

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav konstruování a částí strojů

Řešení vybraných konstrukčních uzlů přípojného vyvážedce kontejnerů PVK4

Structural design of selected parts of pulled container loader PVK4

Diplomová práce

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. Roman Uhlíř, Ph.D.

Petr Koška

Praha 2016

**SEM PATŘÍ PRVNÍ STRANA ZADÁNÍ
(VYHODIT)**

**SEM PATŘÍ DRUHÁ STRANA ZADÁNÍ
(VYHODIT)**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Řešení vybraných konstrukčních uzlů přípojného vyvážedce kontejnerů PVK4“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Romana Uhlíře, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 22. 7. 2016

Petr Koška (podpis)

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Romanu Uhlířovi, Ph.D., za cenné rady a odbornou pomoc při jejím vypracování dále pak Ing. Romanu Prokýškovi, CSc a Ing. Jaromíru Fumferovi za pomoc při tvorbě matematického aparátu a MKP modelu.

Anotační list

Jméno autora:	Petr Koška
Název BP:	Řešení vybraných konstrukčních uzlů přípojného vyvážedce kontejnerů PVK4
Anglický název:	Structural design of selected parts of pulled container loader PVK4
Rok:	2016
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Roman Uhlíř, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Roman Uhlíř, Ph.D. Ing. Roman Prokýšek, CSc. Ing. Jaromír Fumfera
Bibliografické údaje:	počet stran 70 počet obrázků 60 počet tabulek 12 počet příloh 2
Klíčová slova:	přípojný vyvážedce kontejnerů, PVK, metoda konečných prvků, závěs, rám, přípojný konstrukční uzel, kloub
Keywords:	forwarders mount containers, PVK, finite element method, hinge, frame, mount design node, joint

Anotace:

Ve své práci jsem se zabýval konstrukčními uzly přípojného vyvážedce kontejnerů (PVK). První hlavní úkol je provedení koncepčního návrhu kloubového spojení PVK s tažným členem. Druhý úkol je řešení matematického modelu zatížení a následně i rozložení napětí a deformací pomocí metody konečných prvků.

Abstract:

In my work I deal with the structural nodes Forestry trailer containers (PVK). The first major task is to draft a conceptual articulation PVK with tensile member. The second task is solving a mathematical model of the load and subsequently the distribution of stresses and deformations using the finite element method.

Obsah

Úvod	1
Teoretická část.....	2
1 Rešerše kloubového spojení	3
1.1 Patenty a normy.....	3
1.1.1 Patenty	3
1.1.2 Normy.....	12
1.2 Užití v praxi.....	14
1.2.1 Kloubový nakladač	14
1.2.2 Damper.....	16
1.2.3 Harvester.....	17
1.2.4 Jednonápravový traktor (spojený s přívěsem).....	18
1.2.5 Výrobci spojovací techniky.....	19
1.3 Výsledné varianty	20
Praktická část.....	21
2 Koncepční návrh spojovacího bodu vyvážedce.....	21
2.1 Varianty kloubových spojení	21
2.1.1 Varianta dle původních parametrů STS Prachatice.....	22
2.1.2 Další upravené varianty.....	23
2.2 Výpočet délky kloubového spojení	27
2.2.1 Postup výpočtu.....	27
2.2.2 Výsledná varianta	30
3 MKP analýza vybraných součástí PVK.....	31
3.1 Zatěžovací model	31
3.1.1 Zatěžující stav 1 – statické vertikální zatížení.....	34
3.1.2 Zatěžující stav 2 – statické vertikální zatížení s posunutým těžištěm dopředu	36
3.1.3 Zatěžující stav 3 – průjezd zatáčkou s poloměrem 35 m, rychlostí 40 km/h.....	36
3.1.4 Zatěžující stav 4 – průjezd zatáčkou s poloměrem 25 m, rychlostí 40 km/h.....	40
3.1.5 Zatěžující stav 4 – průjezd zatáčkou s poloměrem 25 m, rychlostí 40 km/h, s cisternou na vodu	40
3.1.6 Zatěžující stav 5 – brzdění se zpomalením $a = 4,905 \text{ m/s}^2$	41
3.1.7 Zatěžující stav 6 – jízda z kopce se 30° klesáním.....	43
3.1.8 Zatěžující stav 7 – jízda z kopce se 30° stoupáním.....	45
3.2 Tvorba MKP modelu	46
3.2.1 Part	46

