 9{,}01 Nmm^{-2} \tag{79}$$

$$k_{sv_BC_h} = \frac{R_{e_S355}}{\tau_{red_BC_h}} = \frac{323}{9{,}01} = 35{,}8 \tag{80}$$

Kontrola šroubového pole

Šroubové spojení je realizováno čtyřmi šrouby M20x2,5x65 ČSN EN 21014-12.9 v minimální rozteči 40 mm od sebe kvůli montážnímu prostoru.

Tab. 40. Parametry šroubového spoje BC lemniskáta

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$N_{šr_BC}$	4	**$D_{2š_BC}$**	18,376mm
Typ šroubu	M25x2,5; 12.9	**$D_{3š_BC}$**	16,933mm
$S_{š_BC}$	2,5mm	**F_{th_BC}**	0,14
$\gamma_{š_BC}$	2,48°	**R_{mat_BC}**	17,25mm
$\Phi_{š_BC}$	9,18°	**M_{utah_BC}**	400Nm
$D_{m_BC_e}$	40mm	**$D_{m_BC_i}$**	25mm
$H_{1š_BC}$	1,3525mm	**$Z_{š_BC}$**	8

$$Q_{o_BC} = \frac{M_{utah_BC}}{\frac{d_{2š_AB}}{2} \cdot tg(\gamma_{š_BC} + \varphi'_{š_BC}) + f_{th_BC} \cdot R_{mat_BC}} = \frac{400000}{\frac{18{,}376}{2} \cdot tg(2{,}48 + 9{,}18) + 0{,}14 \cdot 17{,}25} = 92856N \tag{81}$$

$$F_{zat_BC_C/1š} = \frac{F_{setr_BC_mech}}{N_{BC}} = \frac{1800}{4} = 450N \le Q_{o_BC} \tag{82}$$

$$p_{z_BC} = \frac{Q_{o_BC} + F_{zat_BC_C/1š}}{\pi \cdot d_{2š_BC} \cdot H_{1š_BC} \cdot z_{š_BC}} = \frac{92856 + 112{,}5}{\pi \cdot 18{,}376 \cdot 1{,}3525 \cdot 8} = \\ = 148{,}9MPa \le p_{dov_z_AB} = 200MPa \tag{83}$$

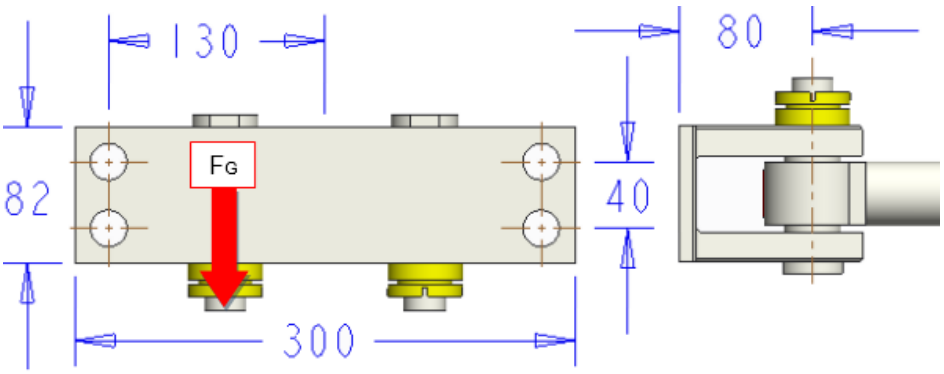
$$p_{m_BC} = \frac{Q_{o_BC} + F_{zat_BC_C/1š}}{\frac{\pi \cdot d_{m_BC_e}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{m_BC_i}^2}{4}} = \frac{92856 + 25000}{\frac{\pi \cdot 40^2}{4} - \frac{\pi \cdot 25^2}{4}} = \\ = 121{,}5MPa \le p_{dov_m_AB} = 200MPa \tag{84}$$

$$\sigma_{red_š_BC} = \sqrt{\frac{Q_{0_BC}}{S_{3_BC}} + 3 \cdot \frac{M_{kš_BC}}{W_{kš_BC}}} = 524{,}65Nmm^{-2} \tag{85}$$

$$k_{š_BC} = \frac{R_{e_š}}{\sigma_{red_š_BC}} = \frac{1000}{524{,}65} = 1{,}9 \tag{86}$$

$$F_{v_BC} = Q_{O_BC} \cdot f_{th_BC} = 92856 \cdot 0{,}14 = 13000N \ge \frac{F_{mech_BC}}{4} \tag{87}$$

Kontrola na ohyb šroubového pole



Obr. 48. *Schéma šroubového pole dolního kloubu BC [autor]*

Tab. 41. Parametry šroubového pole dolního kloubu BC

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$N_{š_h_BC}$	4	S_{3_M20}	217mm^2
$Q_{š_h_BC}$	92856N	$X_{BC_h_kraj}$	25mm
$S_{podst_h_BC}$	24600mm^2	$R_{čep_BC_h}$	80mm

$$p_{o_h_BC} = \frac{n_{š_h_BC} \cdot Q_{š_h_BC}}{S_{podst_h_BC}} = \frac{4 \cdot 92856}{24600} = 15{,}1Nmm^{-2} \tag{88}$$

$$p_{tah_h_BC} = 0 Nmm^{-2} \tag{89}$$

$$p_{ohyb_h_BC_max} = \frac{\frac{F_{mech}}{2} \cdot r_{čep_BC_h} \cdot x_{BC_h_kraj}}{n_{sr_rada} \cdot S_{sroubu_rada} \cdot x_{BC_h_kraj}^2} = \frac{\frac{1471}{2} \cdot 80 \cdot 25}{2 \cdot 217 \cdot 25^2} = 5{,}42 Nmm^{-2} \tag{90}$$

$$p_{max_h_BC} = p_{0_h_BC} - p_{tah_h_BC} + p_{ohyb_h_BC_max} = 15{,}1 - 0 + 5{,}42 = 20{,}52 Nmm^{-2} \tag{91}$$

$$p_{min_h_BC} = p_{0_h_BC} - p_{tah_h_BC} - p_{ohyb_h_BC_max} = 15{,}1 - 0 - 5{,}42 = 9{,}67 Nmm^{-2} \tag{92}$$

Kontrola spojovacích čepů

$$\sigma_{ótl_BC_l} = \frac{F_{setr_BC_mech}}{D_{cep_l} \cdot l_{otl_l}} = \frac{450}{18 \cdot 5} = 5 Nmm^{-2} \le p_{dov} = 10 Nmm^{-2} \tag{93}$$

$$\tau_{strih_BC_l} = \frac{F_{setr_BC_mech}}{2 \cdot \pi \cdot r_{cep_l}^2} = \frac{450}{2 \cdot \pi \cdot 9^2} = 4 Nmm^{-2} \le \tau_{dov} = 10 Nmm^{-2} \tag{94}$$

Všechny kontroly vyhovují.

7.6 Narážky A-B (C-D)

Narážky slouží k zajištění celistvosti jednotky při mezním stavu a ochraně spojovacího kloubu proti překročení mezního úhlu. Parametry narážek jsou uvedeny v tab. 38, schéma zatížení viz obr. 49. Zatěžovací síla byla stanovena v kapitole 7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách.

Obr. 49. *Schéma zatížení narážek A-B (C-D) [autor]*

Tab. 42. Parametry narážek A-B (C-D)

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
B_{stojny_AB}	3mm	$\delta_{odklonu}$	12,35°
H_{stojny_AB}	80mm	N_{stojen_AB}	2

$$F_{A-B_stojna} = \frac{F_{AB_c}}{n_{stojen_AB}} = \frac{100000}{2} = 50000N \tag{95}$$

$$F_{A-B_odklon_stojna} = \frac{F_{A-B_stojna}}{\cos\delta_{odklonu}} = \frac{50000}{\cos(12{,}35)} = 51193N \tag{96}$$

$$\sigma_{odklon_stojna_AB} = \frac{F_{A-B_odklon_stojna}}{S_{stojny_AB}} = \frac{F_{A-B_odklon_stojna}}{B_{stojny_AB}\cdot H_{stojny_AB}} = \frac{51193}{3\cdot 80} = 213Nmm^{-2} \tag{97}$$

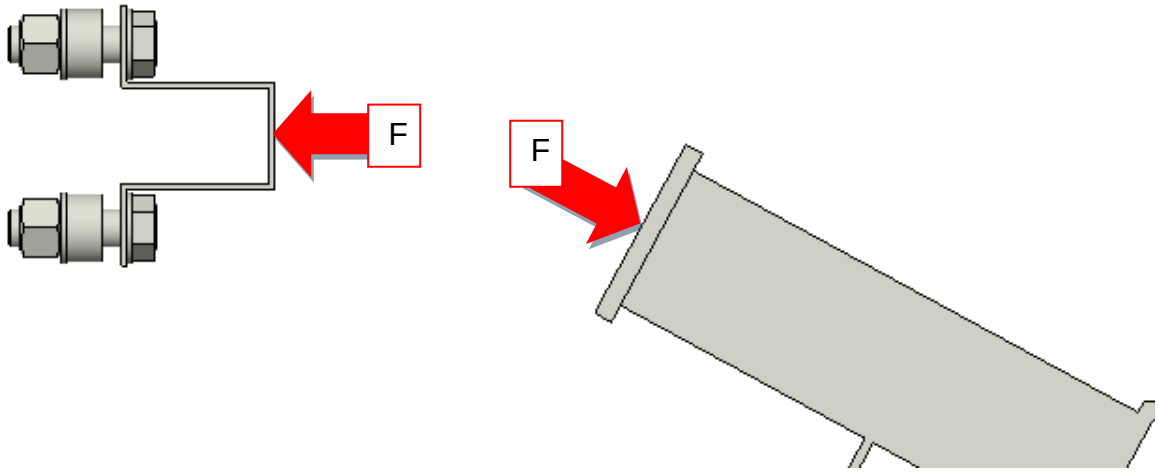
$$k_{stojny_AB} = \frac{R_{e_S235}}{\sigma_{odklon_stojna_AB}} = \frac{235}{213} = 1{,}1 \tag{98}$$

Kontrola šroubového pole je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D) s úpravou polovičního zatížení a polovičního počtu šroubů, což vede ke stejným výsledkům.

Všechny kontroly vyhovují.

7.7 Narážky B-C

Narážky slouží k zajištění celistvosti jednotky při mezním stavu a ochraně spojovacího kloubu proti překročení mezního úhlu. Parametry narážek jsou uvedeny v tab. 39, schéma zatížení viz obr. 50. Zatěžovací síla byla stanovena v kapitole 7.1.3 Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách.



Obr. 50. *Schéma zatížení narážek B-C [autor]*

Tab. 43. Parametry narážek B-C

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
B_{stojny_BC}	3mm	N_{stojen_BC}	2
H_{stojny_BC}	100mm		

$$F_{BC_stojna} = \frac{F_{BC_c}}{n_{stojen_BC}} == \frac{100000}{2} = 50000N \quad (99)$$

$$\sigma_{stojna_BC} = \frac{F_{BC_stojna}}{S_{stojny_BC}} = \frac{F_{BC_stojna}}{B_{stojny_BC} \cdot H_{stojny_BC}} = \frac{50000}{3 \cdot 100} = 166Nmm^{-2} \quad (100)$$

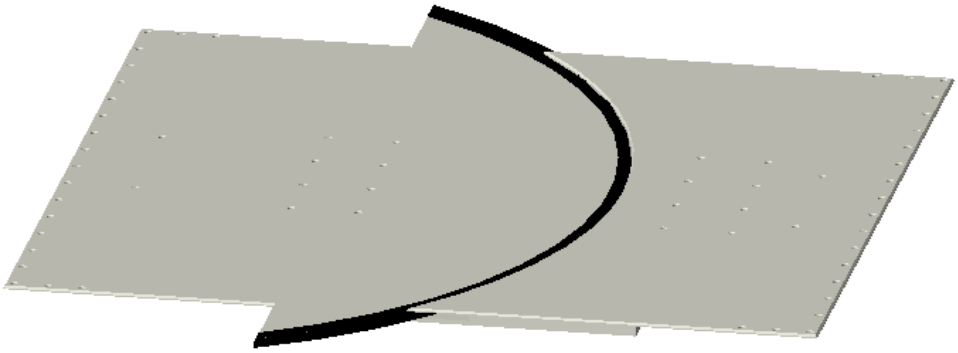
$$k_{stojny_BC} = \frac{R_{e_S235}}{\sigma_{stojna_BC}} = \frac{235}{166} = 1{,}41 \quad (101)$$

MKP kontrola narážek na mezimostu je součástí MKP kontroly mezimostu v příloze 19.

Kontrola šroubového pole je stejná jako v kapitole 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D) s úpravou polovičního zatížení a polovičního počtu šroubů, což vede ke stejným výsledkům.

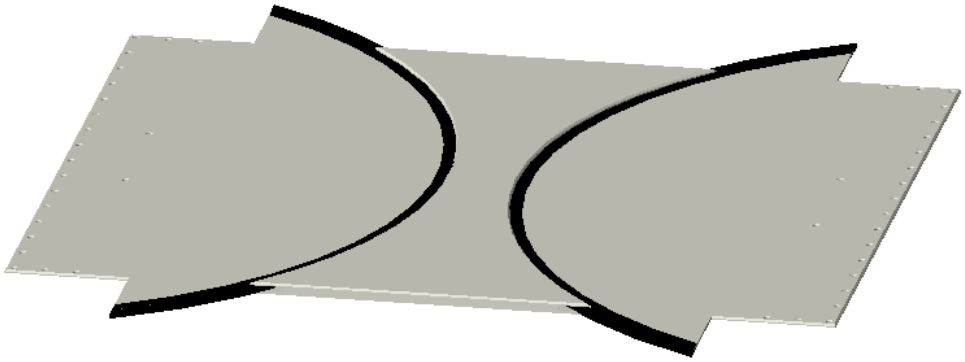
Všechny kontroly vyhovují.

7.8 Přechodový můstek A-B (C-D) a B-C



Obr. 51. *Přechodový můstek A-B [autor]*

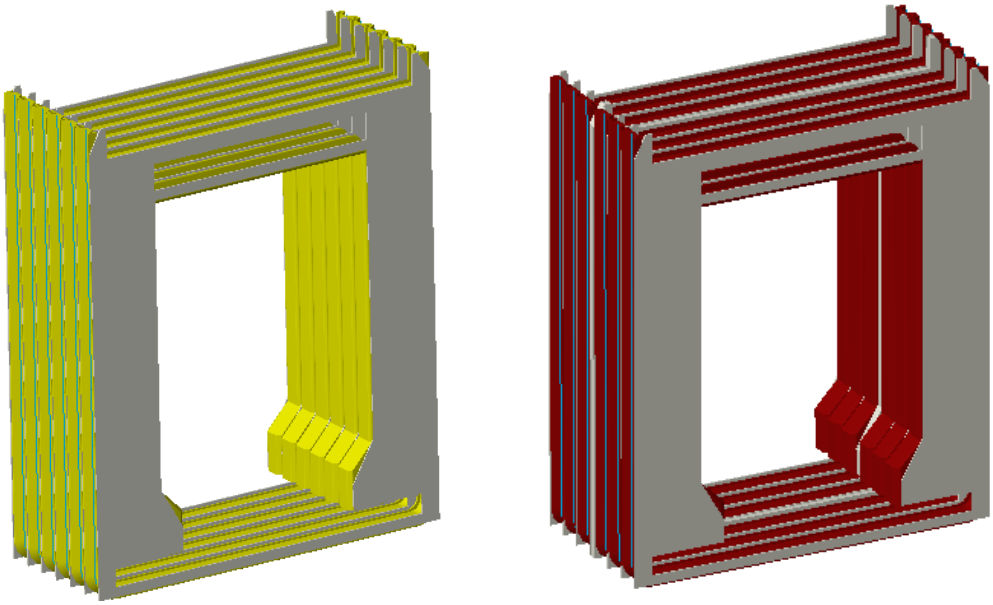
Přechodový můstek A-B je dodavatelský díl od firmy Hübner GmbH s parametry: celková šířka 1300mm, celkové délka 1150mm, tloušťka plechu 5mm a rozsah pohybu ±35°.



Obr. 52. *Přechodový můstek B-C [autor]*

Přechodový můstek B-C je dodavatelský díl od firmy Hübner GmbH s parametry: celková šířka 1300mm, celkové délka 1337mm, tloušťka plechu 5mm a rozsah pohybu 2x±35°.

7.9 Krycí měch A-B (C-D) a B-C



Obr. 53. *Krycí měch A-B(C-D [autor]) / Krycí měch (B-C [autor]*

Krycí měchy jsou dodavatelské díly od firmy Hübner GmbH. Jsou sestaveny z hliníkových nosných plechů, připojovacích plechů a pryžové krycí vrstvy ve dvou vrstvách pro splnění požadavků na ochranu a tepelnou izolaci. Parametry krycího měchu A-B jsou celková délka 900mm, tloušťka krycí pryže 3mm, hmotnost 400Kg, celková výška 2850mm, celková šířka 2332mm. Parametry krycího měchu B-C jsou celková délka 1080mm, tloušťka krycí pryže 3mm, hmotnost 600Kg, celková výška 2850mm, celková šířka 2332mm.

7.10 Sestavení mezivozového přechodu

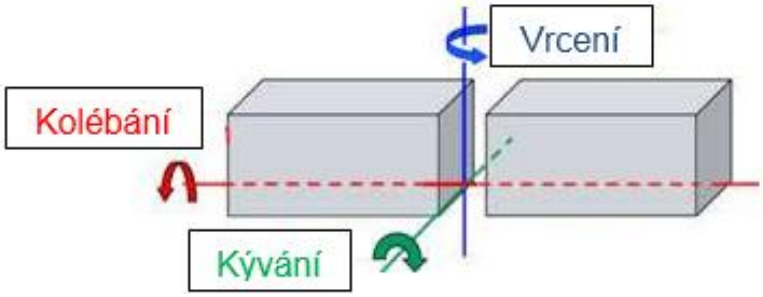
Přechody jsou na články připojeny šroubovými poli ze šroubů se šestihrannou hlavou M20x2,5x65 – 12.9 DIN 931 kvůli unifkaci spojovacího materiálu. Spojení přechodů s články rozkresleno ve výkresech P-01-AB a P-01-BC. Spojení můstku a článku je dáno připojovacími rozměry dodavatelského můstku. Všechny šroubové spoje jsou pojištěny proti samovolnému uvolnění podlepením a řádným proškolením montážních pracovníků. Utahovací momenty jsou uvedeny na výkresech podsestav jednotlivých celků. Kontrola všech šroubových spojení je provedena v kapitolách 7.2 Spojovací kloub A-B (C-D), 7.3 Pojistný kloub A-B (C-D), 7.4 Spojovací kloub B-C, 7.5 Nosný kloub měchu B-C, 7.6 Narážky A-B (C-D) a 7.7 Narážky B-C.

7.11 Kontrola kolizí

Úhly pro kontrolu kolizí pro přechody AB i BC jsou zvoleny jako referenční zástupci, protože vyšetření všech přípustných kombinací není cílem této práce. Vysvětlení jednotlivých pohybů na obr. 54. Kontrola kolizí je nutná pro zajištění správné funkce narážek, kulových kloubů a lemniskátového mechanismu.

V případě nesprávné funkce narážek by nemuselo dojít k plnému využití rozsahu pohybů kulového kloubu nebo naopak by kloub nebyl pojištěn proti překročení mezního úhlu. Při kolizi objímky saní nosného kulového kloubu či kolizi nosné tyče s objímkou by došlo k oddělení vodících pásů od vodící objímky a ztráty středící funkce.

Výsledky kontroly kolizí pro jednotlivé případy kombinace pohybů v tabulkách 42 a 43 (detailně v přílohách č.21 až č.31). Všechny kontroly kolizí vyhovují.



Obr. 54. *Popis pohybů kloubu [autor]*

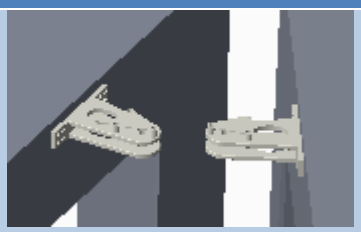
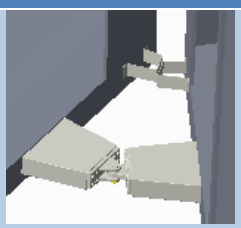
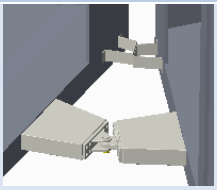
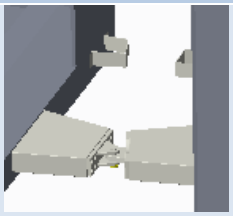
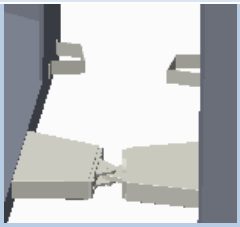
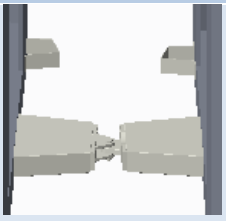
Tab. 44. Kombinace úhlů pro kontrolu kolizí přechodu AB

Vrcení [°]	Kolébání [°]
±35	±2
±35	±1,2
±30	±1,5
±20	±1,7
±10	±1,7
±5	±1,8

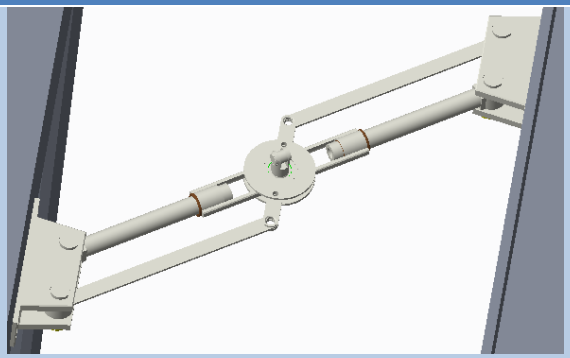
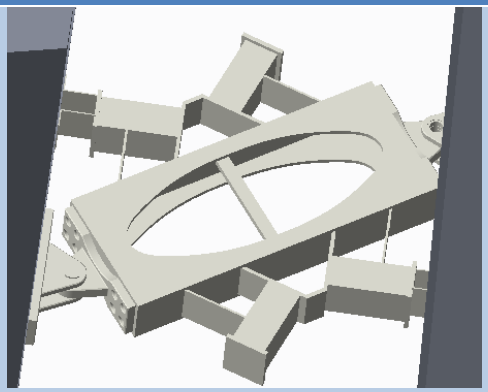
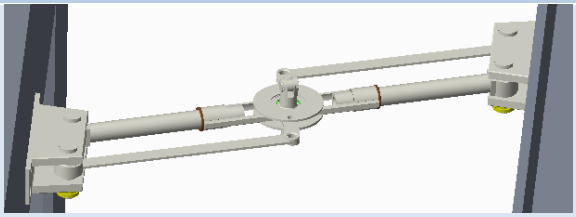
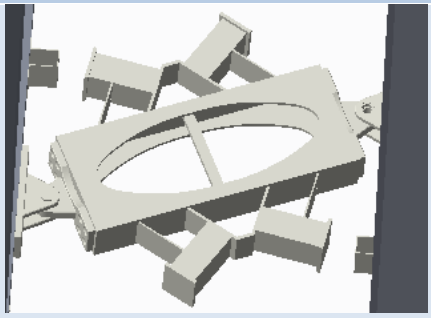
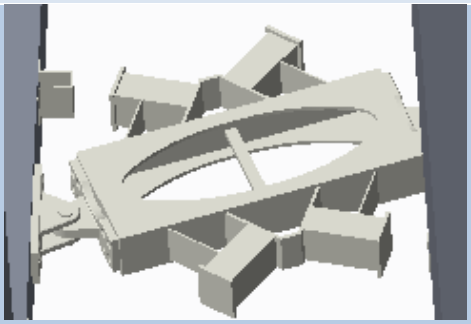
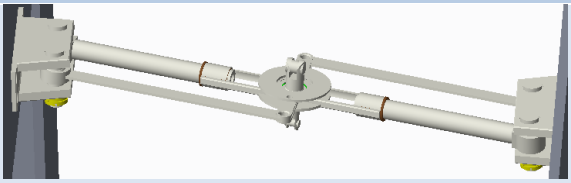
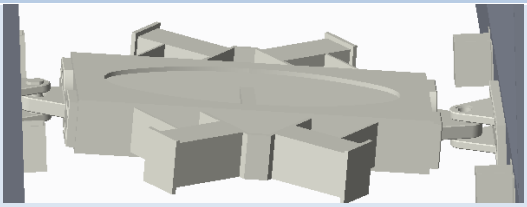
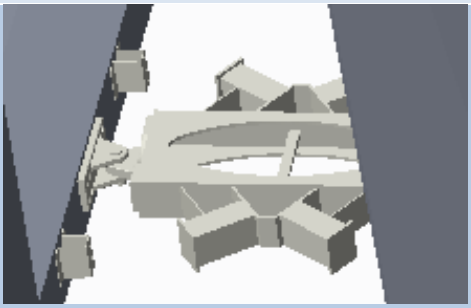
Tab. 45. Kombinace úhlů pro kontrolu kolizí přechodu BC

Vrcení [°]	Kolébání [°]	Kývání [°]
±35/35	±2	±6
±24/24	±2	±6
±21/21	±0	±0
±0/0	±0	-6/+5
±0/0	±2	-3,4/-3,4

Tab. 46. Vyšetření kolizí AB

Číslo kombinace	Horní kloub AB	Dolní kloub AB
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Tab. 47. Vyšetření kolizí BC

Číslo kombinace	Horní kloub BC	Dolní kloub BC
1		
2		
3		
4		
5		

7.12 Systémové řešení

Navržené mezivozové přechody lze aplikovat pro spojení článků jednotky sestavené z podvozkových článků (např. jednotka Avenio) v sudém počtu spojených článků (2 článkové, 4 článkové, …). Pro spojení do jednotky o lichém počtu článků je nutno použít upravený mezivozový přechod 1-2, který zajistí dostatečnou stabilitu přidaného lichého článku (např. sestavení 2+2+1). Při použití navržených mezivozových přechodů u jednotky s lichým počtem článků by hrozilo převržení nesdruženého článku nebo nemožnost průjezdu tramvajové jednotky tratí. Použití mezivozových přechodů pro nesené články není možné z pevnostních důvodů.

Tab. 48. Souhrn vlastností mezivozových přechodů a požadavků na použití

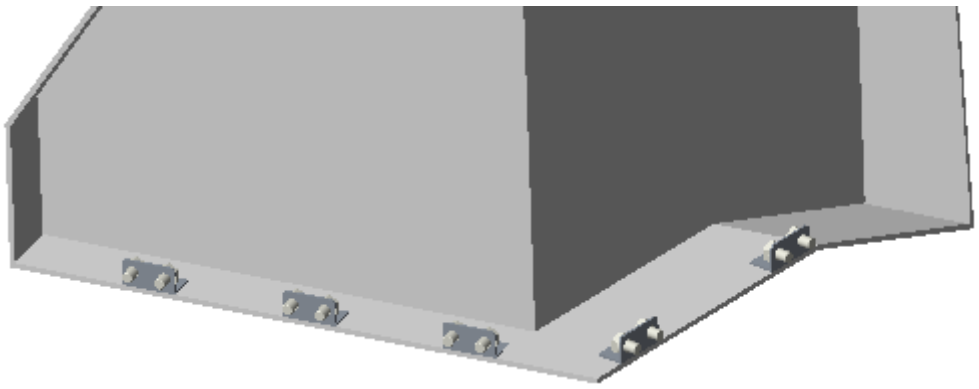
Parametr	Přechod 1-2 (3-4)	Přechod (2-3)
Typ článku	Podvozkový	Podvozkový
Počet článků	Sudý	Sudý
Délka přechodu [mm]	900	1080
Výška přehchodu [mm]	2625	2625
Šířka přechodu [mm]	2332	2332
Typ měchu	Dvouvrstvý, wallenbalg	Dvouvrstvý, wallenbalg
Tloušťka stěny měchu [mm]	3	3
Délka přechodového můstku [mm]	1040	1333
Rozsah pohybů φ(x)	0°	±5°
Rozsah pohybů φ(y)	±2°	±6°
Rozsah pohybů φ(z)	±35°	±70° (2x35°)
Připojovací materiál	40x M20x65 – 12.9	56x M20x65 – 12.9
Hmotnost přechodu [kg]	547	750
Zatěžující stav	P-5	P-5
Maximální provozní síla [N]	2314	2314
Maximální odstředivá síla na horní pojistný kloub [N]	11000	11000
Maximální rychlost jednotky pro použití [km/h]	70	70
Připojovací rozměry (výkres)	P-01-AB	P-01-BC

8. Řešení navazujících částí interiéru

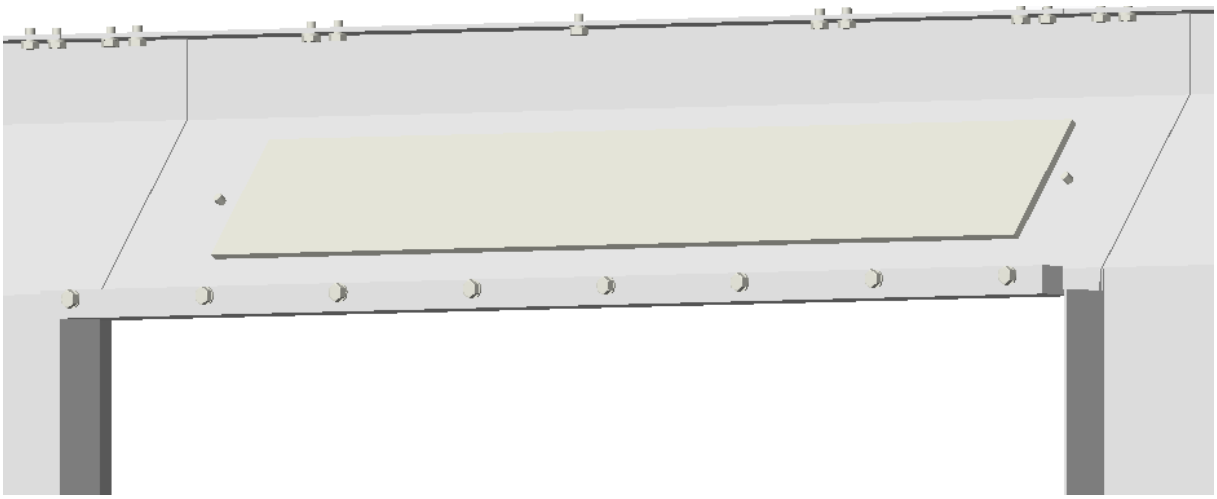
8.1 Uchycení

Panely obložení jsou uchyceny ke hrubé stavbě šroubovými spoji ze šroubů M10. Místa a způsob uchycení je volen tak, aby byl skryt před cestujícími. Pokud by byl šroubový spoj nápadný nebo snadno přístupný, byl by demontován vandaly. Vnitřní obložení přechodu je složeno z pěti laminátových panelů, které zakrývají elektrické a vzduchové vedení, izolaci a další prvky v prostoru mezi prostorem cestujících a hrubou stavbou.

Z prostoru cestujících jsou přístupné pouze dva šrouby uchycující informační panel ke střední desce. Po jejich demontáži a vyjmutí informačního panelu lze demontovat horní šrouby a po odhrnutí krycího měchu i zadní šrouby a sejmout střední krycí panel, čímž se umožní přístup k demontáži upevňovacích prvků sousedních panelů.



Obr. 55. *Spodní uchycení panelů vnitřního obložení [autor]*

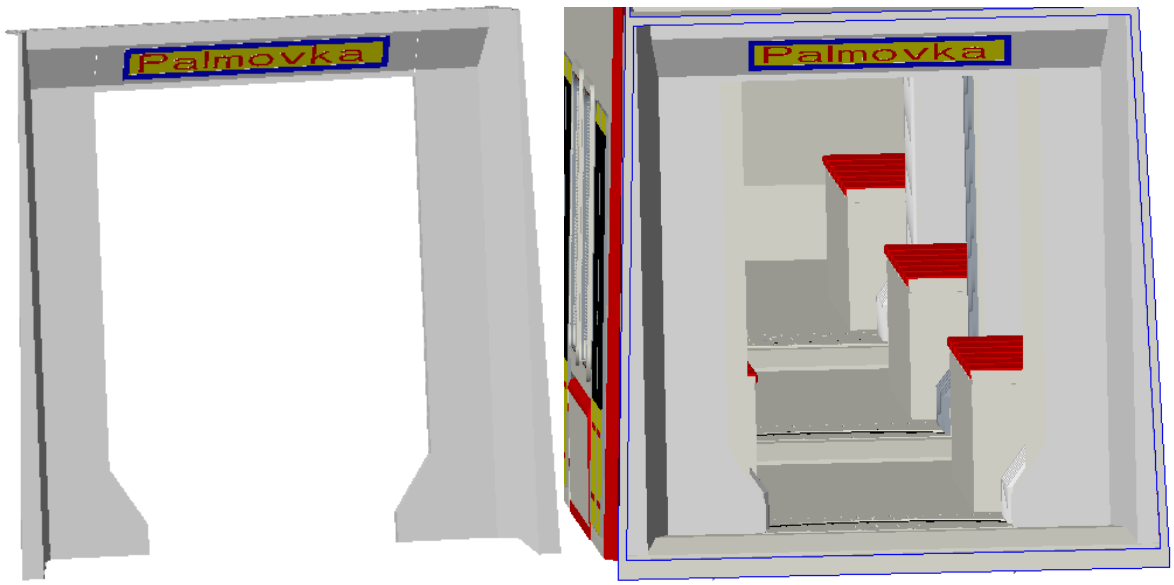


Obr. 56. *Horní uchycení panelů vnitřního obložení [autor]*

8.2 Interiér mezivozového přechodu

Interiér mezivozového přechodu se skládá z panelů vnitřního obložení, vnitřního krycího měchu a přechodového můstku. Všechny celky jsou přichyceny na hrubou stavbu jednotlivých článků šroubovými poli. U panelů vnitřního obložení může být k přichycení k upínacím prvkům použit suchý zip pojištěný nýty, kolíky či šrouby.

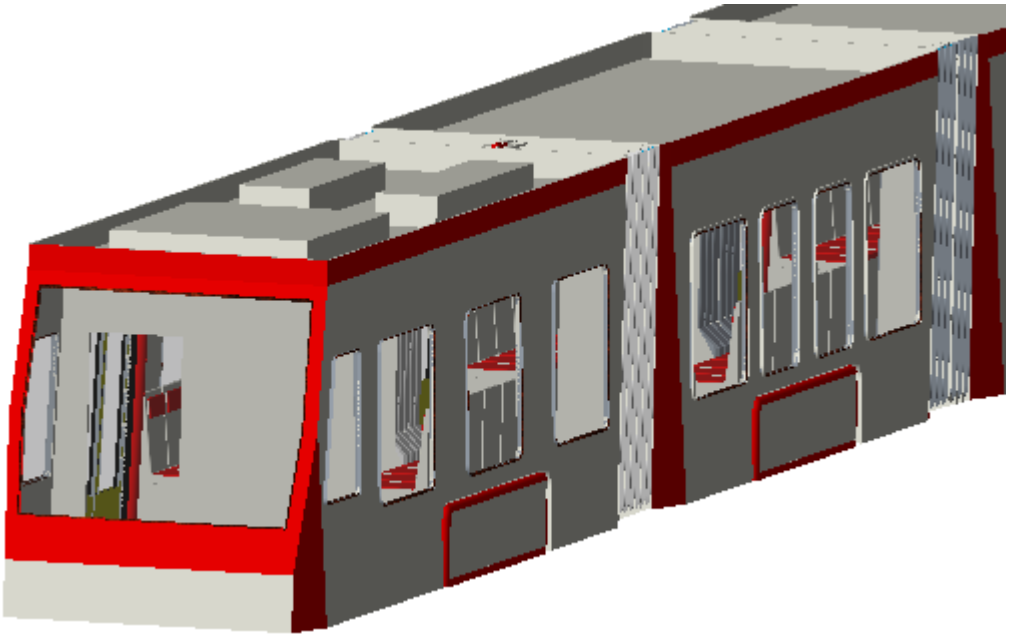
Interiér mezivozového přechodu tvoří obal prostoru cestujících a slouží ke zkvalitnění cestovního zážitku a zamezení vniknutí či zásahu cestujících do provozních či servisních prostor a zařízení, což by mohlo vést ke zranění cestujících či poškození jednotky. Materiál obložení je nehořlavý a plní funkci odhlučnění a částečně tepelné izolace (funkci tepelné izolace plní materiál mezi obložením a hrubou stavbou).



Obr. 57. *Sestava panelů vnitřního obložení mezivozového přechodu [autor] / Vzhled mezivozového přechodu s vnitřním obložením [autor]*

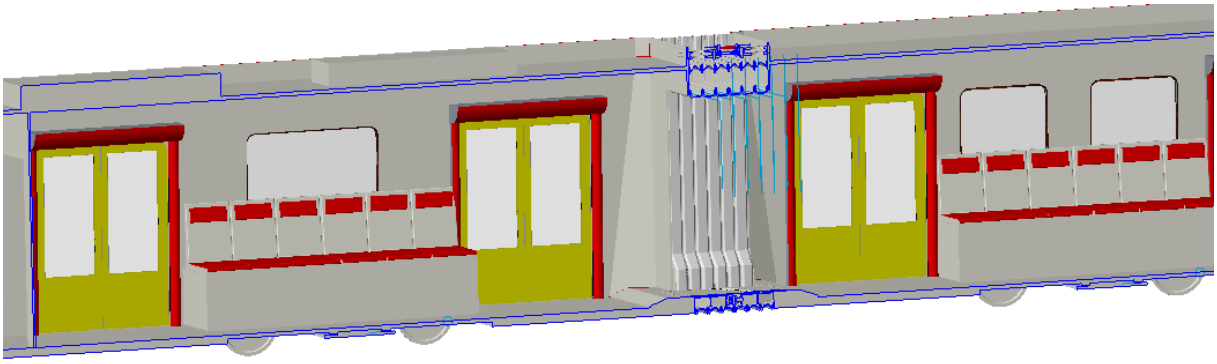
8.3 Barevná koncepce jednotky a využití přepravního prostoru

Požadavky je stanovena tradiční pražská červeno-bílá koncepce. K doplnění barev je vybrána žlutá barva, která je k požadované dvojici vhodná. Základní vnější barvou je kovová leštěná šedá s doplňující sytou červenou po obvodu. K zvýraznění dveří a snadnější orientaci jsou dveře žluté. Barvy jsou voleny syté, aby v kombinaci s velkými okny, prozářily prostor a vytvořily příjemné a veselé cestovní prostředí, což je důležité pro starší cestující, pro které je každá cesta stresující (viz. obr.58).



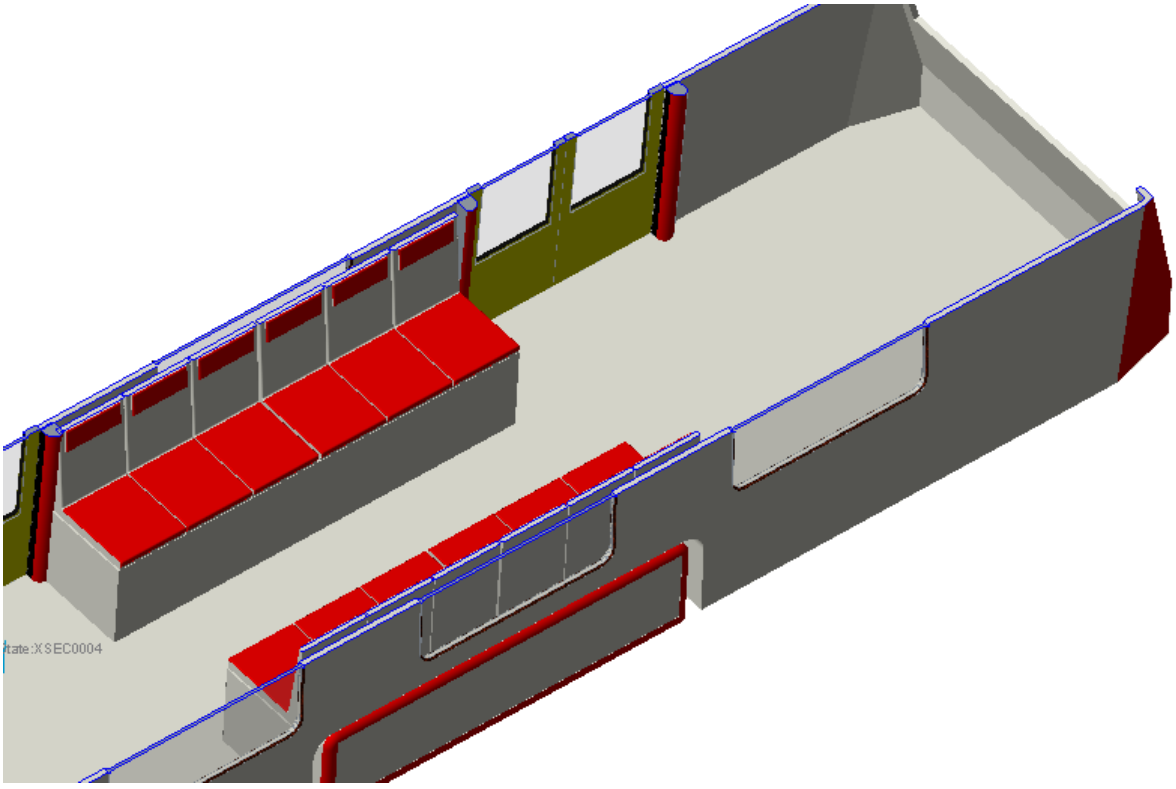
Obr. 58. *Vnější vzhled čela a boku bez dveří [autor]*

Vnitřní barevná koncepce je stejná jako u vnějšího vzhledu tramvaje. Vzhledem k umístění sedaček podélně je interiér jednolitý s velkým prostorem pro stání cestujících a pro přepravu cestujících s kolem, odrážedlem, kočárkem nebo na vozíku (viz obr.59).



Obr. 59. *Vnitřní barevná koncepce [autor]*

Přidání dalších barev by zbytečně tříštilo jednolitý vzhled interiéru, který je řešen převážně s ohledem na praktičnost a velkou přepravní kapacitu. Zástavbou sedadel do podélného směru je snížen komfort pro sedící cestující, ale zvýšena průchodnost články a přepraví kapacita. U vnějšího vzhledu je počítáno s doplněním o znaky dopravního podniku hlavního města Praha a další informační údaje, popřípadě reklamní sdělení.



Obr. 60. *Využití vnitřního prostoru zadního článku [autor]*

Závěr

V diplomové práci je navrženo systémové řešení mezivozového přechodu tramvajového vozidla pro jednotku se sudým počtem podvozkových článků. Systémové řešení se skládá ze dvou typů řešených přechodů – přechod s jednoduchým kloubem a přechod s dvojitým kloubem s rozsahy pohybů kolem osy x 35° a 2x35° zaručujících průchodnost tratěmi s oblouky malých poloměrů. Tato koncepce je zvolena dle provedené rešerše.

Schopnost průchodu tramvajovou tratí s náročnými traťovými prvky je ověřena navrženou tramvajovou jednotkou na zvolené referenční trati Prahy, kde úhly natočení kloubů v ose x nepřekročí využití rozsahu pohybů kloubů. Pro tuto trať je zkontrolován průjezdný profil navržené tramvajové jednotky s použitými navrženými mezivozovými přechody. Průjezdný profil dle příslušné normy vyhovuje.

Z pevnostního hlediska systémové řešení vyhovuje zatěžujícímu stavu P-5. Většina vyráběných dílů přechodu jsou svařence z normalizovaných polotovarů. Zbylé vyráběné díly jsou obrobky. Krycí měchy a můstky jsou dodavatelské díly. Spojení jednotlivých dílů a připojení na hrubou stavbu článků je realizováno šroubovými poli sestávajícími ze dvou typů šroubů kvůli unifikaci spojovacího materiálu. Středění nesení krycího měchu na přechodu s dvojitým kloubem je s ohledem na zvýšení spolehlivosti řešeno lemniskátovým mechanismem.

Kritická místa přechodů jsou zkontrolována metodou MKP a jejich výsledky jsou porovnány s analytickým výpočtem tam, kde byl proveden (u mezimostu přechodu s dvojitým kloubem analytický výpočet proveden nebyl z důvodu složitosti konstrukce). Analytické a MKP výsledky se shodují a u mezimostu dávají MKP výsledky věrohodné hodnoty.

Pro tramvajovou jednotku je zvolena vnější i vnitřní barevná koncepce a navržen interiér systémového řešení mezivozového přechodu zasahující do přilehlé části článku. Součástí návrhu je i koncepce využití prostoru rozmístěním sedadel pro cestující. Pro zvýšení přepravní kapacity jsou sedadla umístěna podélně ve střední části článku mezi dveřmi. Zbylý prostor je využit pro přepravu stojících cestujících, kočárků, kol a lidí s omezenou možností orientace a pohybu.

Navržené systémové řešení může být použito pro jednotky, které splňují všechny potřebné parametry pro jeho použití – rozsah pohybů spojovacích kloubů, zatěžující stav, zatěžující síly na klouby, maximální provozní rychlost, připojovací rozměry, požadovaná hmotnost, profil pro pohyb cestujících apod. V případě použití na jednotce s lichým počtem podvozkových článků musí být systémové řešení kombinováno s doplňujícím spojením nepárového článku.

Všechny body osnovy jsou splněny a všechny kontroly – pevnostní kontroly, vyšetření kinematiky, kontrola průjezdného profilu, kontrola kolizí, systematičnost řešení a MKP kontroly vyhovují.