3.2.2	Property.....	46
3.2.3	Assembly.....	47
3.2.4	Step.....	47
3.2.5	Interaction	47
3.2.6	Load.....	48
3.2.7	Mesh	49
3.3	Výsledky MKP analýzy	50
3.3.1	Přední závěs.....	50
3.3.2	Výsuv hydromotoru	51
3.3.3	Rám	52
	Závěr.....	55
	Závěr návrhu spojovací části.....	55
	Závěr MKP analýzy	56
	Seznam použité literatury.....	57
	Literatura:.....	57
	Internetové odkazy:.....	57
	Seznam obrázků a grafů	60
	Seznam tabulek	62
	Seznam příloh	63
	Přílohy	64
	Příloha 1: Tabulky ke kapitole 2.2 Výpočet délky kloubového spojení	64

Seznam použitých veličin v kapitole 2

Veličina	Jednotky
rozměry y , x , <i>rameno</i> , <i>rameno1</i> , A	metry [m] popř. milimetry [mm]
konstanta k	bez jednotky [1]
úhly α , β , $\alpha1$, $\beta1$, <i>úhel zalomení</i>	stupně [°] popř. radiány [rad]

Seznam použitých veličin v kapitole 3

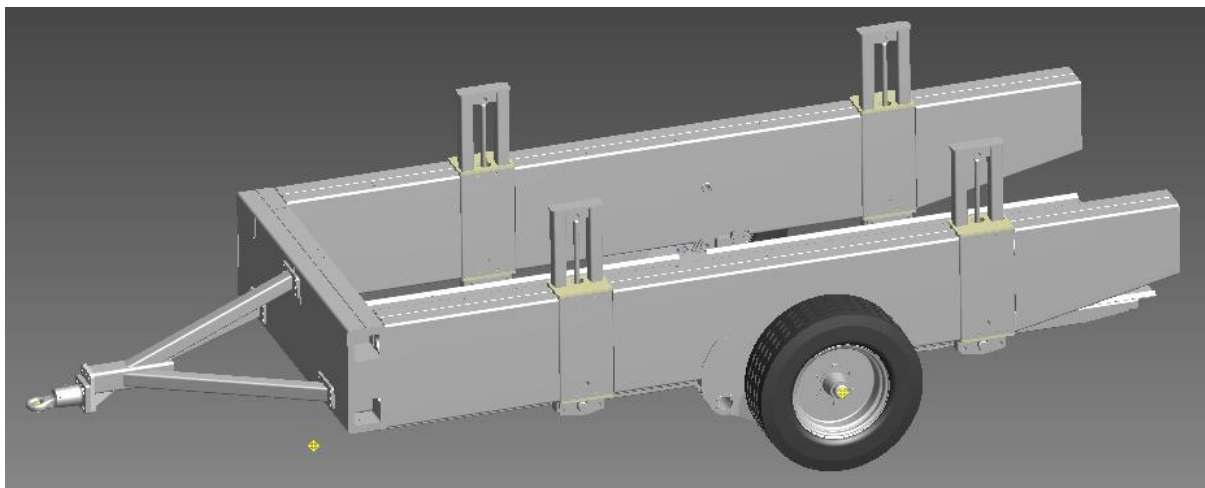
Veličina	Jednotky
hmotnosti m^1	kilogramy [kg]
rychlosti v^1	metry za sekundu [m/s] popř. kilometry za hodinu [km/h]
zrychlení a , g	metry za sekundu na druhou [m/s ²]
úhly γ , <i>alfa</i>	stupně [°] popř. radiány [rad]
úhlové rychlosti Ω	radiány za sekundu [rad/s]
úhlová zrychlení φ	radiány za sekundu na druhou [rad/s ²]
součinitel valivého odporu f	bez jednotky [1]
rameno valivého odporu ξ	metry [m]
rozměry jsou označeny <i>písmeny české abecedy</i> (kromě písmen označujících veličiny výše uvedených)	metry [m] popř. milimetry [mm]
počet stupňů volnosti DOF	stupně [°]
síly G , R , O^1	newtony [N]
momenty M^1	newton metry [Nm]
momenty setrvačnosti I^1	kilogram krát metry na druhou [kg.m ²]

¹ veličiny mohou být označeny i pomocí indexů

Úvod

Firmou STS Prachatice a.s. byla zadána diplomová práce související s vývojem nového přípojného vyvážedce kontejnerů (PVK). (viz obr. 1) Protože v budoucnu tento typ vyvážedce bude připojen za vlastní tažnou jednotku a vytvářet tak samohybný stroj, zabýval jsem přípojným členem ve formě kloubu. Využití kloubového podvozku má své nesporné výhody jako například, při stejném rozchodu kol pro přední i zadní nápravu, platí, že zadní kola následují stopu kol předních. Při takovémto uspořádání dochází ke zmenšení odporu valení u zadních kol a zároveň zlehčení a zbezpečnění práce u hran srázů a zdí. Lze tak tedy říct, že kloubový rám umožní stroji získat velmi dobrou stabilitu a manévrovatelnost.