Seznam použité literatury

[1] KOLÁŘ, Josef. *Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04262-5.

[2] *Prahou na kole: Jak zvládnout koleje* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://prahounakole.cz/2011/07/jak-zvladnout-koleje/

[3] *Normy evropských modelových železnic: PROFIL KOLEJNIC* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.parostroj.net/modely/nem/nem_121.htm

[4] *ČSN 736360: Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha*. Český normalizační institut, 2008.

[5] *INFLEX VYPOCET PROTISMERNYCH OBLOUKU: Studijní podklad*. KATEDRA DOPRAVNÍHO STAVITELSTVÍ, 2015.

[6] *Nová železniční technika*. Brno: ÚVAR-Servis, a.s. ISBN 1210-3942.

[7] *Idnes* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://praha.idnes.cz/evicka-poprve-vyjela-cestujici-sveze-ale-az-na-podzim-pdg-/metro.aspx?c=A150702_164904_co-se-deje_hyr

[8] *Thomas Meyer: Photography* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.thomas-meyer.com/

[9] *Siemens.mobility: interurban-mobility* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: https://w3.usa.siemens.com/mobility/us/en/interurban-mobility/rail-solutions/high-speed-and-intercity-trains/Documents/Houston1_DataSheet_2014_LR.pdf

[10] Ultra Low Floor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Ultra_Low_Floor

[11] Jacobs bogie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jacobs_bogie

[12] *P & S Autotechnik GmbH: Tram_app_sheet_0912* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.c-ompany.com/P-and-S-Autotechnik-GmbH

[13] *Hubner-group: GANGWAY SYSTEMS FOR TRAMS AND STREETCARS* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.hubner-group.com/en/Gangway+Systems+for+Trams.html

[14] *Method of making a gangway bellows for rolling stock: US6085403 A*. 2000. USA. Uděleno 30. červen 1999. Zapsáno 11. červenec 2000.

[15] *Hubner-group: BÄLGE* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.hubner-group.com/B%C3%A4lge-p-2502-path-1,3144,3148.html

[16] *Bahnblogstelle: Lexikon* [online]. [cit. 2016-10-24]. Dostupné z: https://bahnblogstelle.net/lexikon/scharfenbergkupplung-scharku/

[17] *Verkehrsgeschichtliche-blaetter* [online]. [cit. 2016-10-3]. Dostupné z: http://www.verkehrsgeschichtliche-blaetter.de/

[18] WHITE, John H. *The American railroad passenger car*. Johns Hopkins pbk. ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1978. ISBN 08-018-2743-4.

[19] *Historical System Data for Mechanical and Electrical Coupling of Rail Vehicles*. London EC1V 1NY: RSSB, 2014.

[20] *Hubner-group: ARTICULATED TURNING PLATE FLOORS FOR TRAMS* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.hubner-group.com/en/Articulated+Turning+Plate+Floors.html

[21] *Depozit MHD Brno: 521 - tramvaj T3* [online]. [cit. 2016-08-16]. Dostupné z: http://www.sabdigital.com/expozicemhd/?akce=exponaty-tramvaje-brno-521-tramvaj-t3

[22] ŘÍHÁNEK, Šimon. *Design tramvaje*. Brno, 2015. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Miroslav Zvonek.

[23] *Škoda transportation: Křest tramvaje* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.vlaky.net/servis/sprava.asp?lang=1&id=2701&print=1

[24] *Bombardier: Transportation* [online]. [cit. 2016-09-26]. Dostupné z: http://www.bombardier.com/en/transportation/projects/project.flexity-milan-italy.html?f-region=middle-east-and-africa

[25] *BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 8003000467.*

[26] KOLÁŘ, Josef. *Výpočet kinematického obrysu osobního vozu ČSN 28 0338: Výpočetní program os-vozy.xlc*. 2005.

Seznam příloh

Příloha 1. Vyšetření tětivové polohy v oblouku R20

Příloha 2. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku R20

Příloha 3. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku R20

Příloha 4. Vyšetření tětivové polohy v oblouku R500

Příloha 5. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku R500

Příloha 6. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku R500

Příloha 7. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS25x10,2x31,9

Příloha 8. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS25x10,2x31,9

Příloha 9. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS25x10,2x31,9

Příloha 10. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS28,8x10,9x28,2

Příloha 11. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS28,8x10,9x28,2

Příloha 12. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS28,8x10,9x28,2

Příloha 13. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS20x20

Příloha 14. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS20x20

Příloha 15. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS20x20

Příloha 16. Vyšetření jednotky v stoupání/klesání a zborcení

Příloha 17. MKP vyšetření nosného tělesa

Příloha 18. Kontrola tělesa na ohyb

Příloha 19. Kontrola mezimostu

Příloha 20. Kontrola pojistného kloubu AB na ohyb

Příloha 21. AB_K1

Příloha 22. AB_K2

Příloha 23. AB_K3

Příloha 24. AB_K4

Příloha 25. AB_K5

Příloha 26. AB_K6

Příloha 27. BC_K1

Příloha 28. BC_K2

Příloha 29. BC_K3

Příloha 30. BC_K4

Příloha 31. BC_K5

Příloha 32. Typový výkres jednotky

Příloha 33. Výkresové dokumentace

Příloha 34. Model jednotky s aplikovanými mezivozovými přechody

Seznam obrázků

Obr. 1. Žlábkové kolejnice [2] / Širokopatní kolejnice [3]

Obr. 2. Protisměrný oblouk [5]

Obr. 3. Délkové parametry [1]

Obr. 4. Silové účinky [1]

Obr. 5. Hrubá stavba tramvajového článku [7] / Combino Basel sestavené ze 4 podvozkových a 3 nesených článků [8]

Obr. 6. Jednosměrné Combino Erfurt / Obousměrná S70 [9]

Obr. 7. Portálová náprava ULF Wien [10] / Jacobsův podvozek [autor]

Obr. 8. Typy namáhání kloubu [12]

Obr. 9. Počet stupňů volnosti kloubů [13]

Obr. 10. Kloub s jedním stupněm volnosti [12] / Kloub se třemi stupni volnosti [12]

Obr. 11. Přechodový měch typu Faltenbalg [15] / Přechodový měch typu Wellenbalg [15]

Obr. 12. Spřáhlo sharfenberg [16]

Obr. 13. Spřahování u jednopolohového mechanismu [17]

Obr. 14. Spřáhlo Tomlinson [18] / Typ BSI Compact [18]

Obr. 15. Typ Albert [18]

Obr. 16. Otočné desky na dvojitém kloubu [20]

Obr. 17. Článkový můstek [20]

Obr. 18. Skloněné provedení / Provedení se zlomem [12]

Obr. 19. Rovinné provedení [12]

Obr. 20. Tatra T3 [21]

Obr. 21. Schéma uspořádání pojezdu prvních nízkopodlažních tramvají pro Grenoble [22]

Obr. 22. Škoda for city 15T [23]

Obr. 23. Flexity Milan [24]

Obr. 24. Schéma uspořádání pojezdu sedmičlánkové tramvaje NGT8DD [22]

Obr. 25. Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje s krátkými nosnými články s beznápravovými podvozky [22]

Obr. 26. Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje GT8N [22]

Obr. 27. Schéma uspořádání pojezdu nízkopodlažní tramvaje ULF [22]

Obr. 28. S70 [13]

Obr. 29. Koncepce vícečlánkových tramvají [22]

Obr. 30. Schéma protisměrného oblouku

Obr. 31. Vyšetření tětivové polohy [autor]

Obr. 32. Vyšetření vzpříčené polohy [autor]

Obr. 33. Průjezdný profil skříně jednotky [26]

Obr. 34. Průjezdný profil čela tramvajové jednotky [26]

Obr. 35. Schéma zatížení spojovacího kloubu A-B (C-D) [autor]

Obr. 36. MKP kontrola nosného rámu [autor]

Obr. 37. Schéma zatížení horního kloubu AB [autor]

Obr. 38. MKP kontrola AB horní těleso [autor]

Obr. 39. Schéma šroubového pole horního kloubu AB [autor]

Obr. 40. Schéma zatížení spodního kloubu BC [autor]

Obr. 41. Schéma tělesa I horního kloubu AB (CD) [autor]

Obr. 42. MKP kontrola tělesa dolního kloubu BC [autor]

Obr. 43. Schéma šroubového pole dolního kloubu BC [autor]

Obr. 44. MKP kontrola mezimostu [autor]

Obr. 45. MKP kontrola integrovaných narážek mezimostu [autor]

Obr. 46. Narážky rámu měchu BC [autor]

Obr. 47. Schéma vodorovného zatížení nosného kloubu měchu BC [autor]

Obr. 48. Schéma šroubového pole dolního kloubu BC [autor]

Obr. 49. Schéma zatížení narážek A-B (C-D) [autor]

Obr. 50. Schéma zatížení narážek B-C [autor]

Obr. 51. Přechodový můstek A-B [autor]

Obr. 52. Přechodový můstek B-C [autor]

Obr. 53. Krycí měch A-B(C-D [autor]) / Krycí měch (B-C [autor]

Obr. 54. Popis pohybů kloubu [autor]

Obr. 55. Spodní uchycení panelů vnitřního obložení [autor]

Obr. 56. Horní uchycení panelů vnitřního obložení [autor]

Obr. 57. Sestava panelů vnitřního obložení mezivozového přechodu [autor] / Vzhled mezivozového přechodu s vnitřním obložením [autor]

Obr. 58. Vnější vzhled čela a boku bez dveří [autor]

Obr. 59. Vnitřní barevná koncepce [autor]

Obr. 60. Využití vnitřního prostoru zadního článku [autor]

Seznam tabulek

Tab. 1. Hodnoty náhle změny nedostatky převýšení ΔI [4]

Tab. 2. Rozměrové parametry [1]

Tab. 3. Hmotnostní parametry [1]

Tab. 4. Silové účinky [1]

Tab. 5. Parametry města Praha

Tab. 6. Zvolené parametry tramvajové jednotky

Tab. 7. Zvolené základní parametry mezivozových přechodů

Tab. 8. Zvolený rozsah pohybů spojovacích kloubů

Tab. 9. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – tětivová poloha

Tab. 10. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – vzpříčená poloha 1

Tab. 11. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=20m – vzpříčená poloha 2

Tab. 12. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – tětivová poloha

Tab. 13. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – vzpříčená poloha 1

Tab. 14. Rozsah pohybů kloubů v oblouku R=500m – vzpříčená poloha 2

Tab. 15. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – tětivová poloha

Tab. 16. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – vzpříčená poloha 1

Tab. 17. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 25x10,2x31,9 – vzpříčená poloha 2

Tab. 18. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – tětivová poloha

Tab. 19. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – vzpříčená poloha 1

Tab. 20. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 28,8x10,9x28,2 – vzpříčená poloha 2

Tab. 21. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – tětivová poloha

Tab. 22. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – vzpříčená poloha 1

Tab. 23. Rozsah pohybů kloubů v protisměrném oblouku 20x20 – vzpříčená poloha 2

Tab. 24. Rozsah pohybů kloubů v stoupání – tětivová poloha

Tab. 25. Maximální rozsah pohybů kloubů

Tab. 26. Vyšetřované oblouky

Tab. 27. Vstupní hodnoty pro výpočet kinematické obrysu

Tab. 28. Přehled zatěžujících sil v spojovacích kloubech a narážkách

Tab. 29. Geometrické parametry kloubu AB

Tab. 30. Parametry šroubového spoje AB

Tab. 31. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa

Tab. 32. Geometrické parametry horního kloubu AB (CD)

Tab. 33. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa horního kloubu AB

Tab. 34. Parametry šroubového pole horního kloubu AB

Tab. 35. Geometrické parametry kloubu BC

Tab. 36. Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa kloubu BC

Tab. 37. Parametry šroubového pole dolního kloubu BC

Tab. 38. Porovnání MKP a analytického výpočtu u narážek mezimostu kloubu BC

Tab. 39. Parametry nosného kloubu měchu B-C

Tab. 40. Parametry šroubového spoje BC lemiskáta

Tab. 41. Parametry šroubového pole dolního kloubu BC

Tab. 42. Parametry narážek A-B (C-D)

Tab. 43. Parametry narážek B-C

Tab. 44. Kombinace úhlů pro kontrolu kolizí přechodu AB

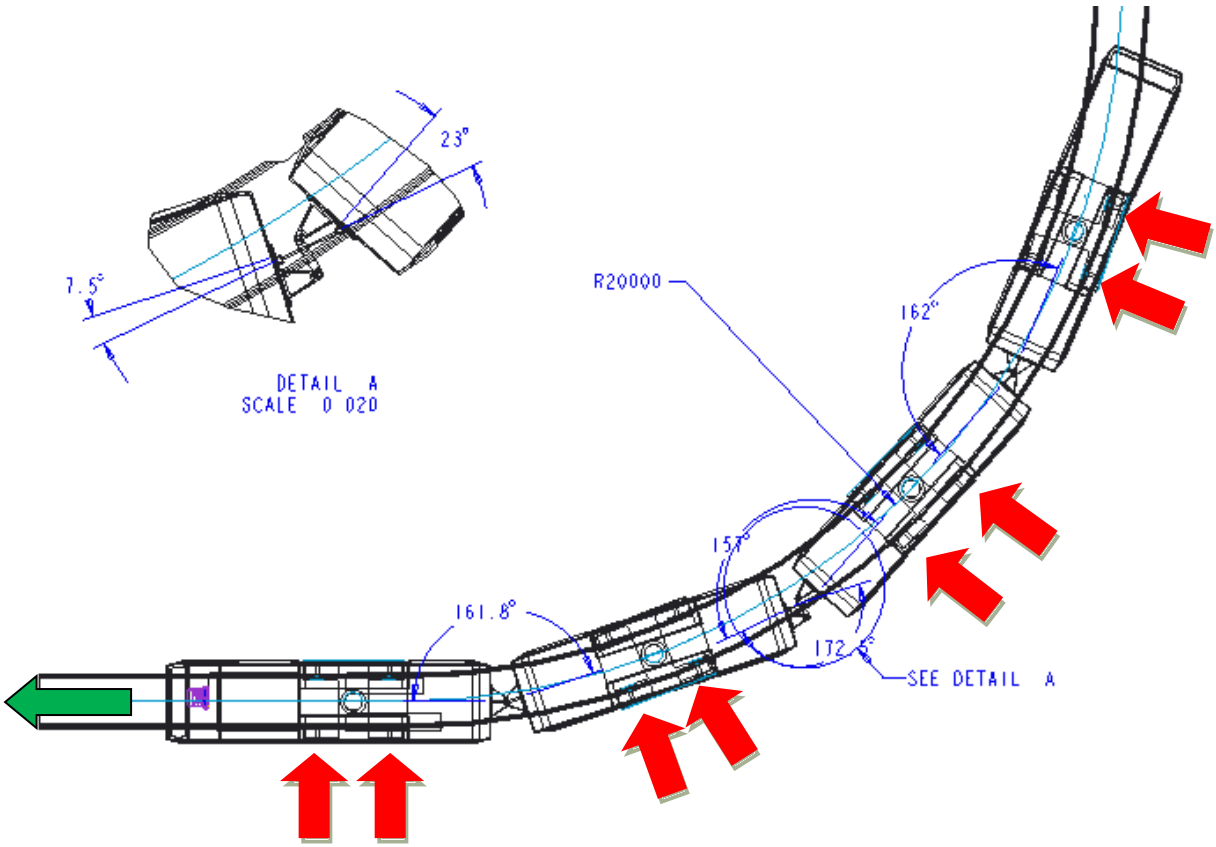
Tab. 45. Kombinace úhlů pro kontrolu kolizí přechodu BC

Tab. 46. Vyšetření kolizí AB

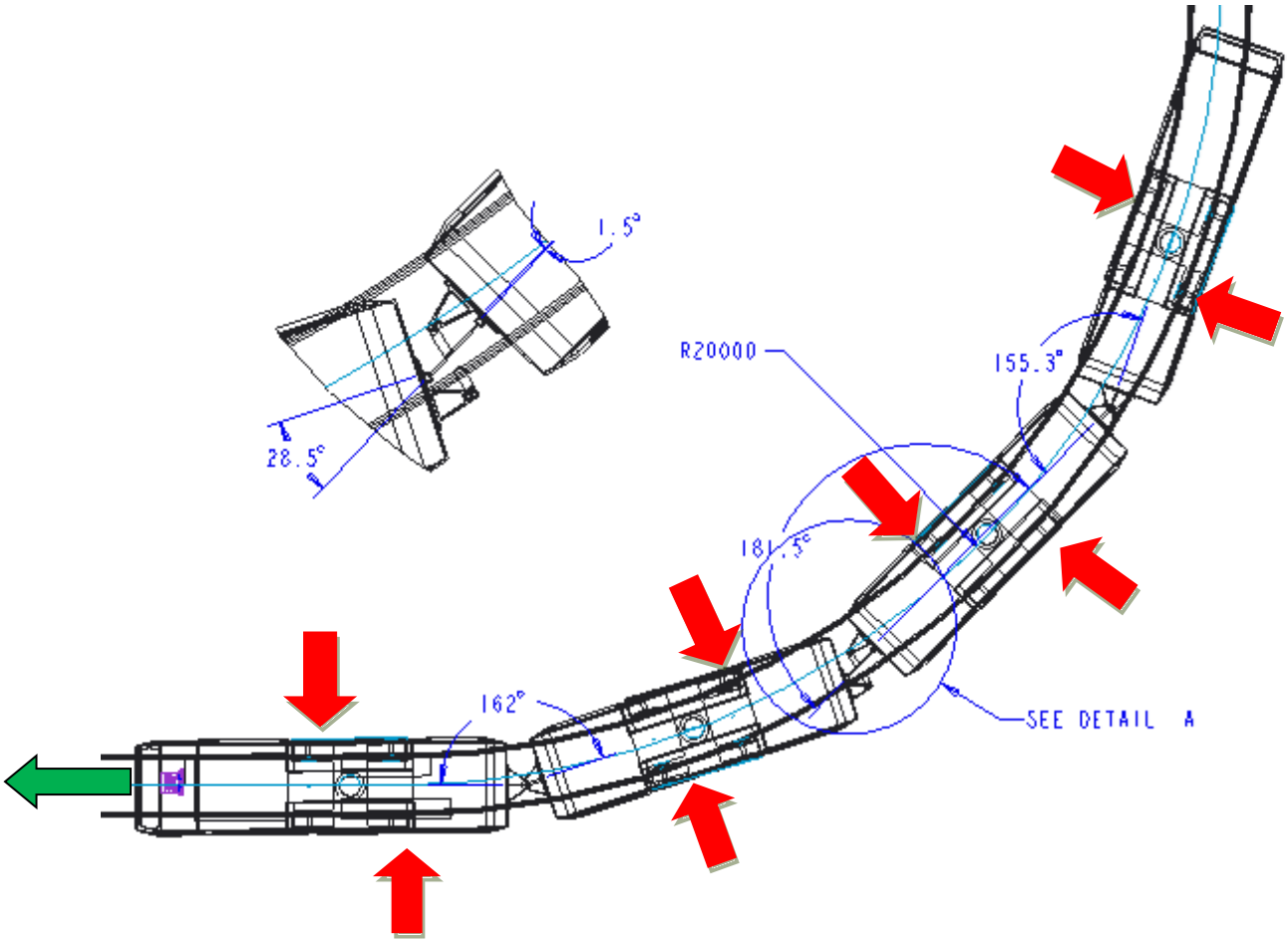
Tab. 47. Vyšetření kolizí BC

Tab. 48. Souhrn vlastností mezivozových přechodů a požadavků na použití

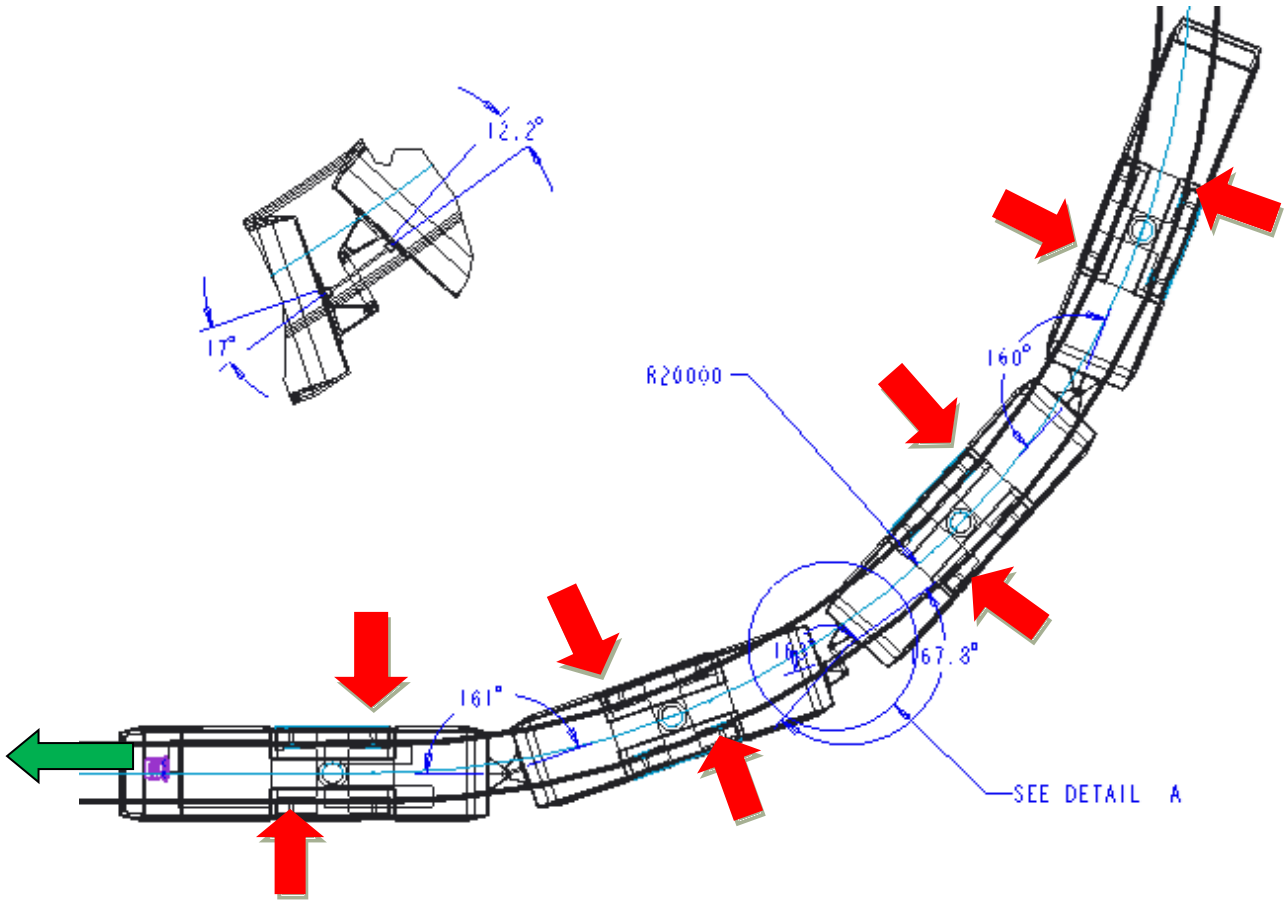
Příloha 1. Vyšetření tětivové polohy v oblouku R20



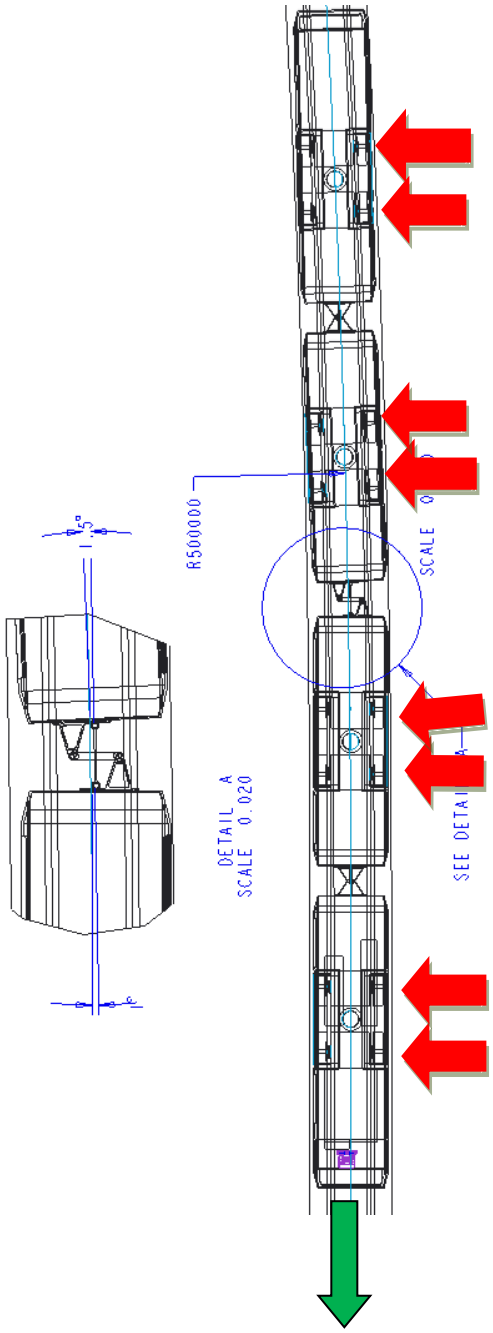
Příloha 2. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku R20



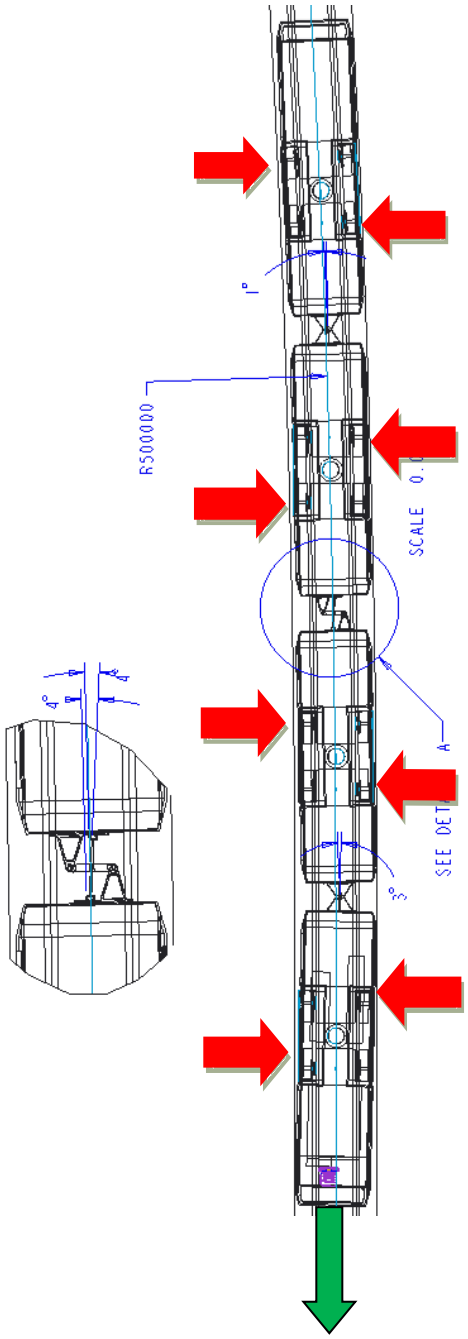
Příloha 3. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku R20



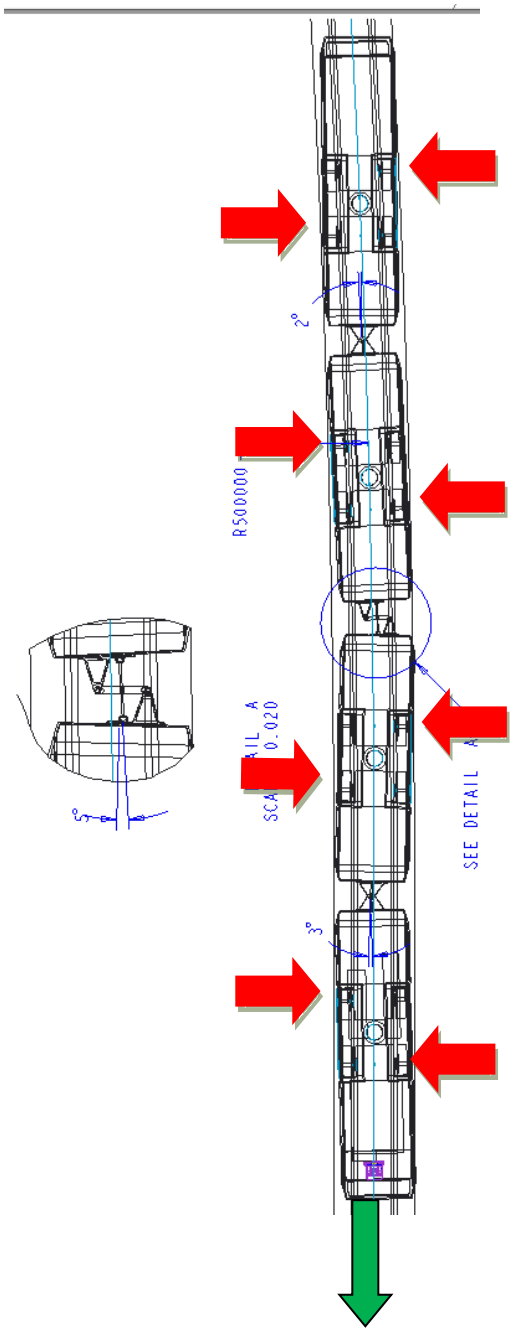
Příloha 4. Vyšetření tětivové polohy v oblouku R500



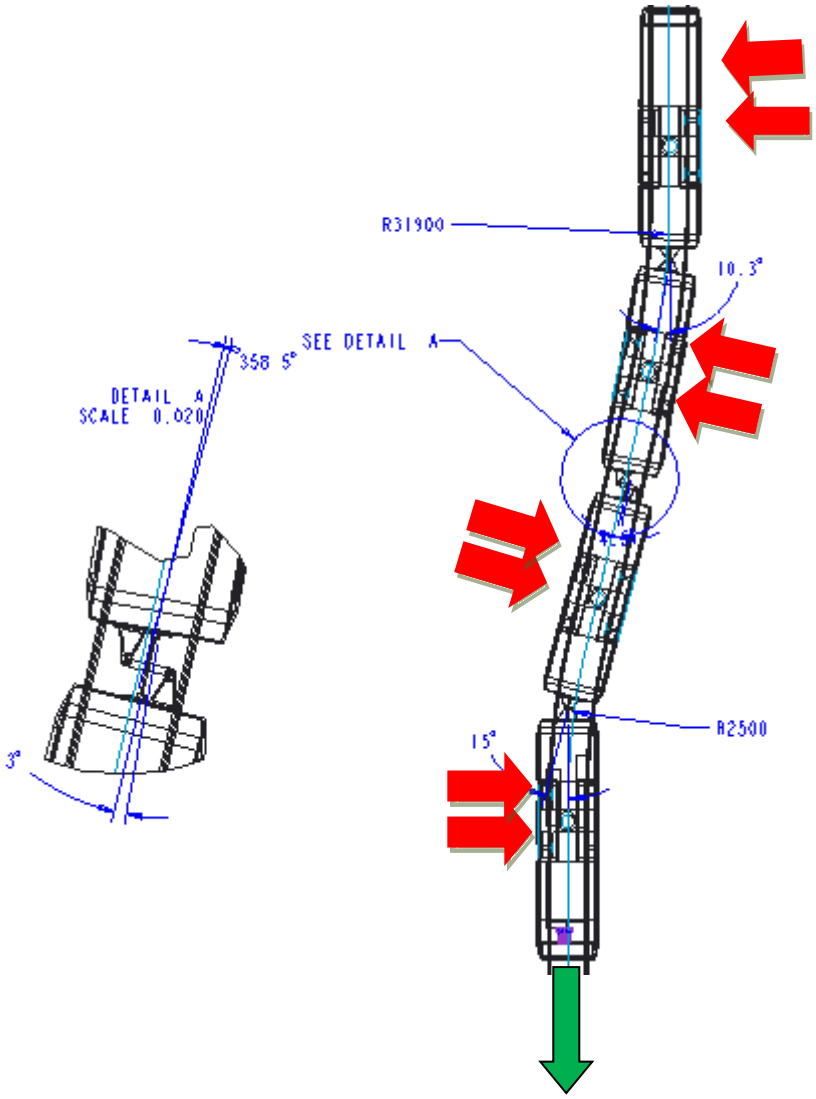
Příloha 5. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku R500



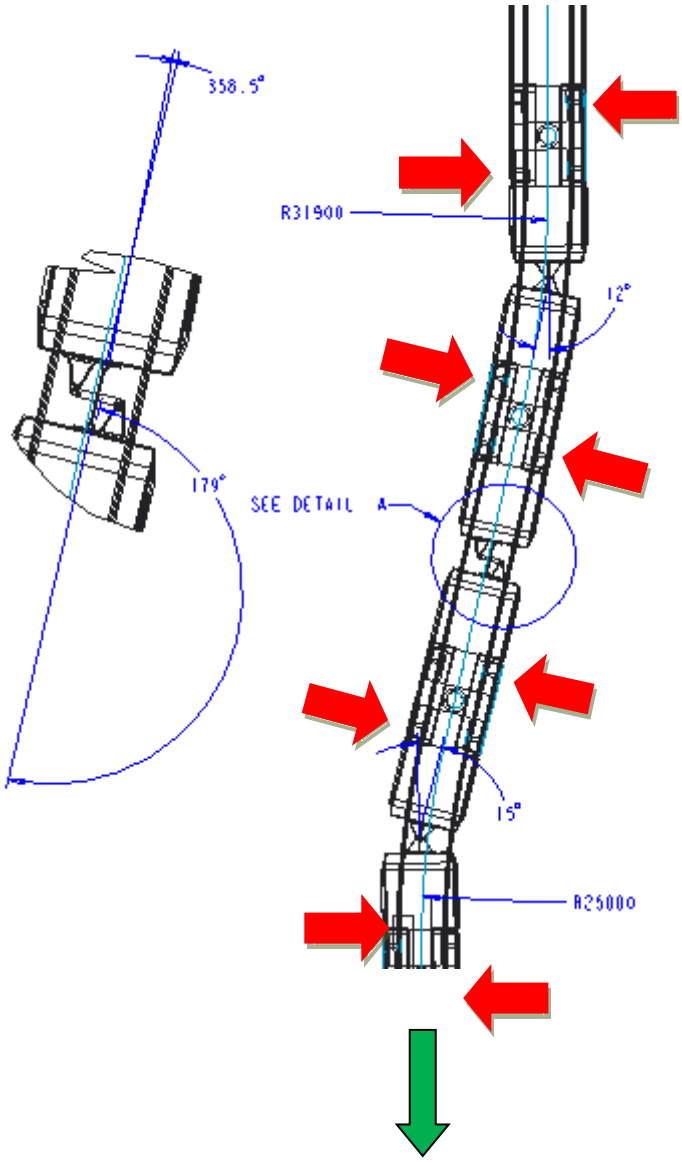
Příloha 6. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku R500



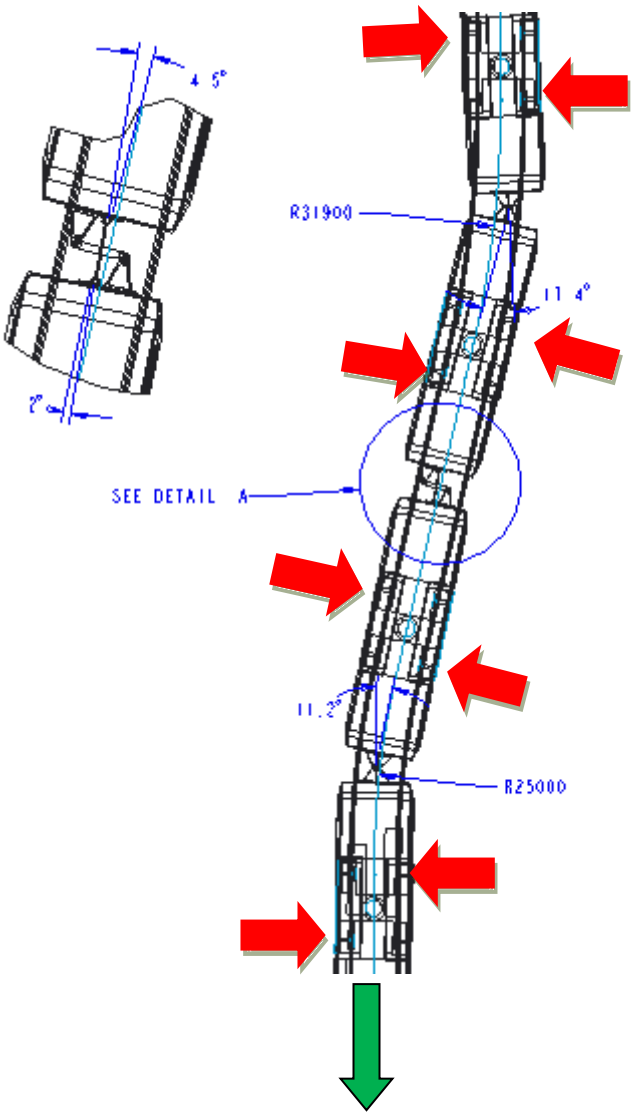
Příloha 7. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS25x10,2x31,9



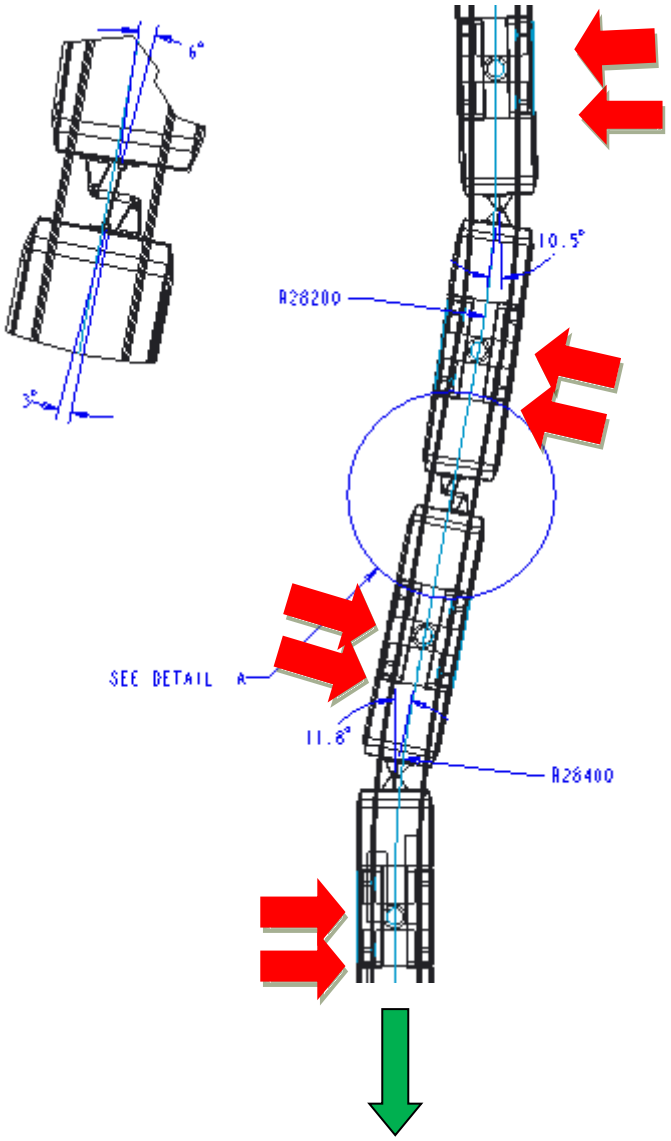
Příloha 8. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS25x10,2x31,9



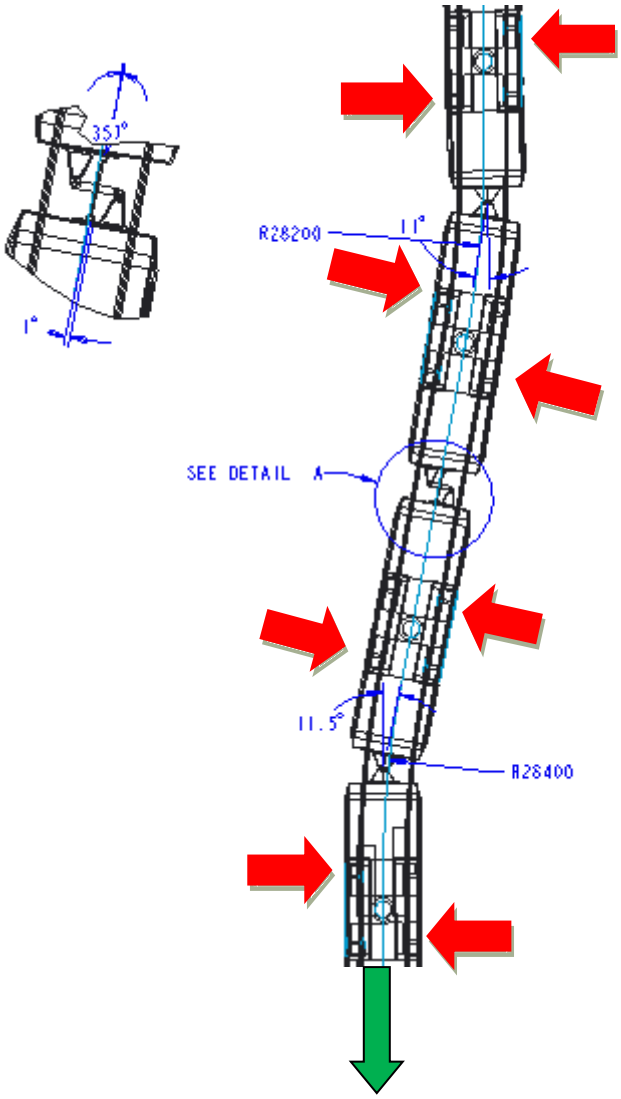
Příloha 9. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS25x10,2x31,9



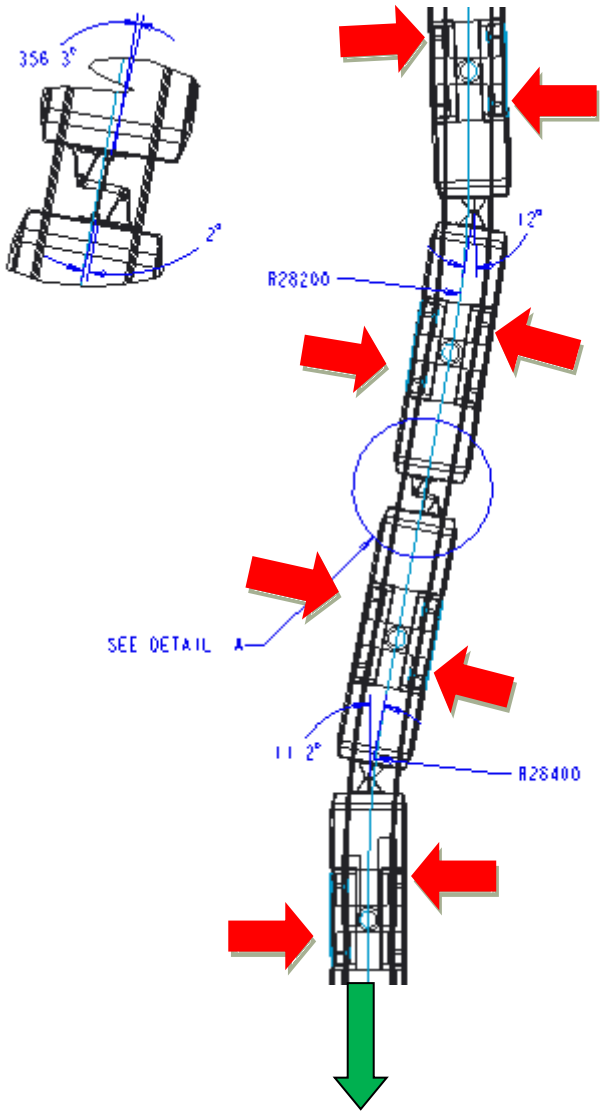
Příloha 10. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS28,8x10,9x28,2