Dalším důležitým úkolem bylo ohodnocení modelu PVK dodaného firmou z hlediska pevnostní analýzy, které pak dále poslouží jako hlavní aspekt posouzení vhodnosti pro výrobu. Pro tuto úlohu byl vybrán program Abaqus, který analýzu provádí pomocí metody konečných prvků. Vyhodnocované prvky vyvážedce byly závěs pro připojení pomocí tažného oka, U-rám a vodící prvky hydromotorů (výsuvy). (viz obr. 3.2.1) Všechny tyto části byly zatěžovány silovými poměry vyplývajícími z několika jízdních situací a vyhodnocovány na napěťové a deformační pole.

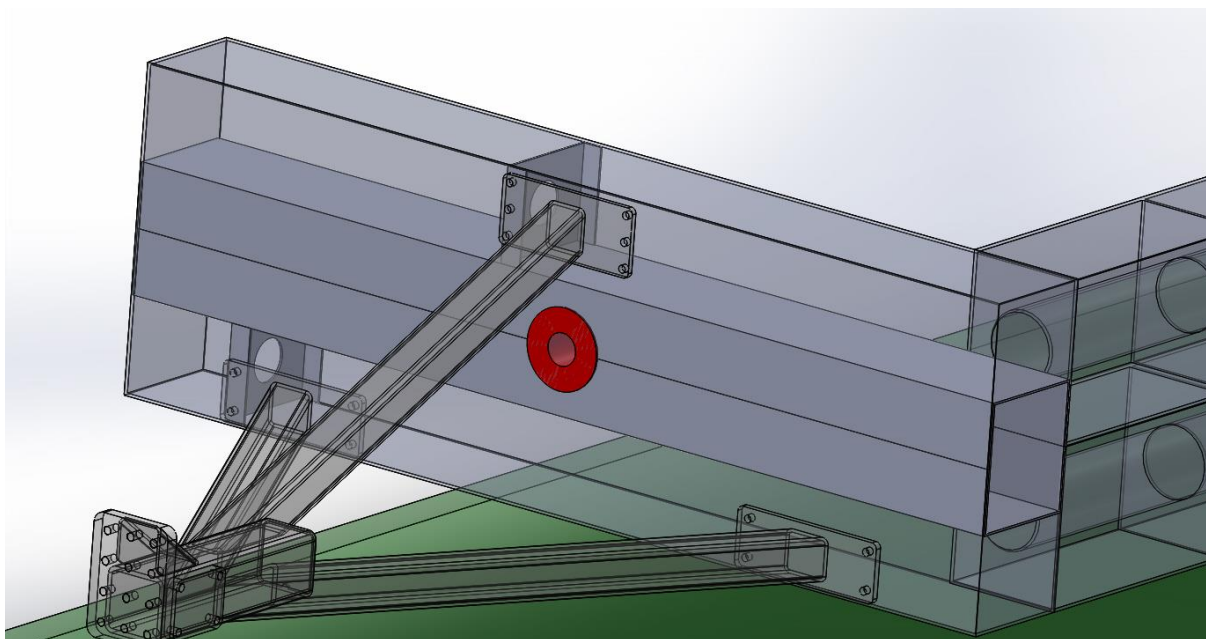


obr. 1: Koncepce přípojného vyvážedce kontejnerů 4 [1]

Teoretická část

Teoretická část se týká koncepčního návrhu spojovacího kloubového členu budoucího samohybu tvořeného tažným členem a vyvážedčem. Požadavky firmy byly takové, že pohyb okolo podélné osy pro udržení kontaktu s terénem i při přejezdu nerovností je koncipován dvojicí kuželíkových ložisek spojujících přední a zadní část samohybu. Obě kuželíková ložiska jsou uložena v předním panelu vyvážedče. (viz obr. 2) Dále pak byla samozřejmě zadána možnost pohybu okolo svislé osy pro zajištění zatáčení.