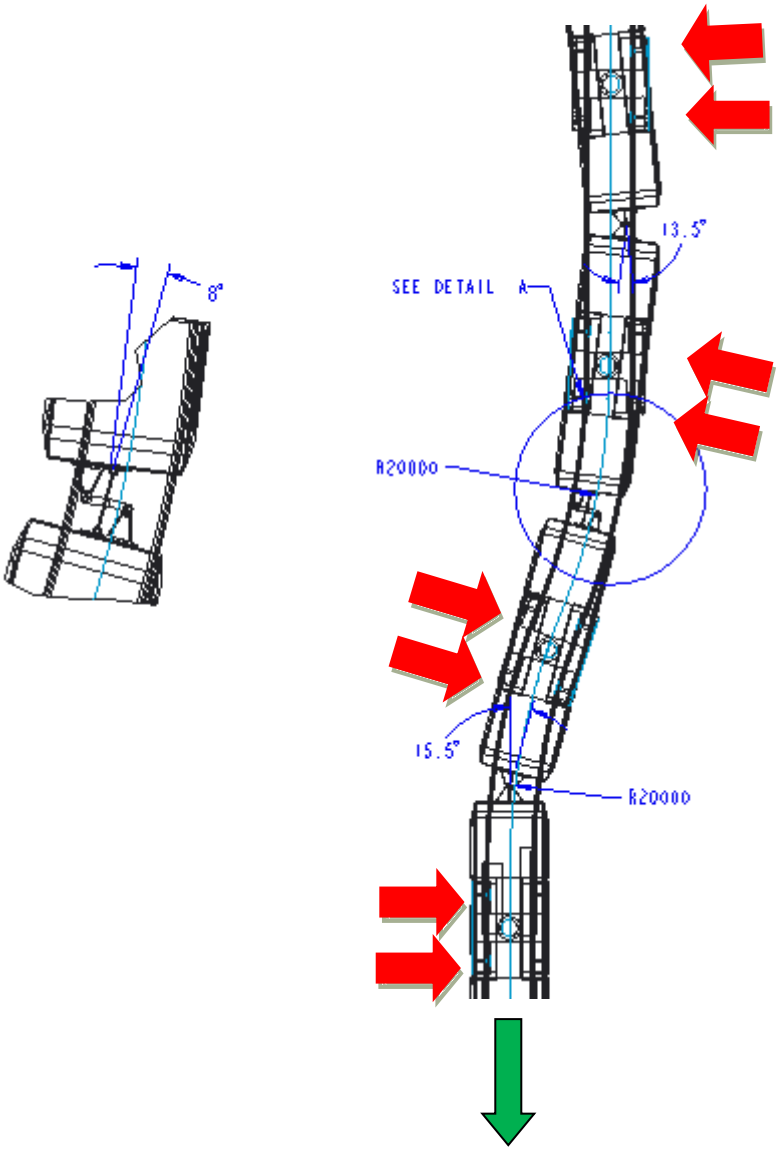
Příloha 11. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS28,8x10,9x28,2



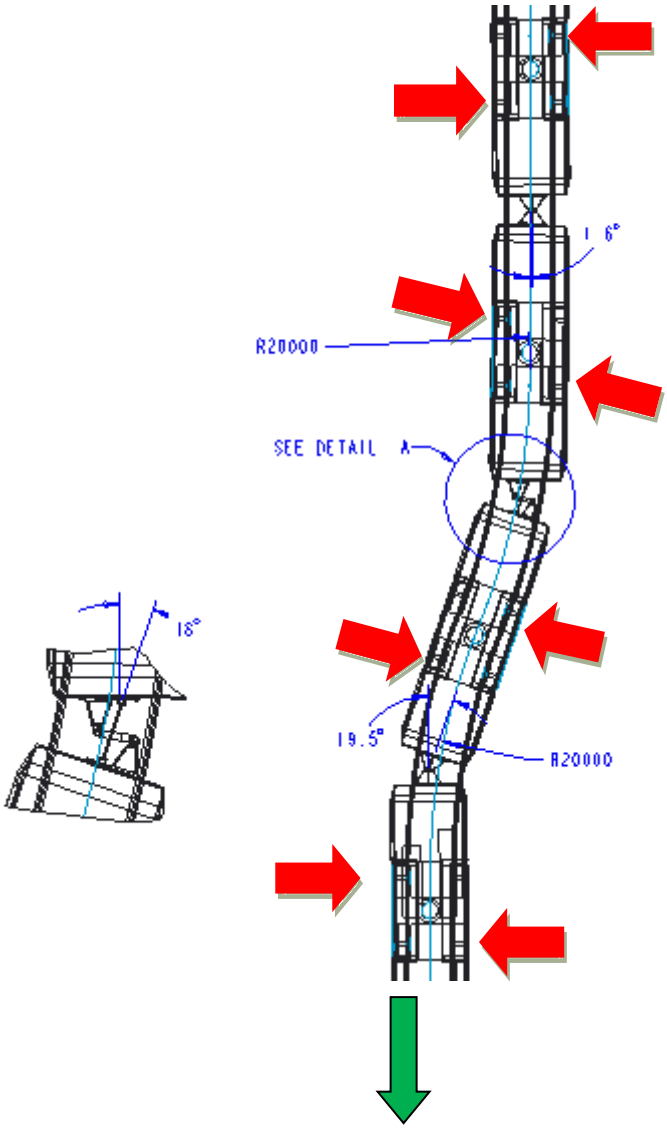
Příloha 12. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS28,8x10,9x28,2



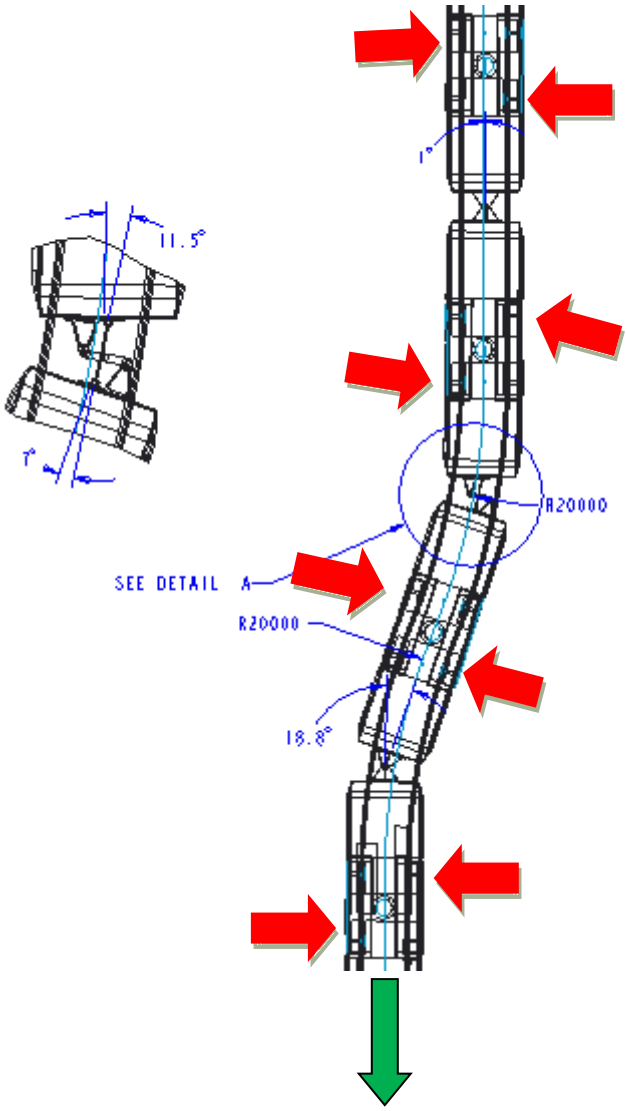
Příloha 13. Vyšetření tětivové polohy v oblouku PS20x20



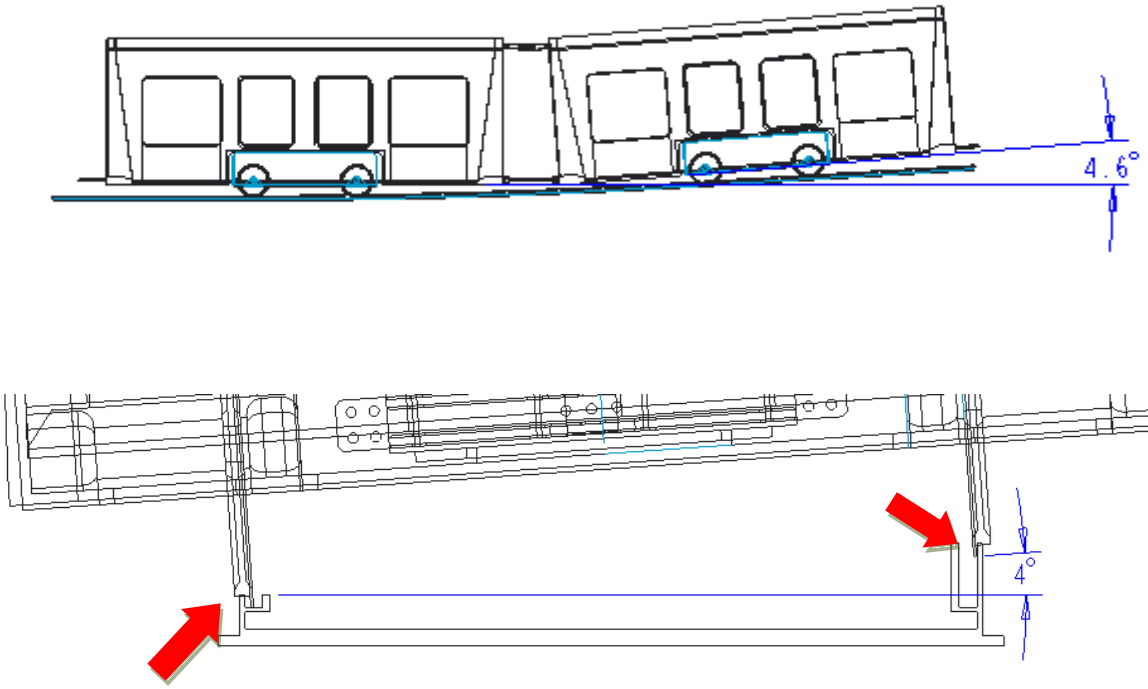
Příloha 14. Vyšetření vzpříčené polohy 1 v oblouku PS20x20



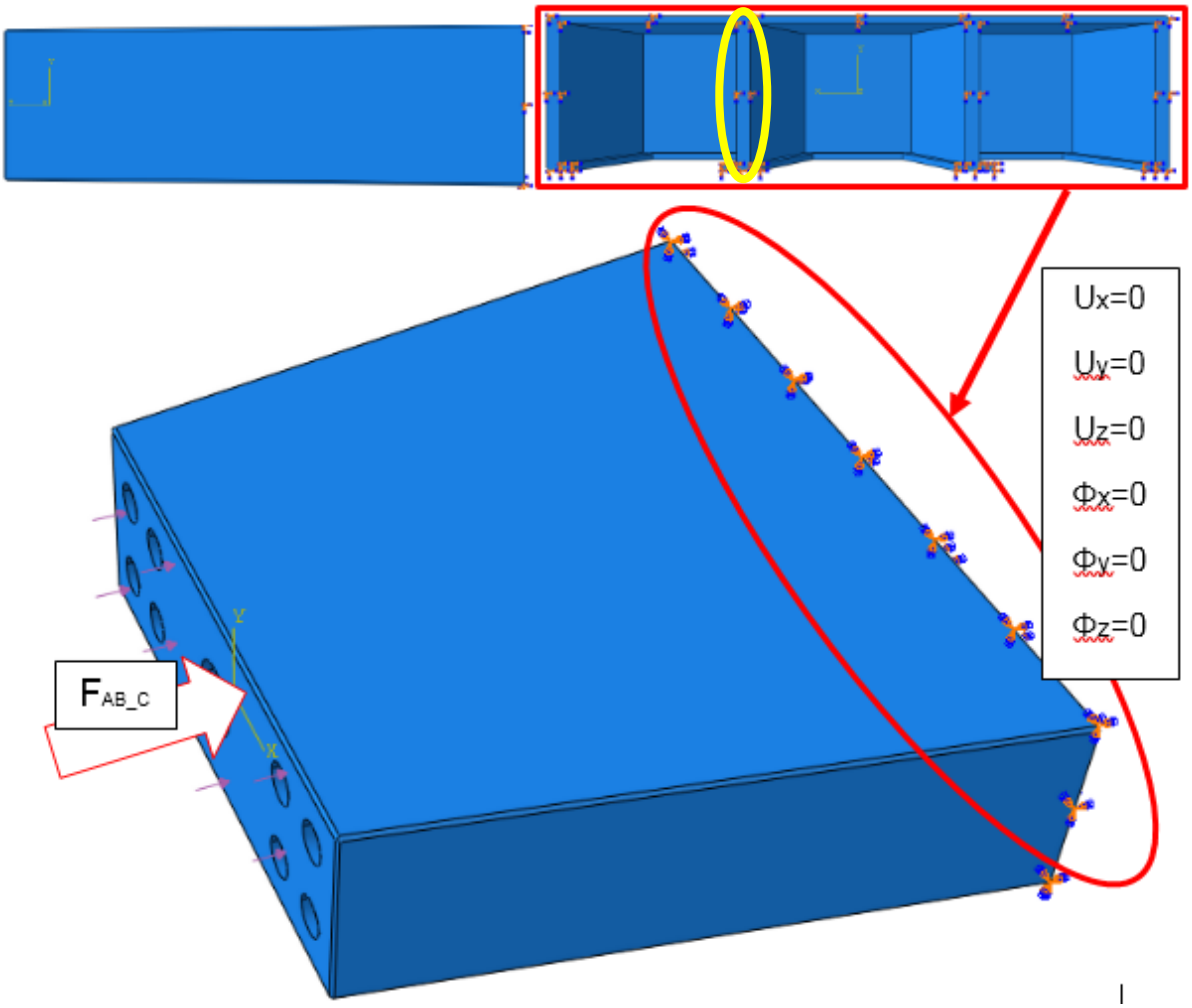
Příloha 15. Vyšetření vzpříčené polohy 2 v oblouku PS20x20



Příloha 16. Vyšetření jednotky v stoupání/klesání a zborcení



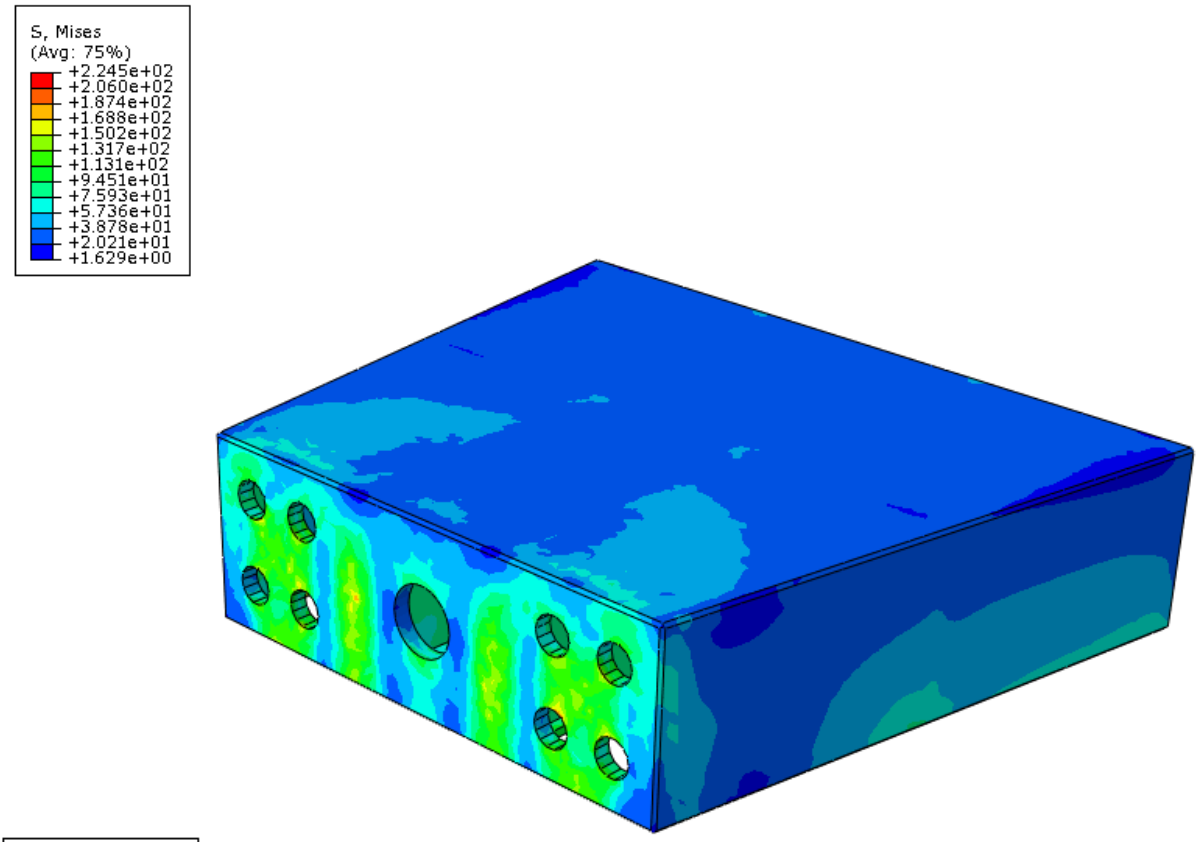
Příloha 17. MKP vyšetření nosného tělesa

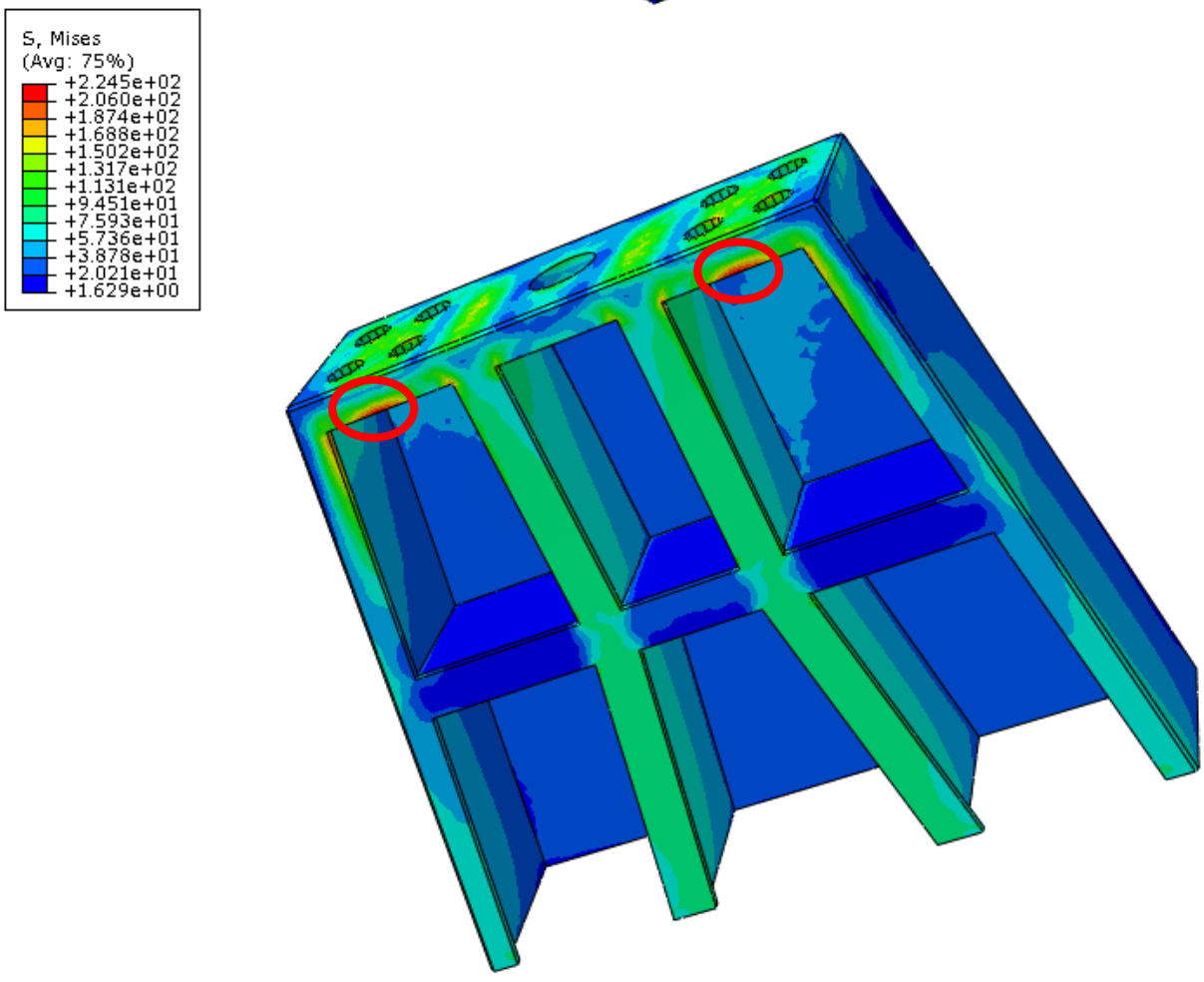


Zatíženo dle schémat pro analytické výpočty. Byly použité tet-wedge elementy při síťování 2 mm s nastavenými parametry materiálu a kontrolou sítě na deformaci elementů. Zatížení je vneseno jako tlak na plochu s dírami pro šrouby. Mez kluzu materiálu není překročena. Maximální hodnoty je dosaženo na vnitřní hraně spodní výztuže. Napětí ve stojnách nosiče odpovídá hodnotám analytického výpočtu.

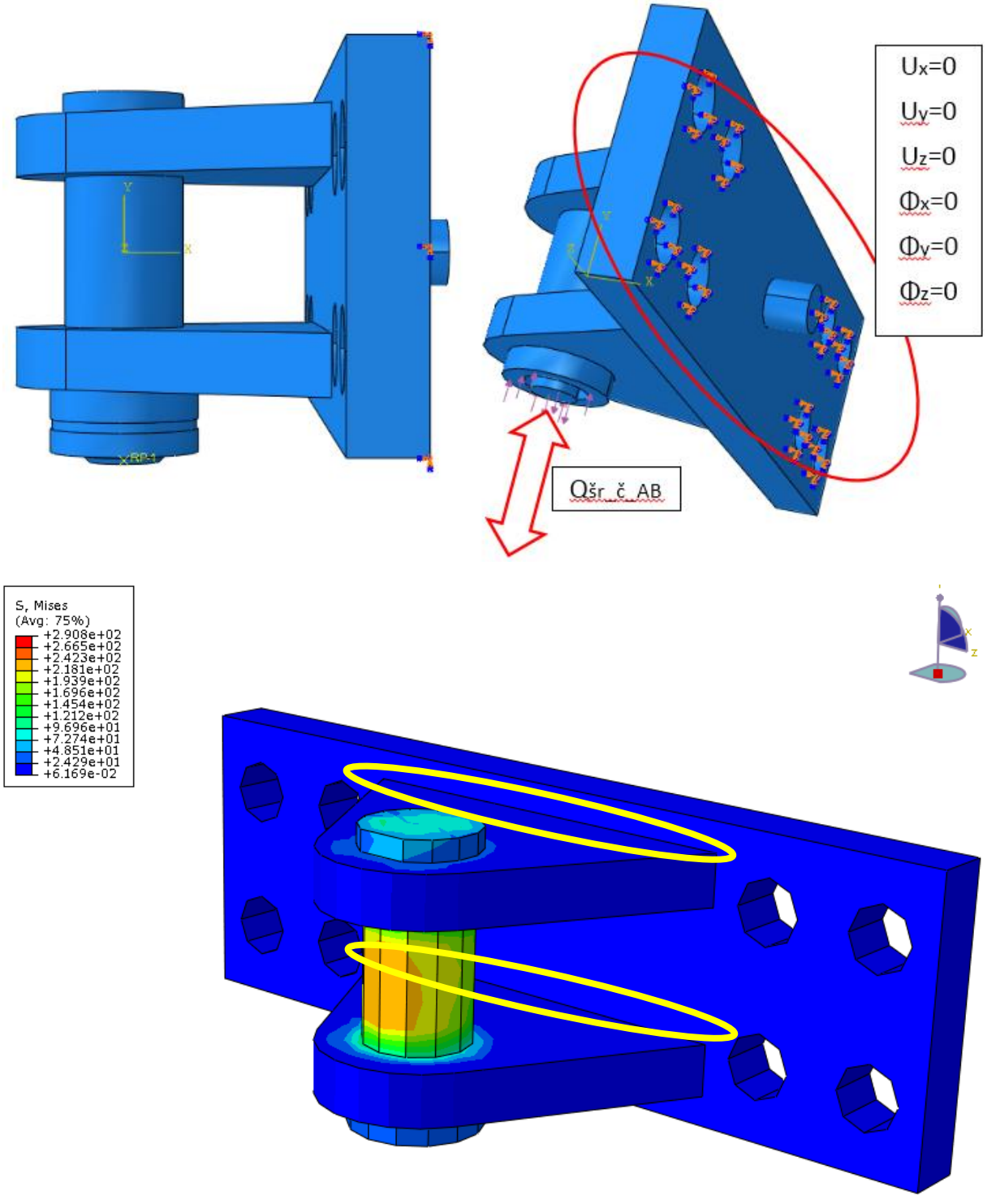
Tab. 1. 17 Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa

Vyšetřované místo	**Stojna nosného tělesa**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	50	57
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	11,4 %	Vyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.2 Spojovací kloub A-B (C-D)	


S, Mises
(Avg: 75%)
+2.245e+02
+2.060e+02
+1.874e+02
+1.688e+02
+1.502e+02
+1.317e+02
+1.131e+02
+9.451e+01
+7.593e+01
+5.736e+01
+3.878e+01
+2.021e+01
+1.629e+00


S, Mises
(Avg: 75%)
+2.245e+02
+2.060e+02
+1.874e+02
+1.688e+02
+1.502e+02
+1.317e+02
+1.131e+02
+9.451e+01
+7.593e+01
+5.736e+01
+3.878e+01
+2.021e+01
+1.629e+00

Příloha 18. Kontrola tělesa na ohyb



Zatíženo dle schémat pro analytické výpočty. Byly použité tet-wedge elementy při síťování 5 mm s nastavenými parametry materiálu a kontrolou sítě na deformaci elementů. Zatížení je vneseno jako tlaková síla matici a šroub. Mez kluzu materiálu není překročena. Maximální hodnoty je dosaženo na koncových hranách rozpěrné

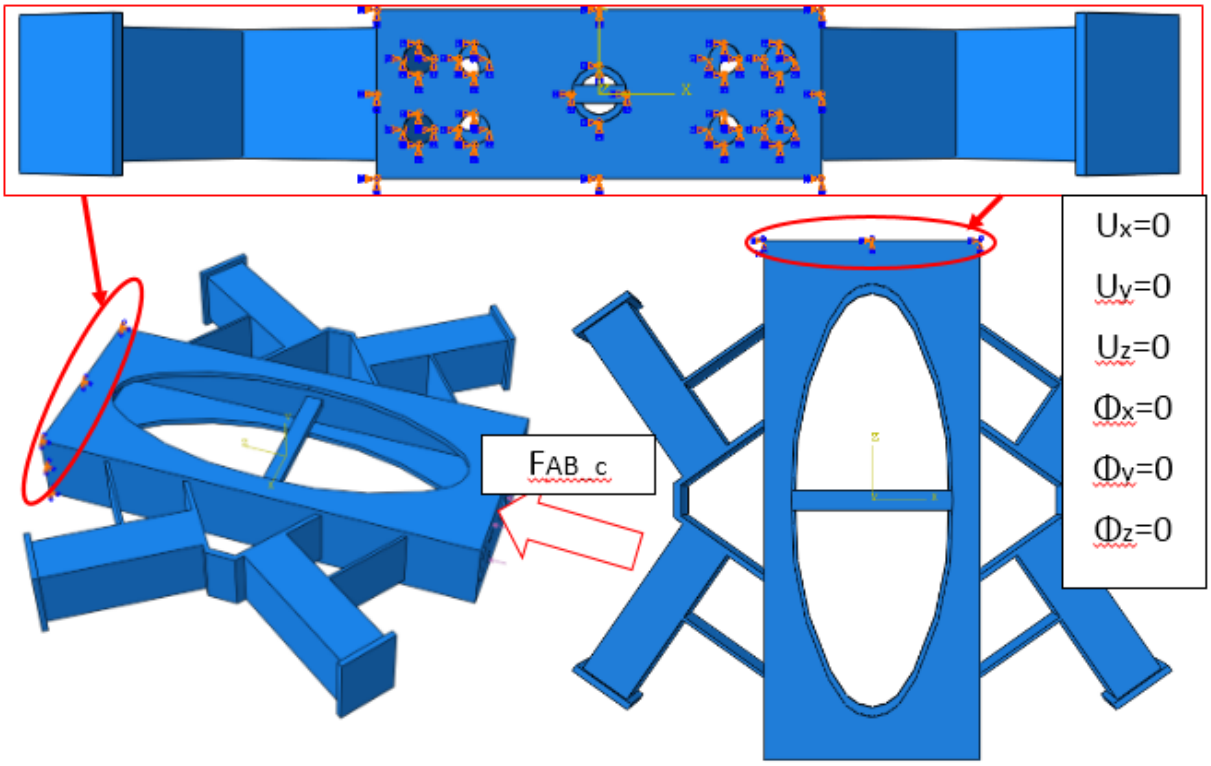
trubky, kde se projevuje vrubový účinek hrany. Nejnamáhanější je rozpěrná trubka od předpětí šroubu. Ohyb od tíhy mezimostu se prakticky neprojevuje. Výsledná napětí v kritickém průřezu tělesa a v místě svaru se neshodují s analytickým výpočtem, což ale neohrožuje bezpečnost konstrukce, protože hodnoty napětí jsou velmi malé. Rozdíl je dán zanedbáním smykových účinků napětí u analytického výpočtu a nedokonalým namodelováním svaru pro MKP výpočet.

Tab. 1. 18 Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa kloubu BC

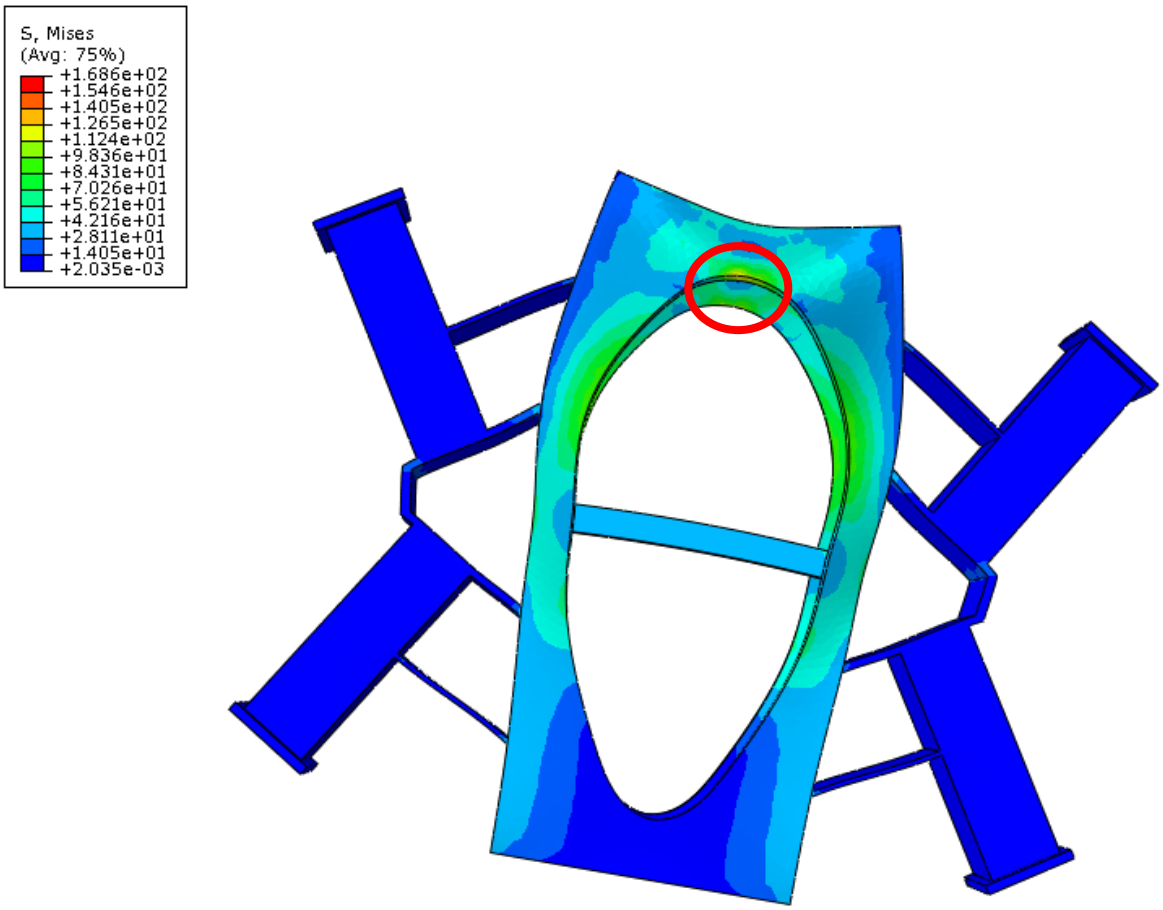
Vyšetřované místo	**Svar nosného tělesa**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	0,22	0,6
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	172 %	Nevyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.4 Spojovací kloub B-C	

Příloha 19. Kontrola mezimostu

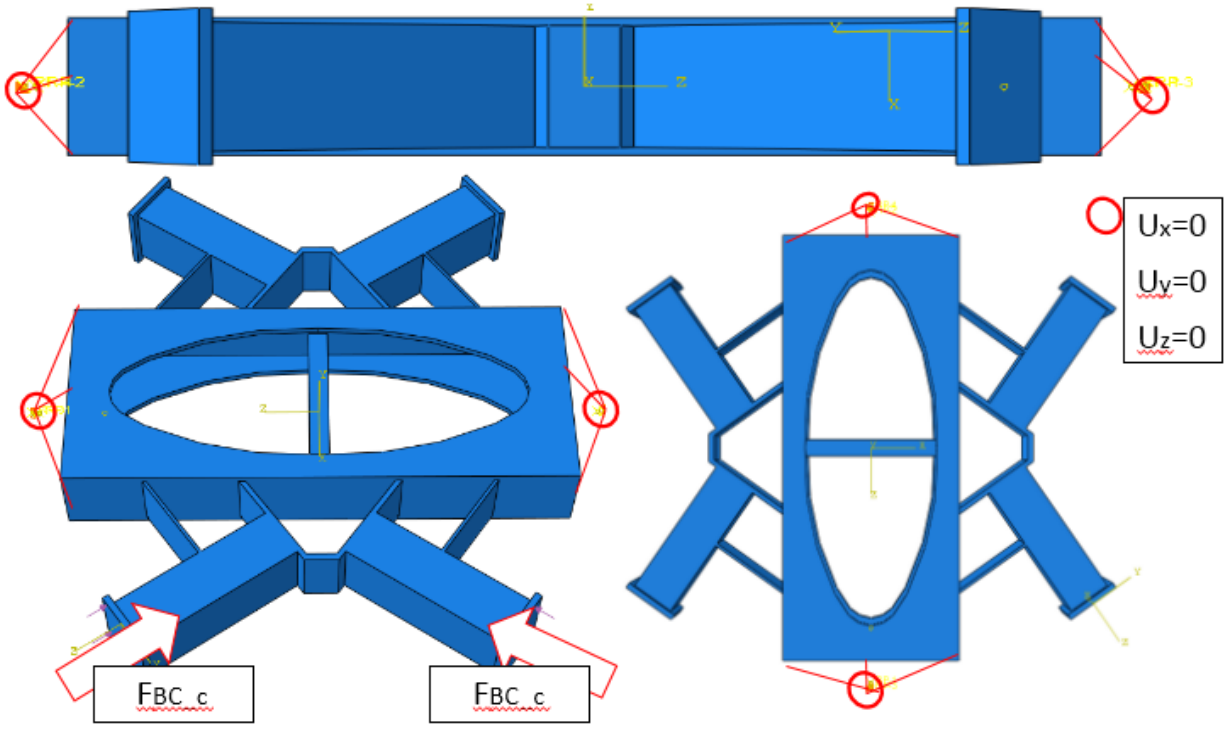
Kontrola na axiální zatížení



Zatíženo dle schémat. Byly použité tet-wedge elementy při síťování 5 mm s nastavenými parametry materiálu a kontrolou sítě na deformaci elementů. Zatížení je vneseno jako tlak na plochu s dírami pro šrouby. Mez kluzu materiálu není překročena. Maximální hodnoty je dosaženo v nejtenčím místě střední části svařence. Analyticky nebylo kontrolováno.



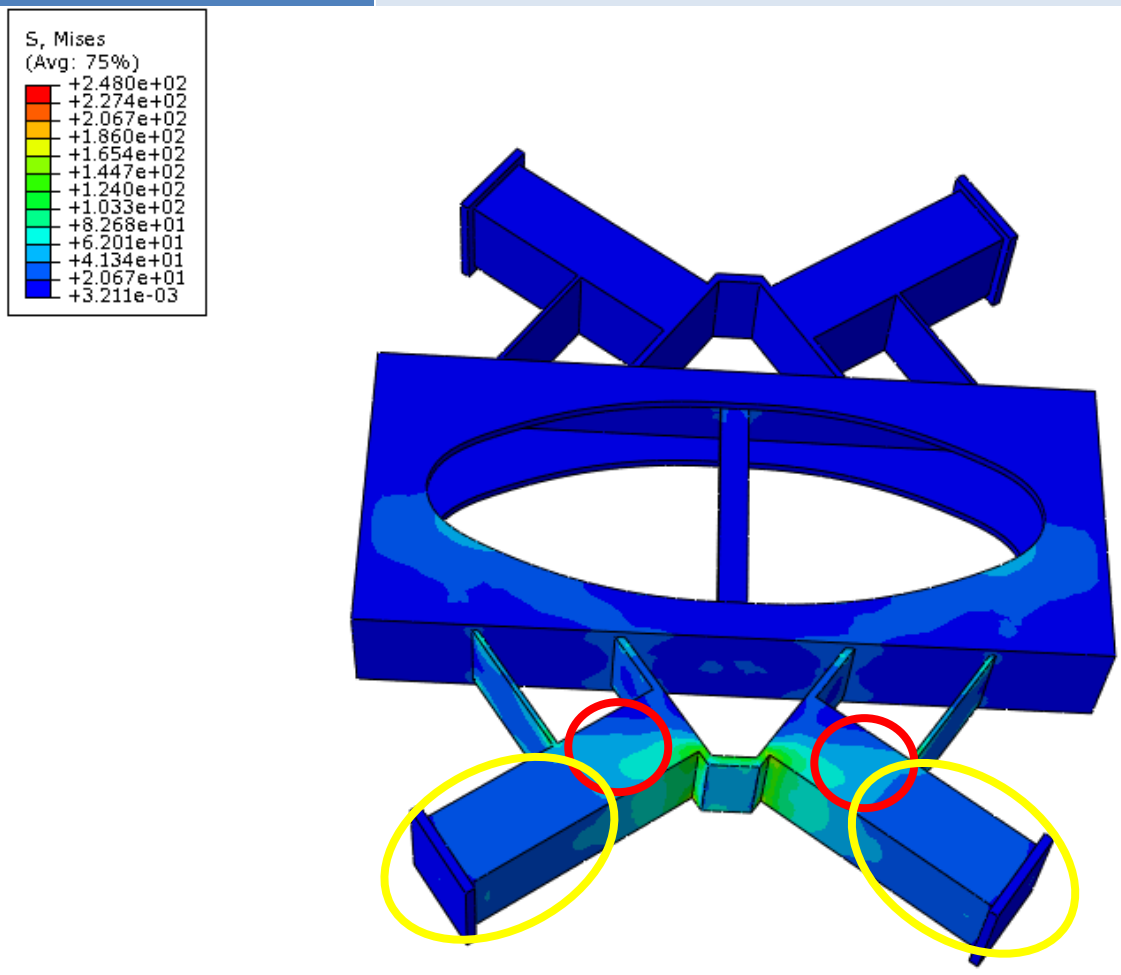
Kontrola na zatížení narážek



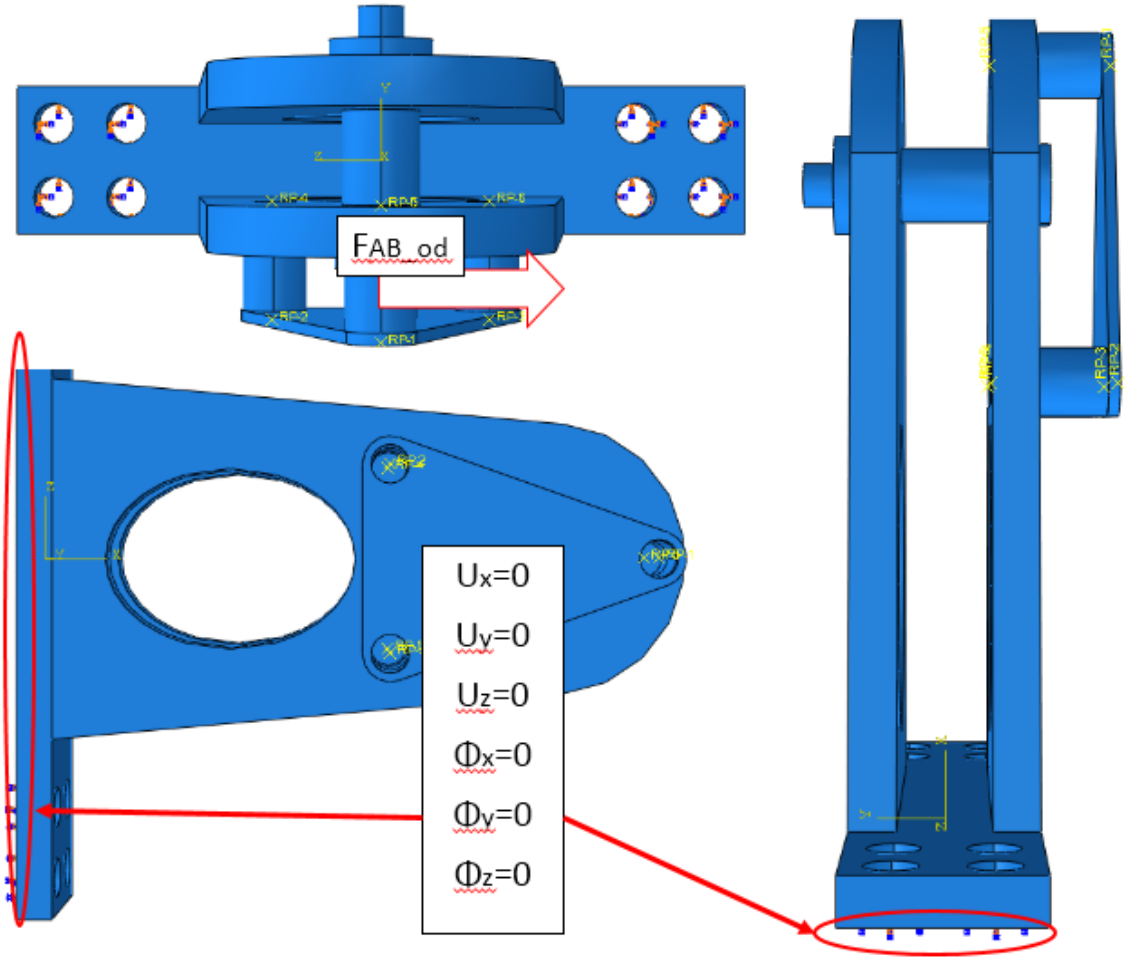
Zatíženo dle schémat pro analytické výpočty. Byly použité tet-wedge elementy při síťování 5 mm s nastavenými parametry materiálu a kontrolou sítě na deformaci elementů. Zatížení je vneseno jako tlak na plochy narážek při vetknutém referenčním bodu (zakázány pouze posuvy) nahrazujícím střed kulového kloubu. Mez kluzu materiálu není překročena. Maximální hodnoty je dosaženo v místě připojení výztuhy k hlavnímu tělesu mezimostu, kde je konstrukční vrub. Analytický výpočet se shoduje s MKP výpočtem ve vyšetřovaném místě.

Tab. 1. 19 Porovnání MKP a analytického výpočtu u narážek mezimostu kloubu BC

Vyšetřované místo	**Nosný plech narážky**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	166	144
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	11,5 %	Vyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.7 Narážky B-C	



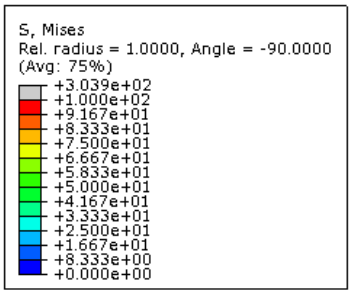
Příloha 20. Kontrola pojistného kloubu AB na ohyb

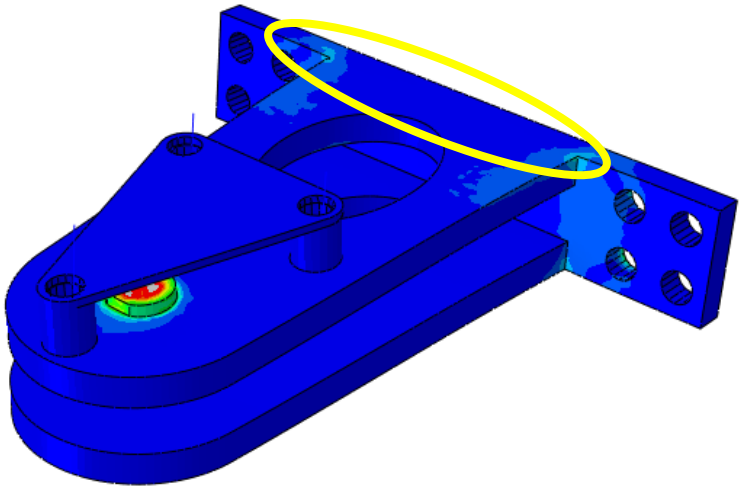


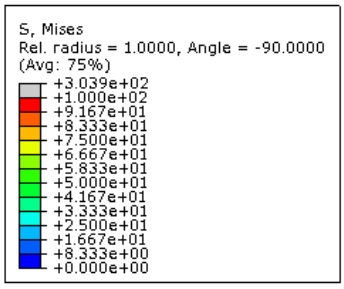
Zatíženo dle schémat pro analytické výpočty. Byly použité tet-wedge elementy při síťování 5 mm s nastavenými parametry materiálu a kontrolou sítě na deformaci elementů. Zatížení je vneseno jako předpětí šroubu a ohybová síla v RP pointu. Mez kluzu materiálu není překročena. Maximální hodnoty je dosaženo v rozpěrné trubce. Analytický výpočet se neshoduje s MKP výpočtem kvůli hranovému efektu sítě ve vyšetřovaném místě tělesa.