Pro celkové zmapování využívaných spojovacích členů byla zvolena rešerše v oblasti kloubových spojení, která čerpá informace ze základních zdrojů, jako jsou normy, patenty a používaná konstrukční řešení v praxi.



obr. 2: Umístění ložisek v předním panelu PVK [1]

1 Rešerše kloubového spojení

1.1 Patenty a normy

1.1.1 Patenty

Na stránkách Úřadu patentového vlastnictví (označení v textu CZ) [3] a pomocí vyhledávače Google Scholar (označení v textu AJ) [2] jsem našel následující patenty.

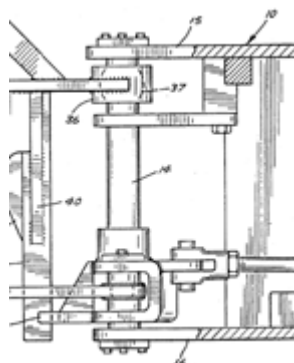
Patenty týkající se konstrukce provedení

Název patentu: Sněžný dopravní prostředek (AJ) (viz obr. 1.1.1.1)

Číslo patentu: US 5113958

Stav: zaniklý dokument

Popis: Kloub tvořený průběžným čepem, uloženým v kluzných ložiscích s možností posunutí ve směru svislé osy.



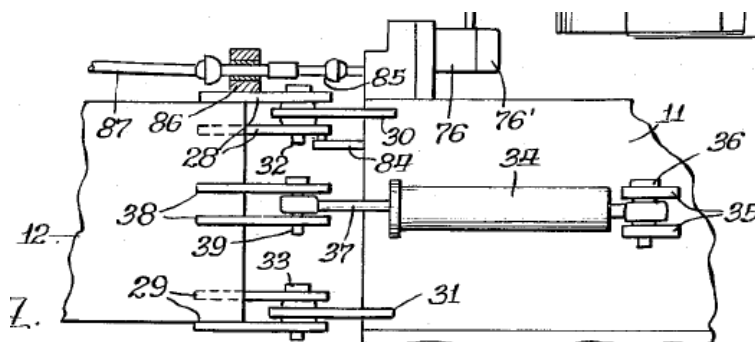
obr. 1.1.1.1: Patent č. US 5113958 [2]

Název patentu: Kloubový traktorový nakladač (AJ) (viz obr. 1.1.1.2)

Číslo patentu: US 3246778

Stav: -

Popis: Kloub tvořený dvojicí otočných čepů.



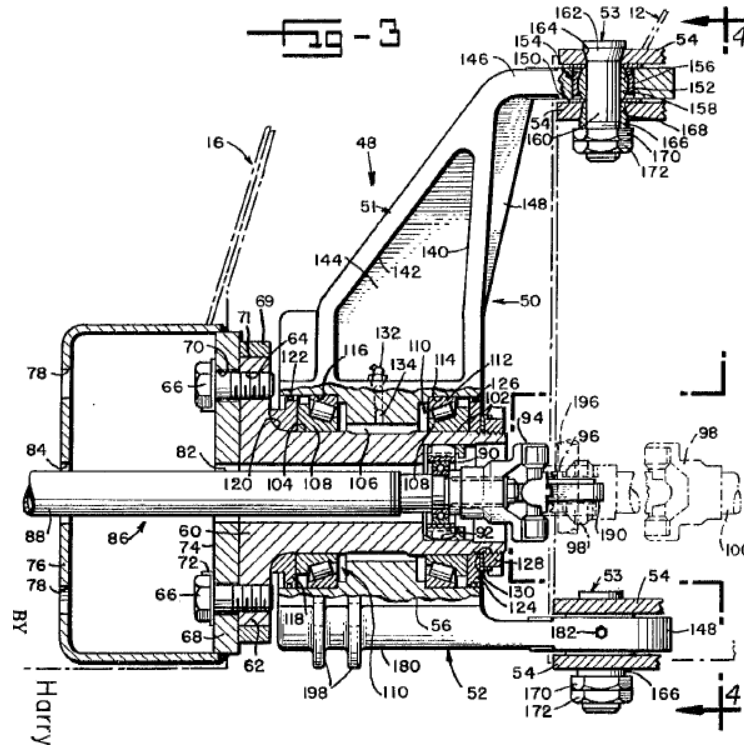
obr. 1.1.1.2: Patent č. US 3246778 [2]

Název patentu: Kloubové spojené vozidlo (nakladač) (AJ) (viz obr. 1.1.1.3)

Číslo patentu: US 3253671

Stav: -

Popis: Kloub tvořený dvojicí kluzně uložených čepů s výkresem vidlice kloubu.



obr. 1.1.1.3: Patent č. US 3253671 [2]

Název patentu: Kloubový rám – damper (AJ) (viz obr. 1.1.1.4)

Číslo patentu: US 3890005

Stav: -

Popis: Kloub tvořený dvojicí čepů s malou vůlí ve směru svislé osy.