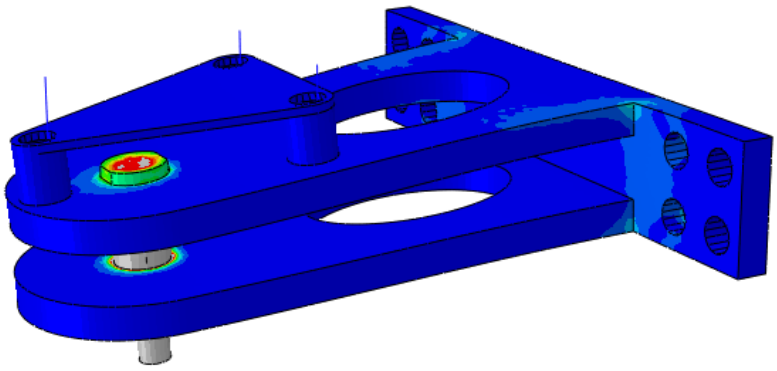
Tab. 1. 20 Porovnání MKP a analytického výpočtu u nosného tělesa horního kloubu AB

Vyšetřované místo	**Svar připojující nosné plechy**	
	Analytický výpočet	Výpočet MKP
Napětí [Nmm^{-2}]	13,42	25
Rozdíl hodnot / Vyhovuje x nevyhovuje	86 %	Nevyhovuje
Kapitola analytického výpočtu	7.3 Pojistný kloub A-B (C-D)	

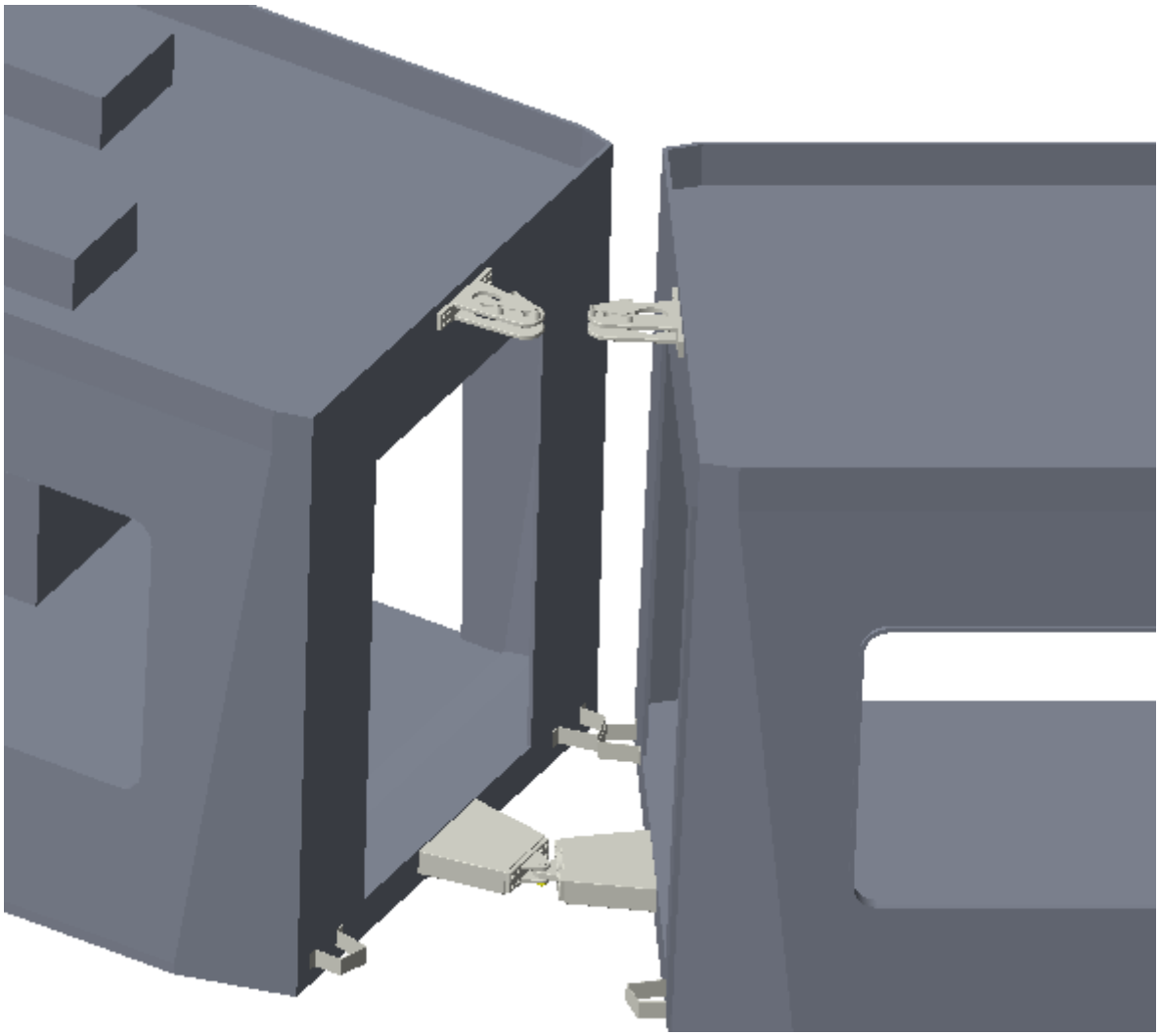

S, Mises
Rel. radius = 1.0000, Angle = -90.0000
(Avg: 75%)
+3.039e+02
+1.000e+02
+9.167e+01
+8.333e+01
+7.500e+01
+6.667e+01
+5.833e+01
+5.000e+01
+4.167e+01
+3.333e+01
+2.500e+01
+1.667e+01
+8.333e+00
+0.000e+00




S, Mises
Rel. radius = 1.0000, Angle = -90.0000
(Avg: 75%)
+3.039e+02
+1.000e+02
+9.167e+01
+8.333e+01
+7.500e+01
+6.667e+01
+5.833e+01
+5.000e+01
+4.167e+01
+3.333e+01
+2.500e+01
+1.667e+01
+8.333e+00
+0.000e+00

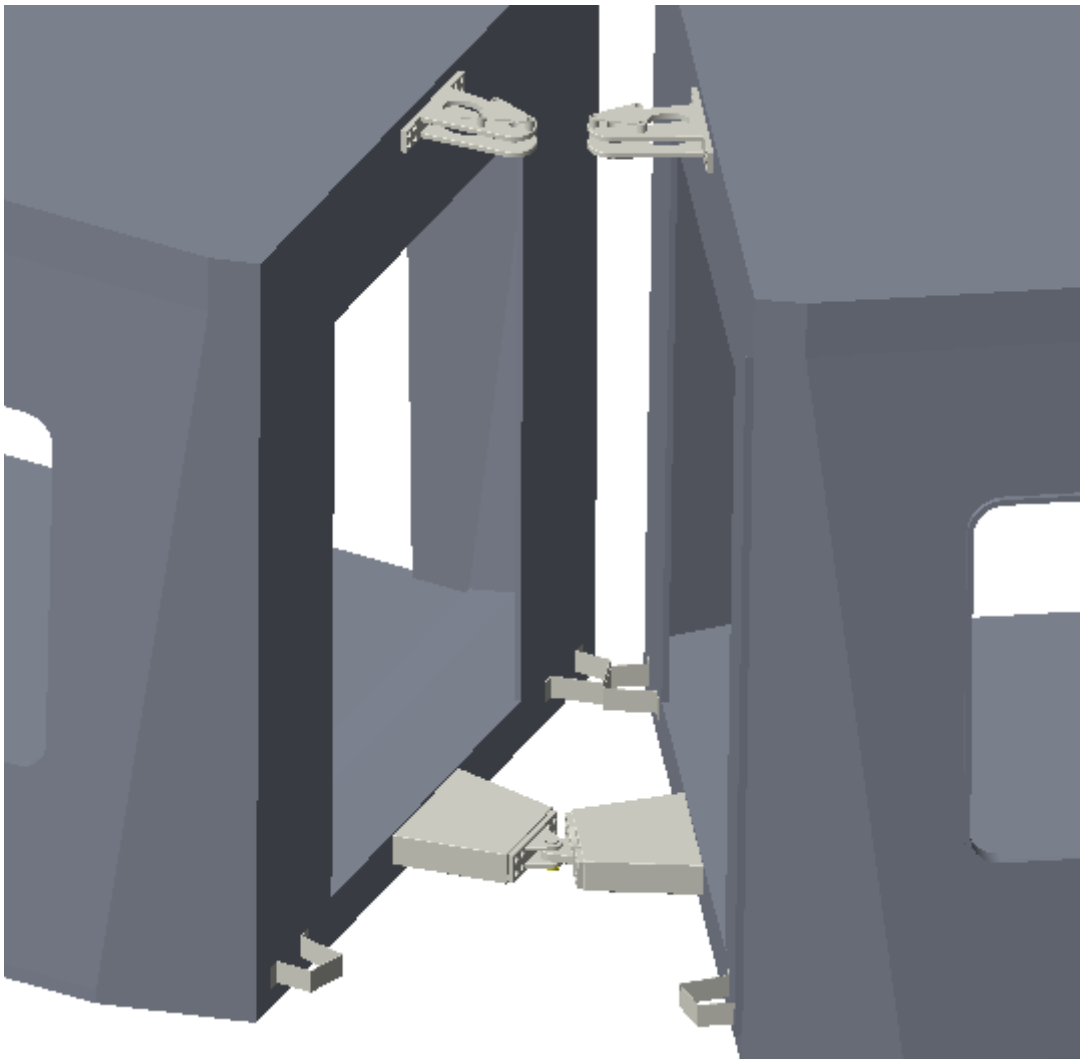


Příloha 21. AB_K1



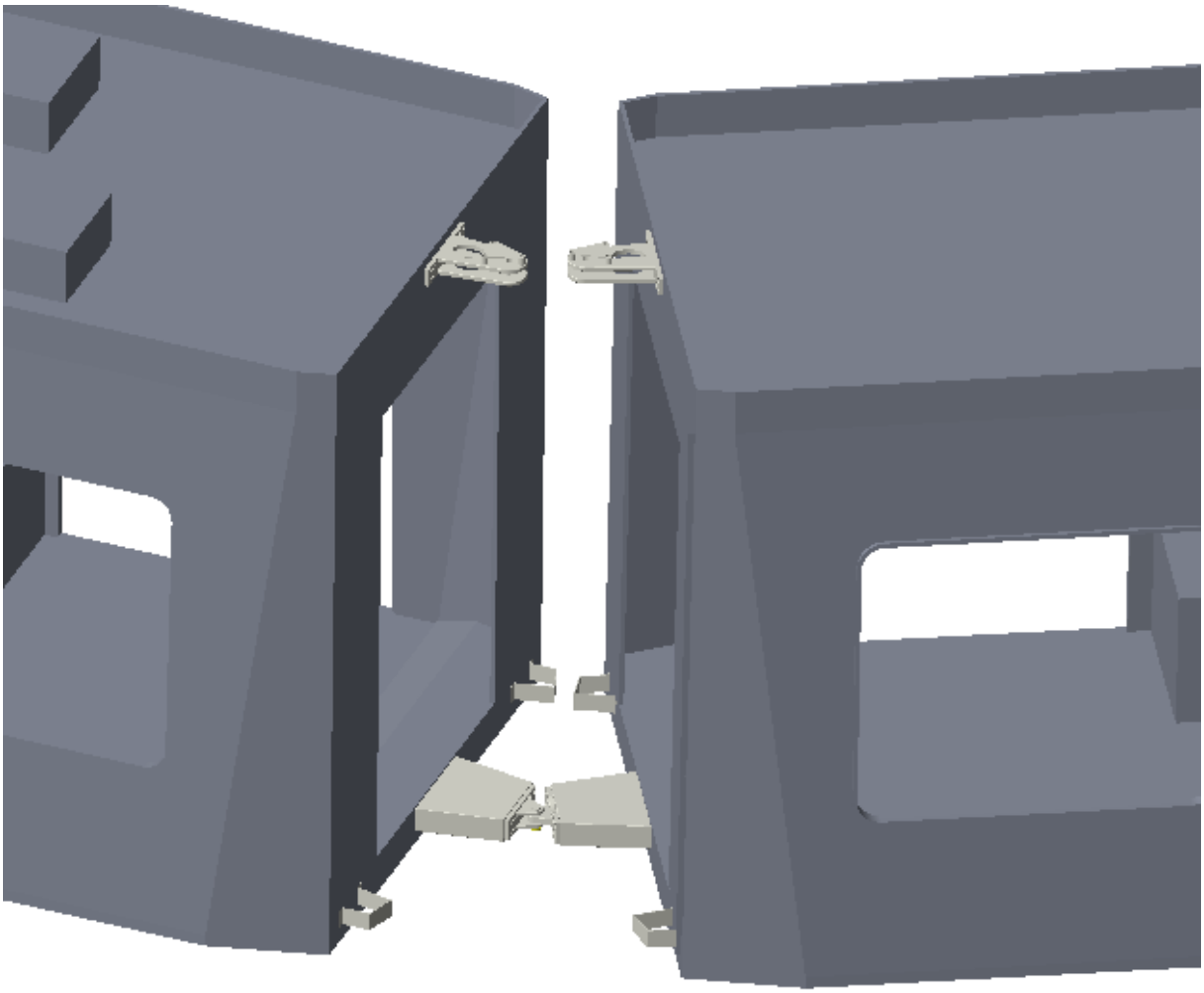
Kontrola kolizí pro tuto kombinaci úhlů je nejhorším případem postavení článků A a B vůči sobě. Narážky zajišťují nepřekročení mezního úhlu. Ke kolizím nedochází. Správné složení a rozvinutí krycího měchu zaručuje dodavatel.

Příloha 22. AB_K2



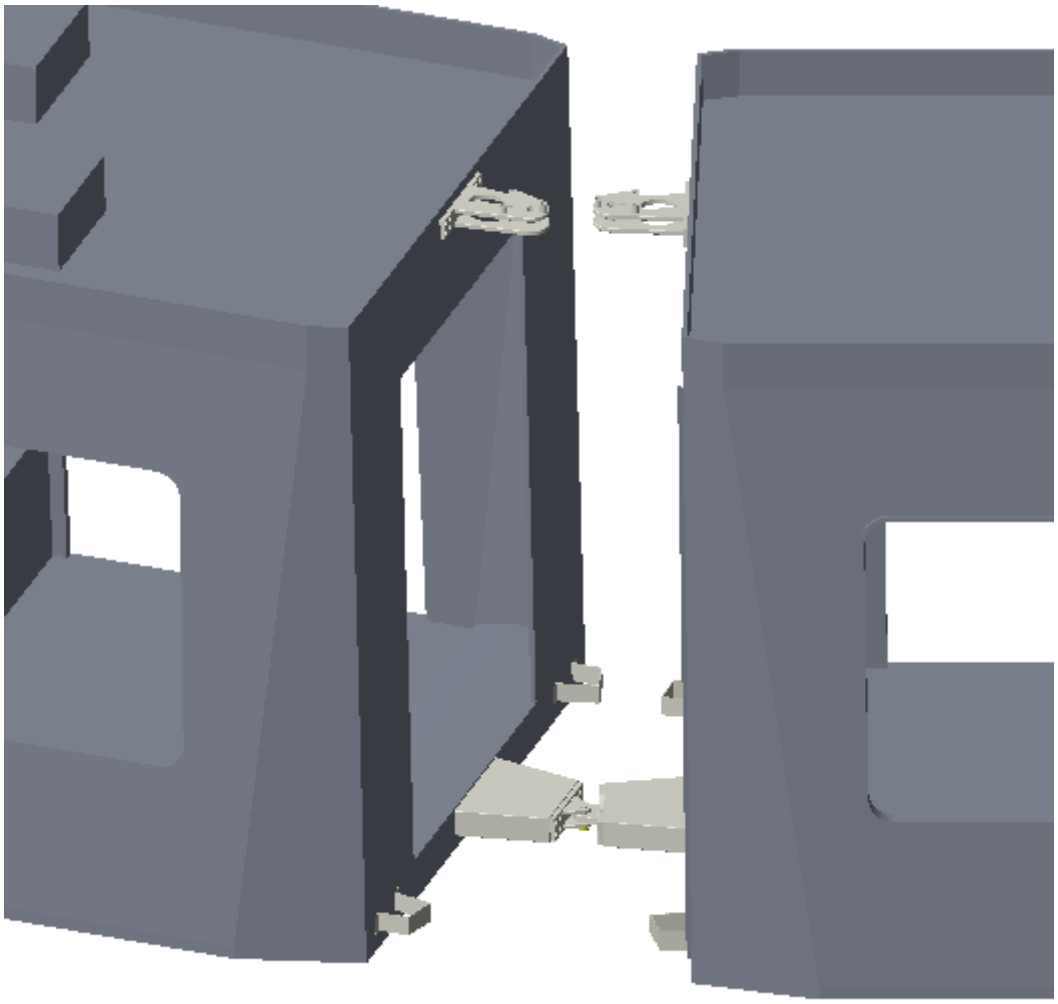
V této kombinaci úhlů ke kolizím nedochází.

Příloha 23. AB_K3



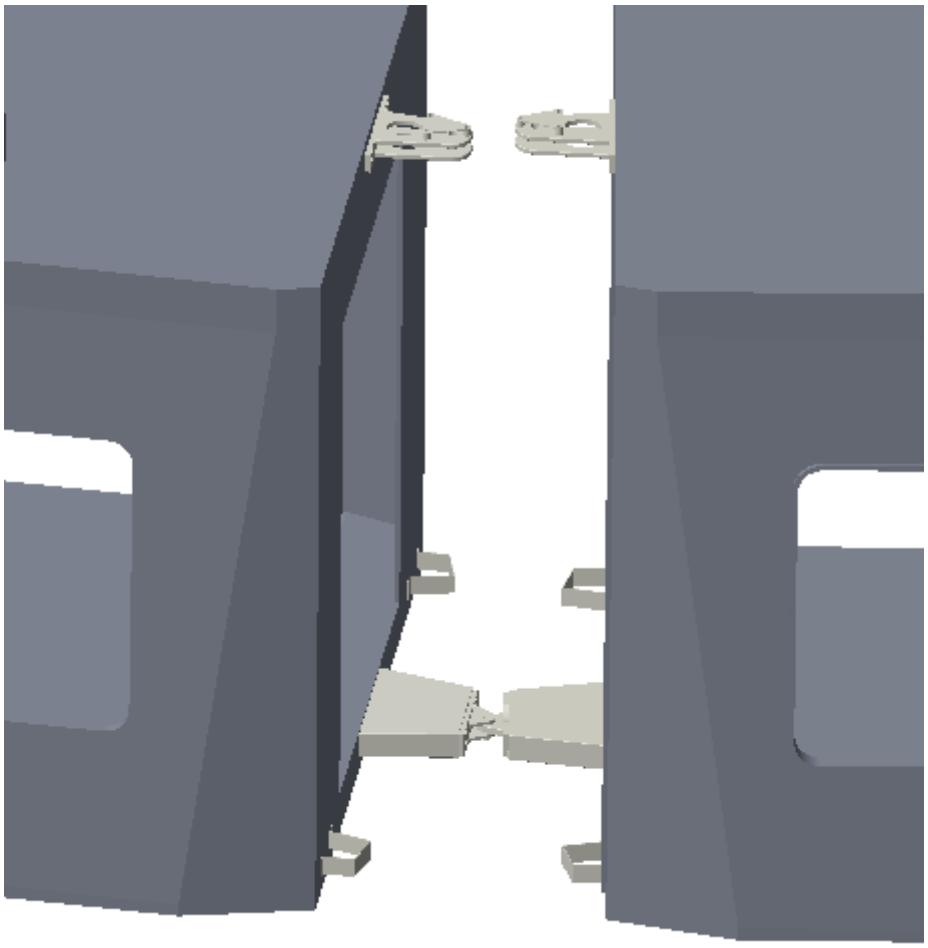
V této kombinaci úhlů ke kolizím nedochází.

Příloha 24. AB_K4



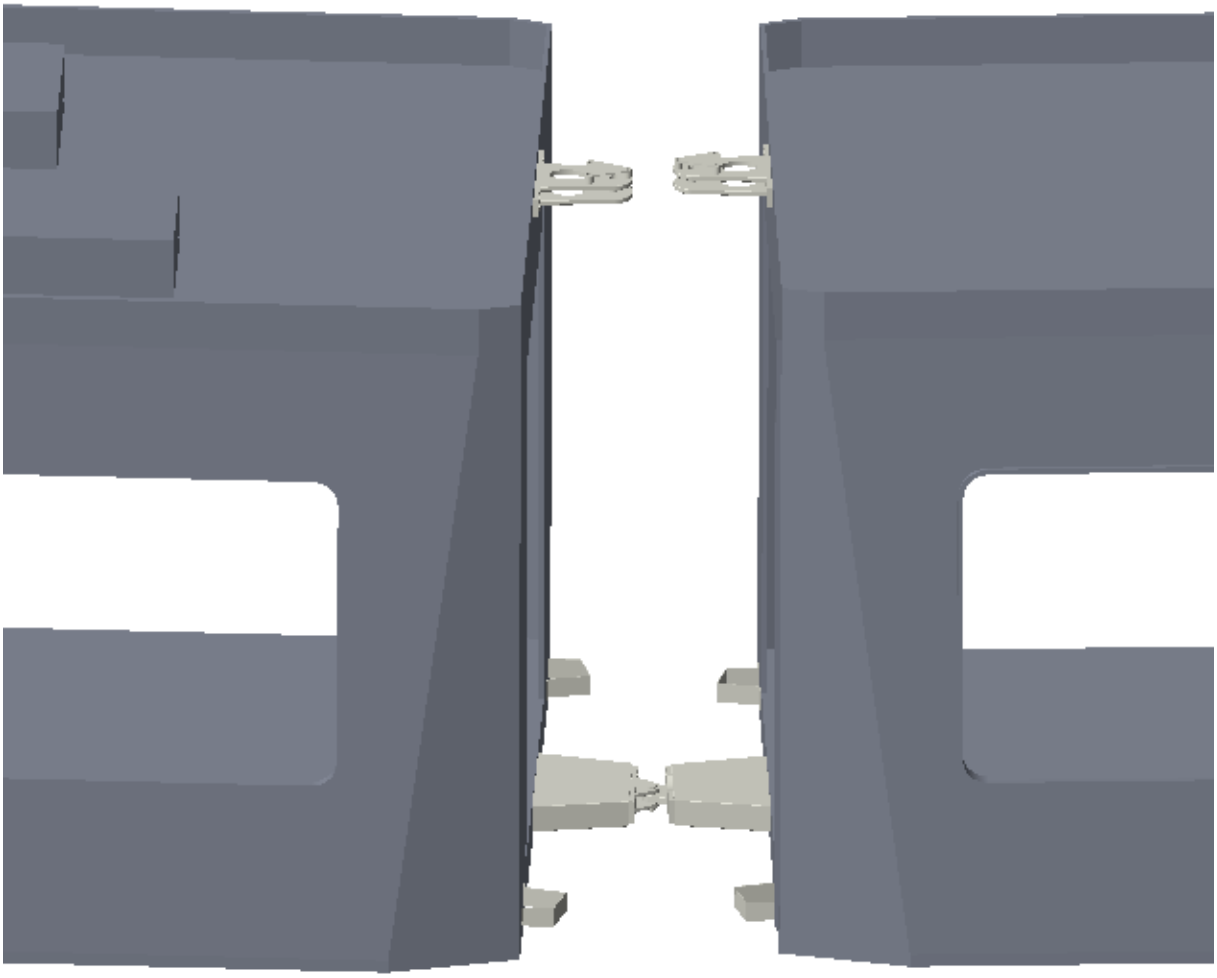
V této kombinaci úhlů ke kolizím nedochází.