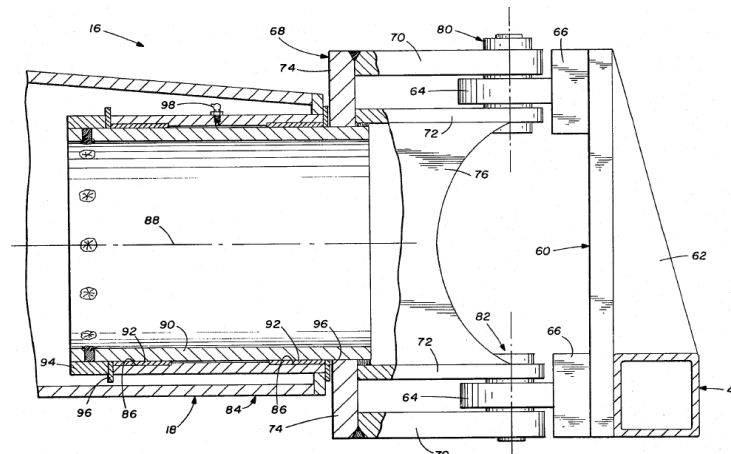


FIG. 4

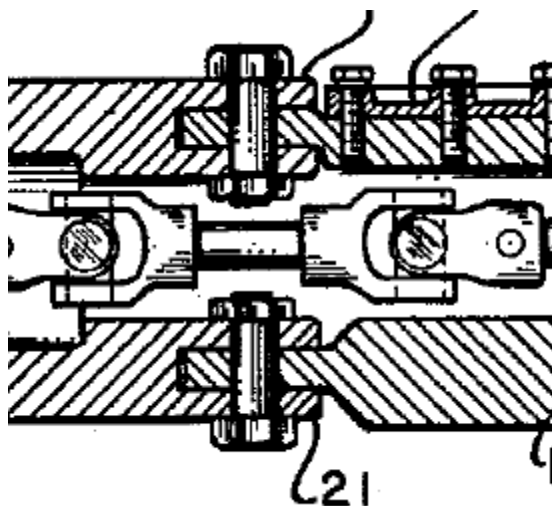
obr. 1.1.1.4: Patent č. US 3890005 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (AJ) (viz obr. 1.1.1.5)

Číslo patentu: US 3189117

Stav: -

Popis: Kloub tvořený dvojicí kluzně uložených čepů.



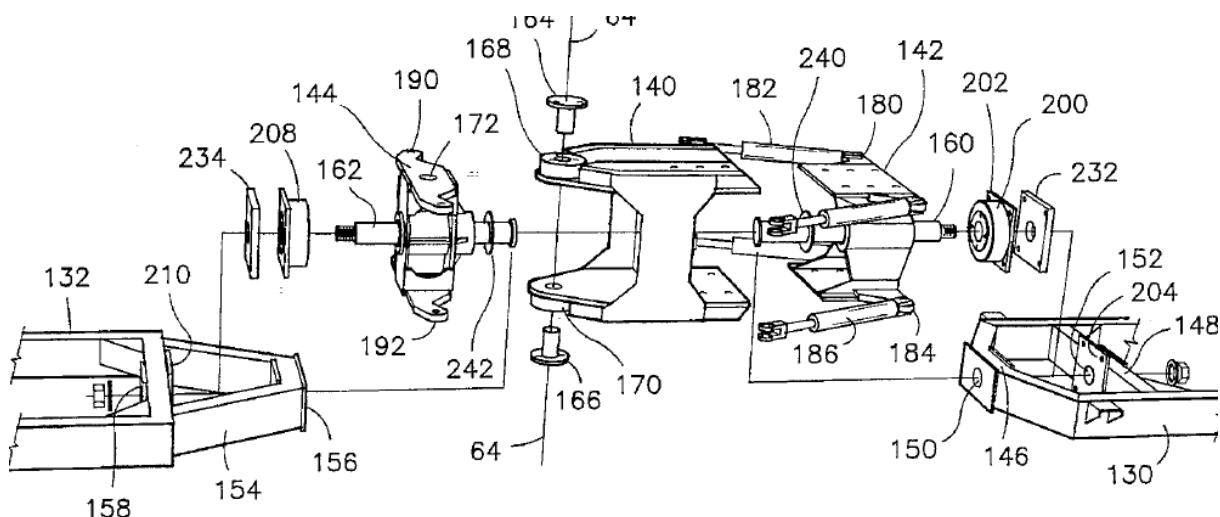
obr. 1.1.1.5: Patent č. US 3189117 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (rolba) (AJ) (viz obr. 1.1.1.6)

Číslo patentu: US 5632350

Stav: platný dokument

Popis: Spoj tvořený čepem, který spojuje jednotlivé části mezičlánku navazujícího na přední a zadní část vozidla.



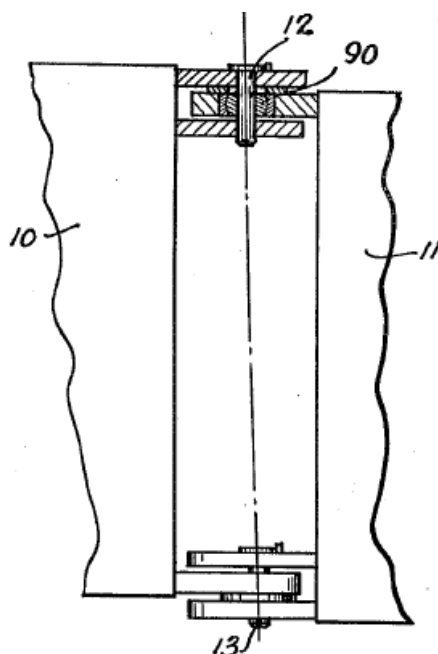
obr. 1.1.1.6: Patent č. US 5632350 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (traktor) (AJ) (viz obr. 1.1.1.7)

Číslo patentu: US 3191709

Stav: -

Popis: Spoj tvořený dvojicí kluzně uložených čepů.



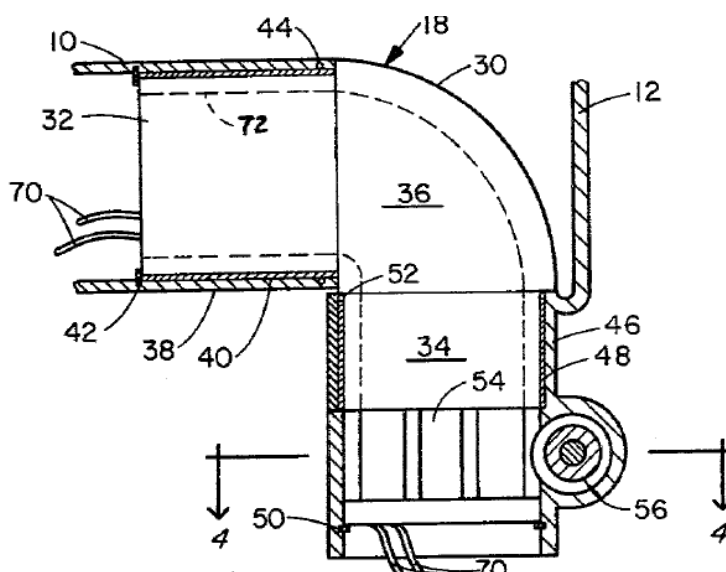
obr. 1.1.1.7: Patent č. US 3191709 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (AJ) (viz obr. 1.1.1.8)

Číslo patentu: US 4249629

Stav: -

Popis: Spoj tvořený šnekovým soukolím.



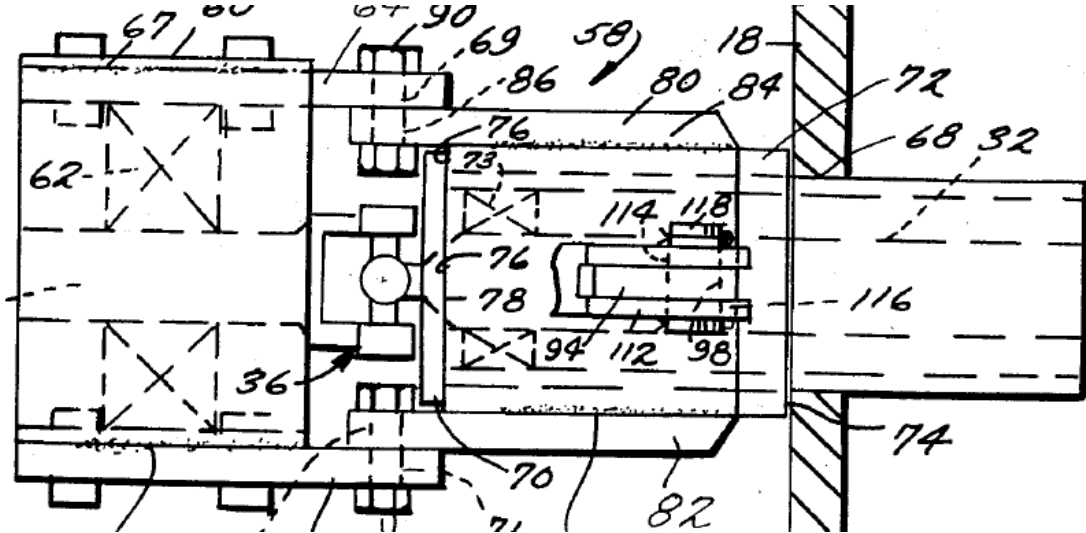
obr. 1.1.1.8: Patent č. US 4249629 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (vyvážeč dřeva) (AJ) (viz obr. 1.1.1.9)