Příloha 25. AB_K5



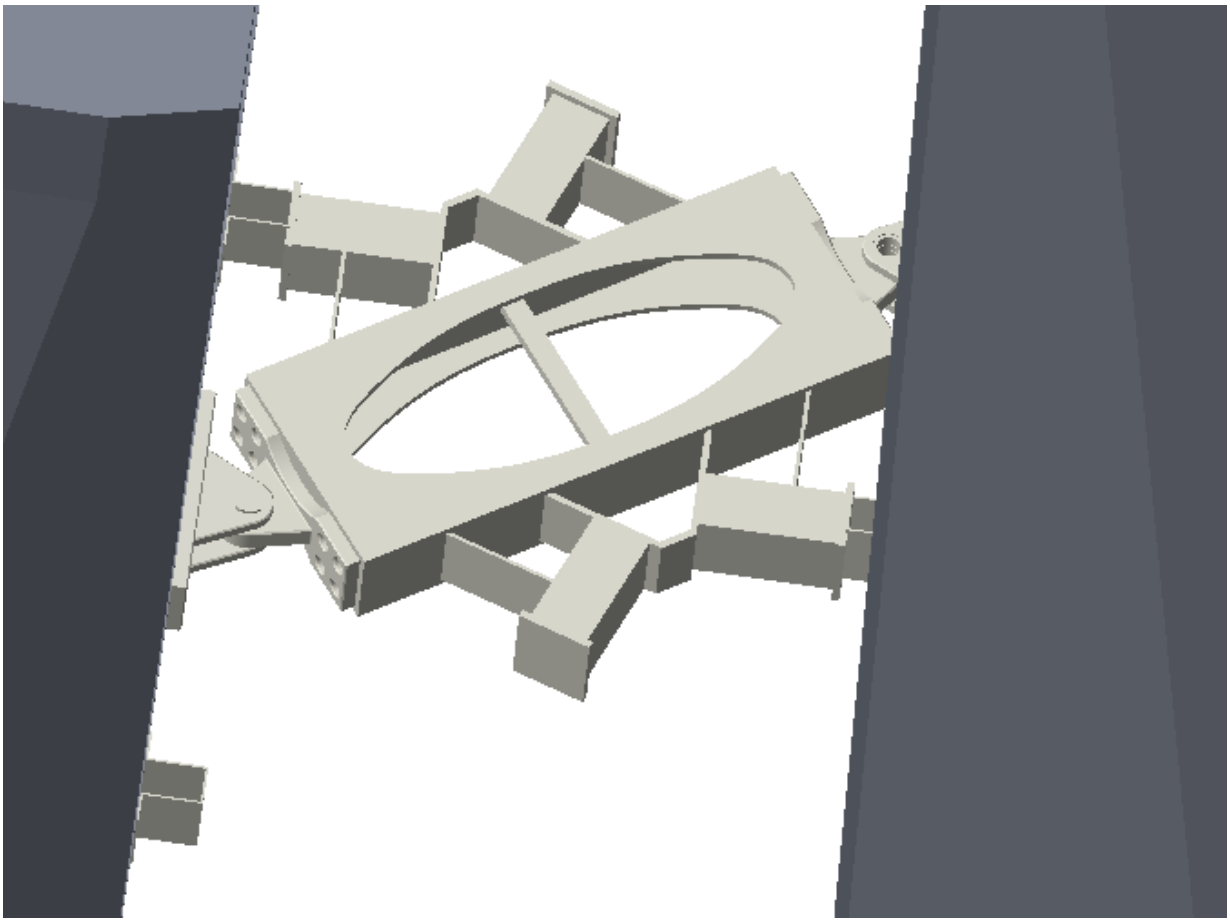
V této kombinaci úhlů ke kolizím nedochází.

Příloha 26. AB_K6

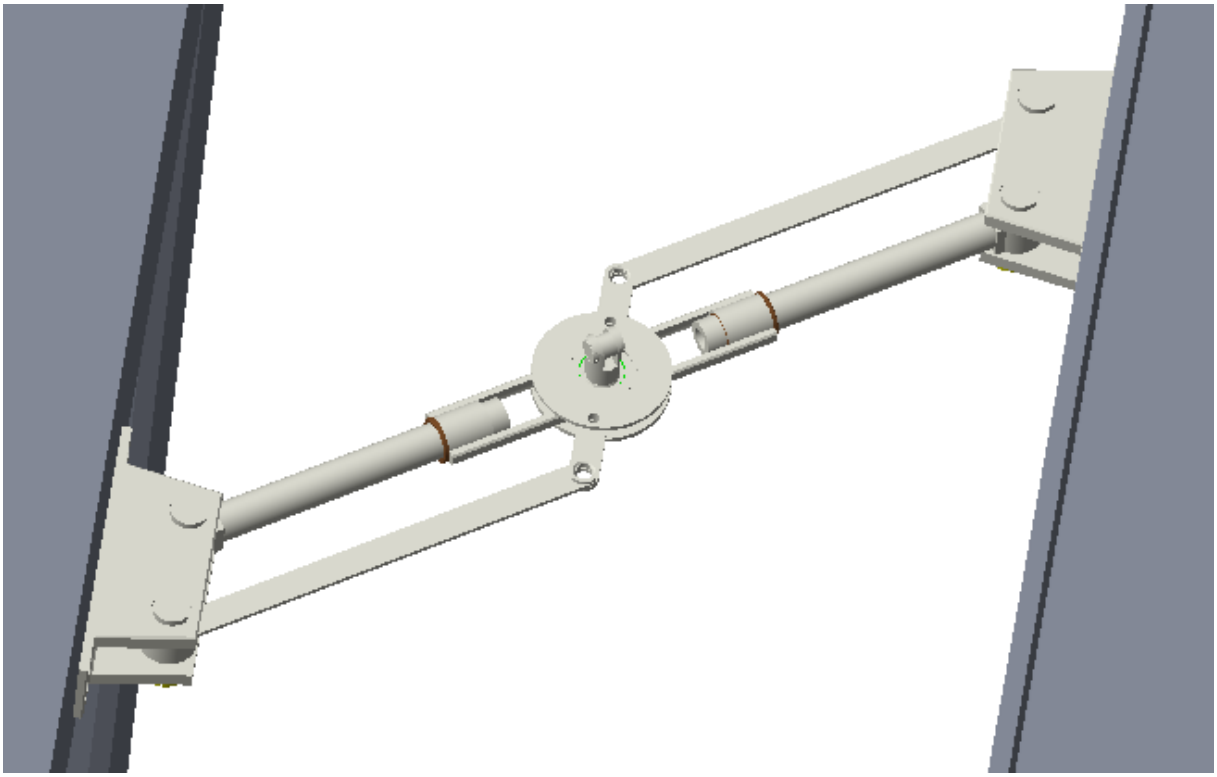


V této kombinaci úhlů ke kolizím nedochází.

Příloha 27. BC_K1



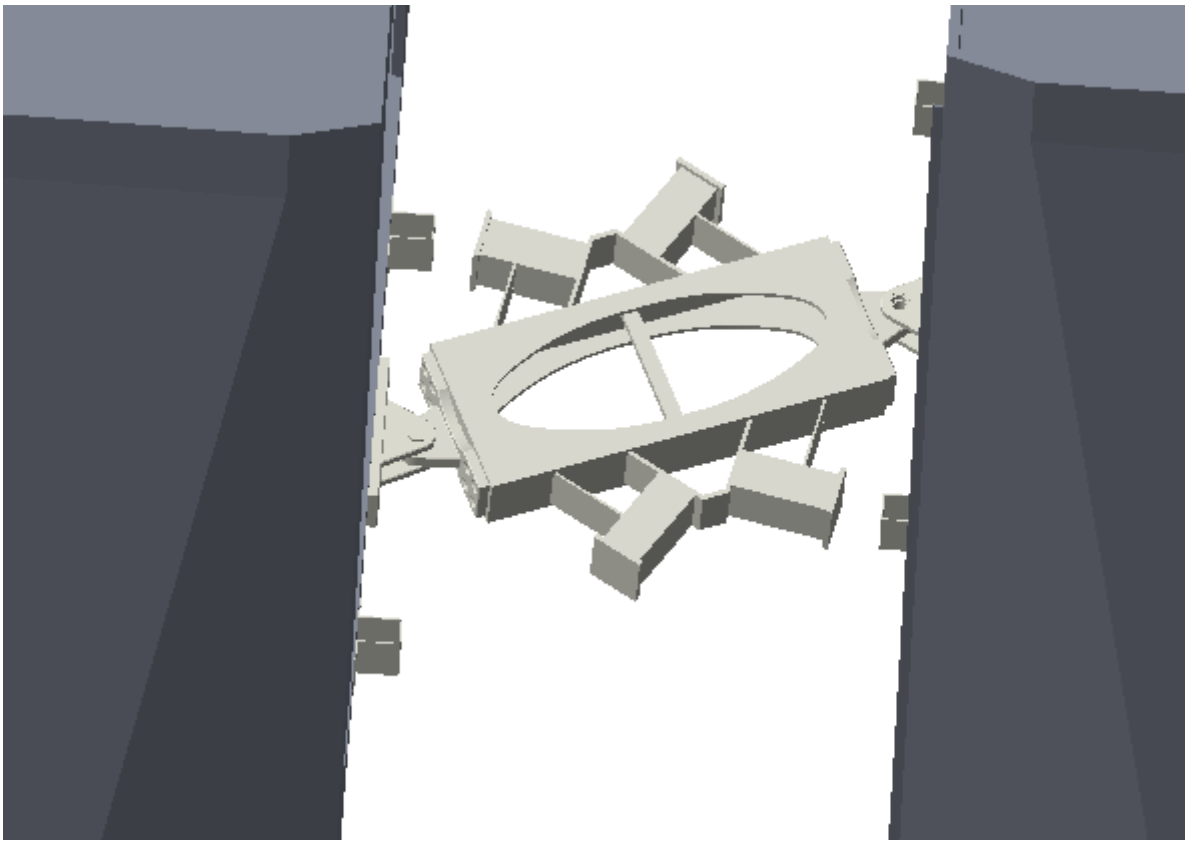
Spodní kloub při tomto natočení dosedá mezimostem na obě narážky, které zamezují dalšímu natáčení kloubu.



Lemniskátový mechanismus se nachází v limitní poloze, kde vůle mezi objímkou a saněmi je minimální.

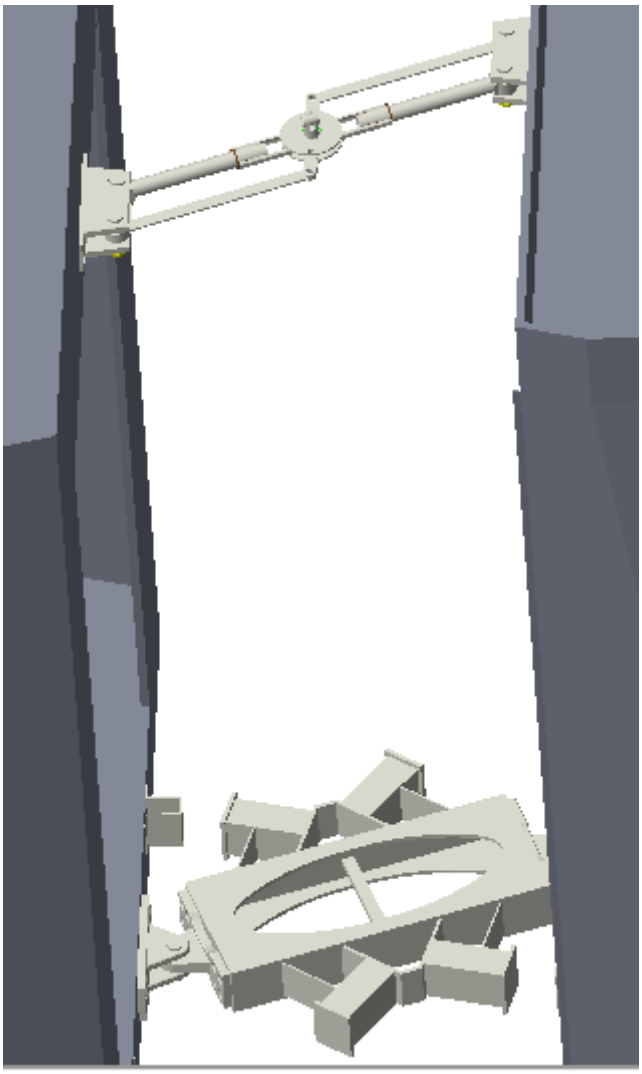
Příloha 28. BC_K2

Lemniskátový mechanismus je bez kolizí.



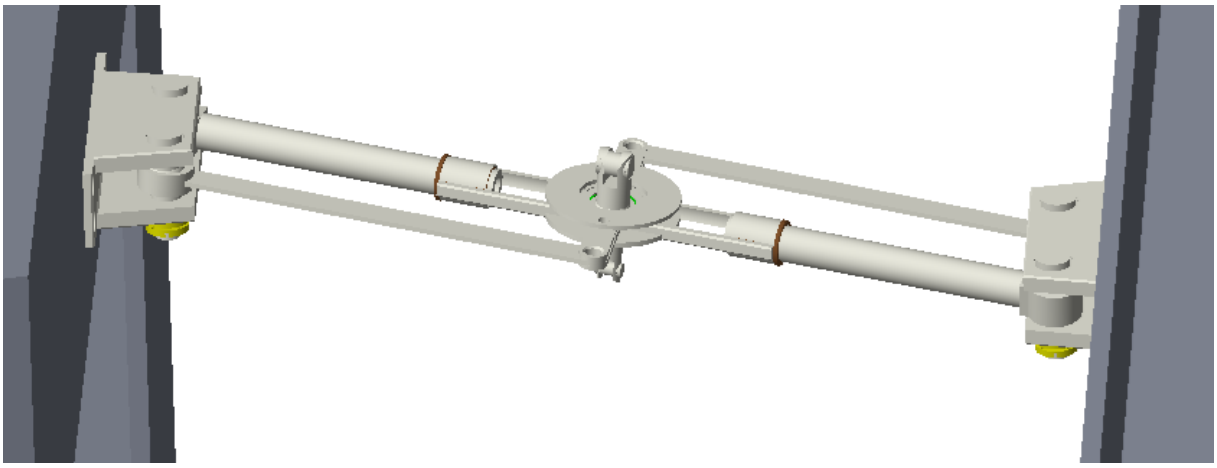
Spodní kloub je bez kolizí.

Příloha 29. BC_K3

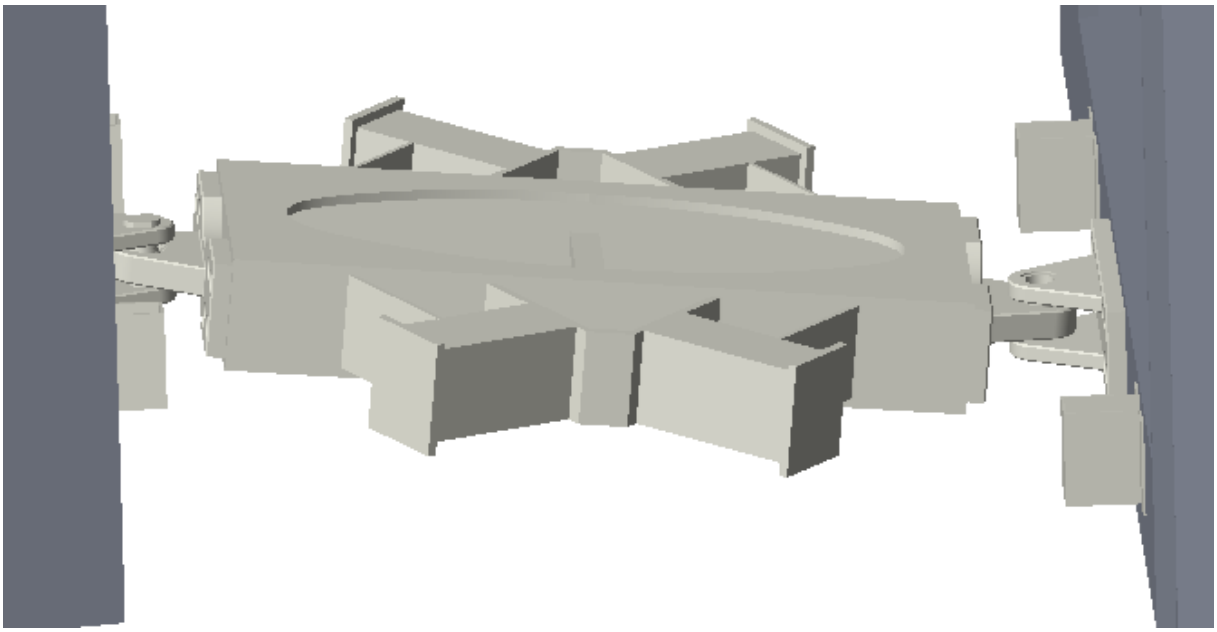


Spodní kloub i lemniskátový mechanismus plní svojí fci bez kolizí.

Příloha 30. BC_K4

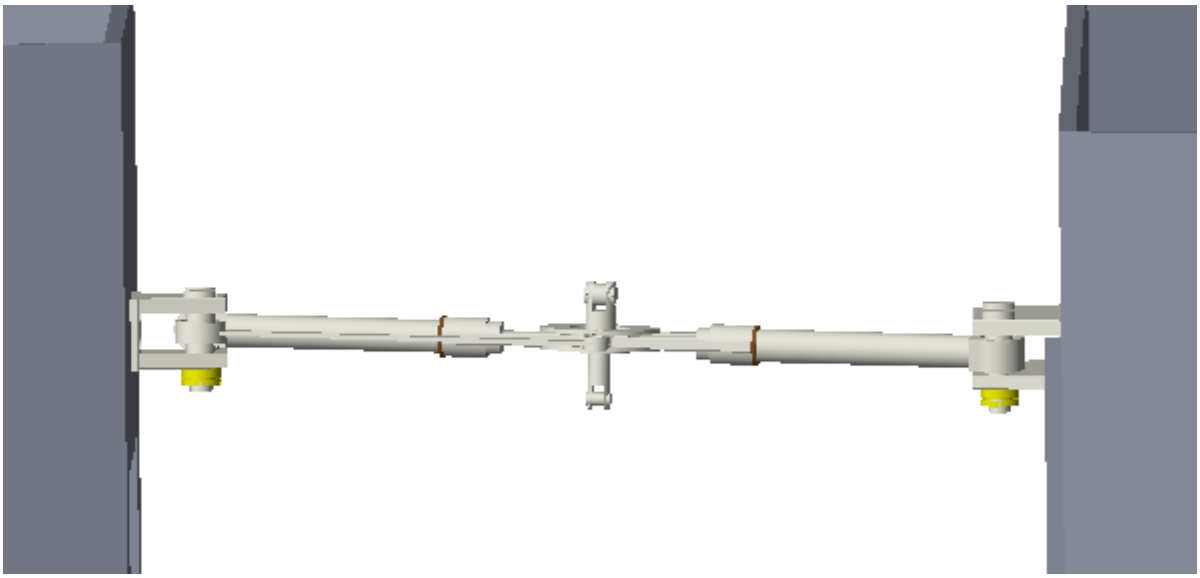


Lemniskátový mechanismus je bez kolizí.

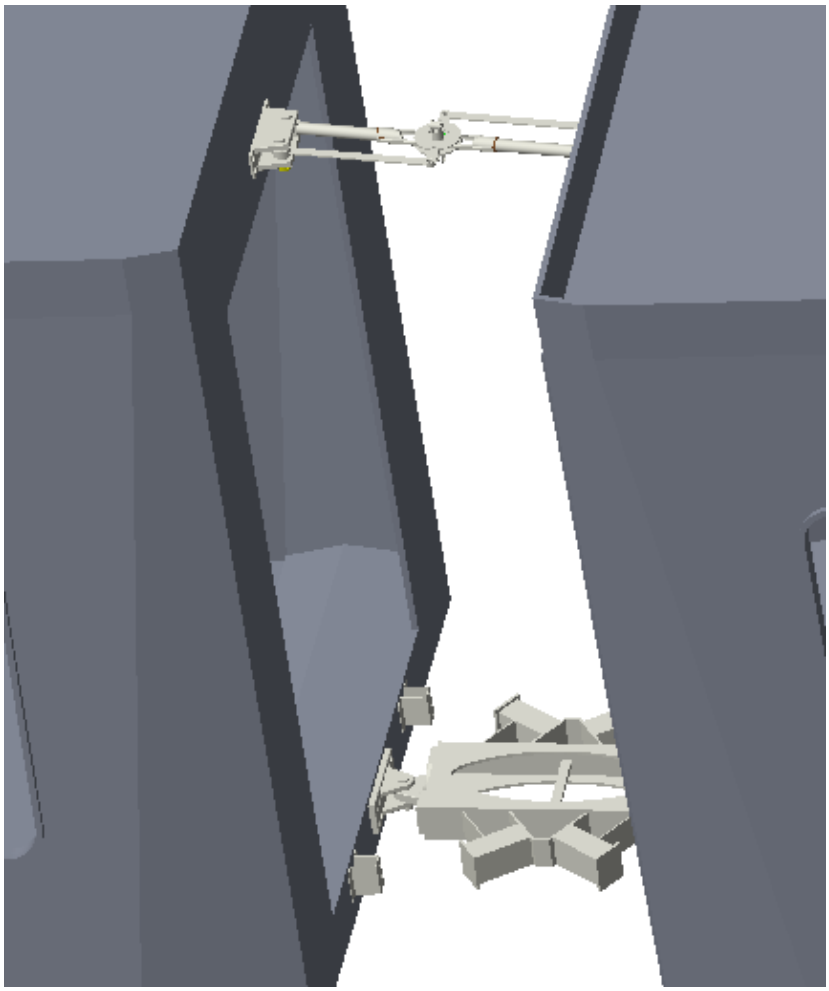


Spodní kloub je bez kolizí.

Příloha 31. BC_K5



Lemniskátový mechanismus je bez kolizí.



Spodní kloub je bez kolizí.