Číslo patentu: US 3442345

Stav: -

Popis: Spoj tvořený dvojicí čepů.



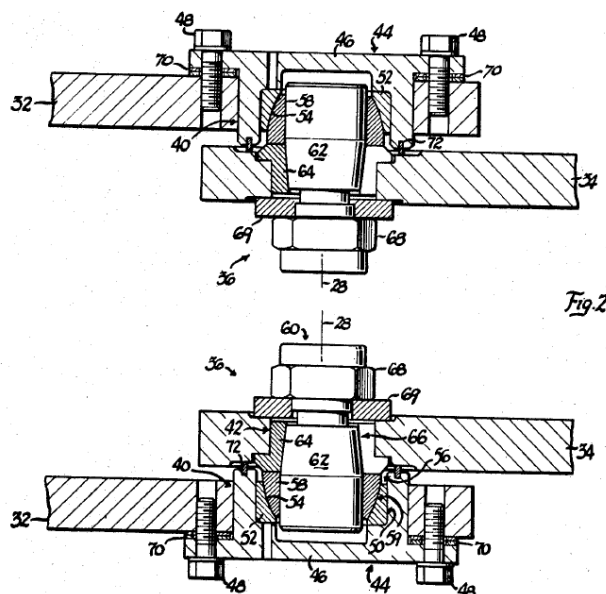
obr. 1.1.1.9: Patent č US 3442345 [2]

Název patentu: Kloubové vozidlo (nakladač) (AJ) (viz obr. 1.1.1.10)

Číslo patentu: US 3433502

Stav: -

Popis: Spoj tvořený dvojicí kluzně (zřejmě axiální ložiska) uložených čepů s detailním výkresem spojení.



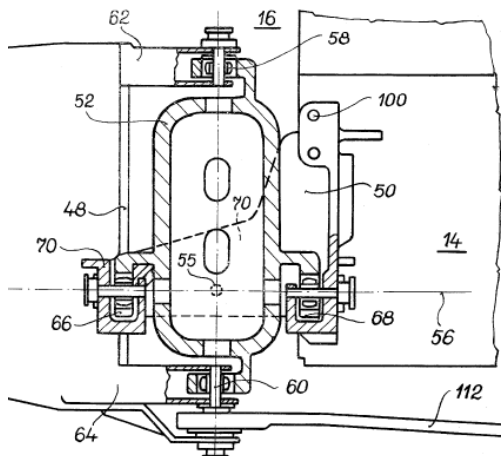
obr. 1.1.1.10: Patent č US 3433502 [2]

Název patentu: Kloubový spoj článkového vozidla (CZ) (viz obr. 1.1.1.11)

Číslo patentu: 219894

Stav: zaniklý dokument

Popis: Spoj tvořený mezičlánkem uloženým v ložiscích (osa zatáčení prochází mezi ložisky pro pohyb okolo vodorovné osy => zmenšení sil řízení). [3]



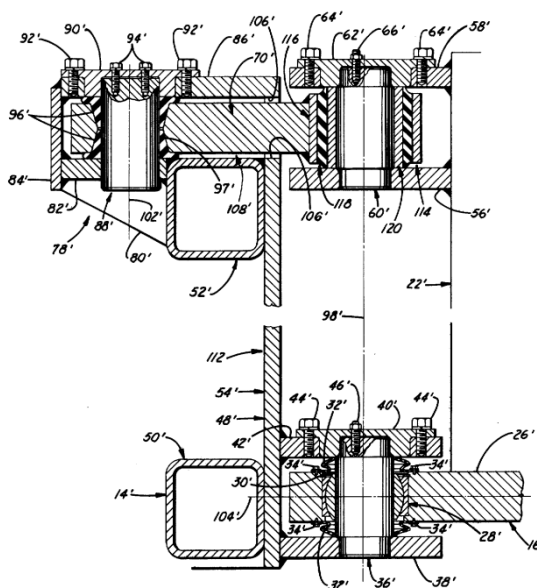
obr. 1.1.1.11: Patent č. 219894 [3]

Název patentu: Kloubový spoj pro kloubová vozidla (AJ) (viz obr. 1.1.1.12)

Číslo patentu: US 3912300

Stav: -

Popis: Kloubový spoj tvořený pevným táhlem a trojicí čepů, z nichž jeden je uložen pryžovém pouzdru a druhý (spodní) v kulovém ložisku pro tlumení rázů a umožnění výkyvného pohybu.²



obr. 1.1.1.12: Patent č. US 3912300 [2]

² Obdoba tohoto spojení se dnes používá s trojicí kluzných ložisek, místo čepů uložených v pryžovém pouzdru viz obr. 1.2.1.4
Řešení vybraných konstrukčních uzlů přípojného vyvážedce kontejnerů PVK4

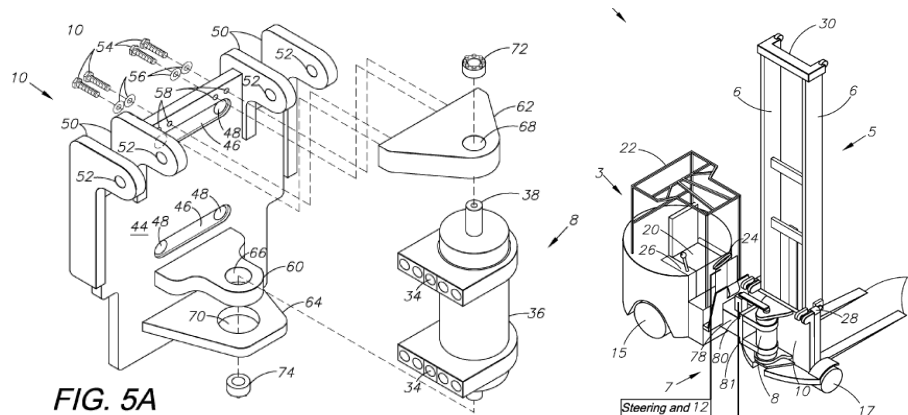
Název patentu: Hydraulický systém řízení pro vysokozdvizné vozíky (AJ)

(viz obr. 1.1.1.13)

Číslo patentu: US 8276704

Stav: -

Popis: Celý kloub je rotační hydromotor, kdy tělo motoru je připevněno k zadní části vozíku a z motoru vystupující rotační hřídel je ukotvená k přední části vozíku.



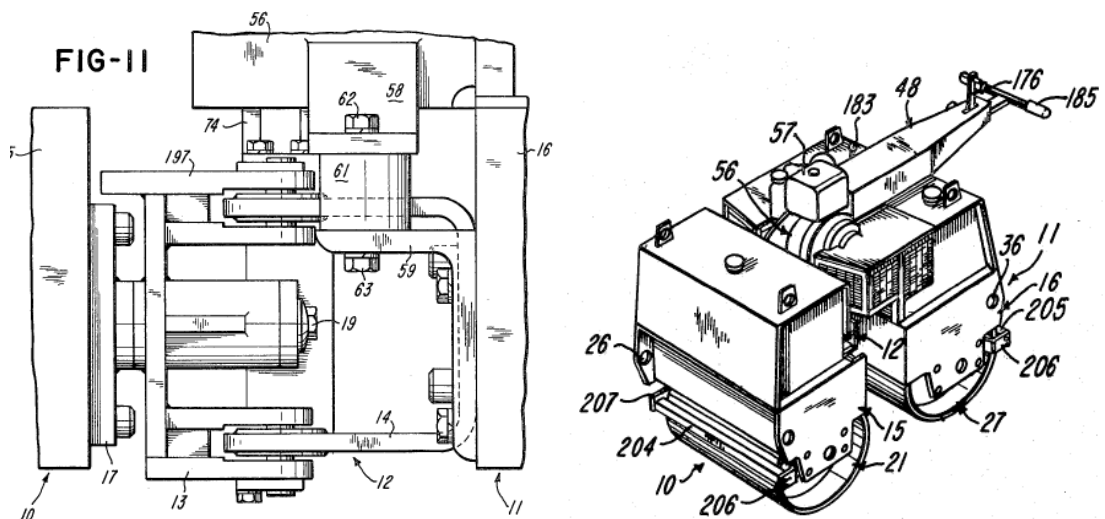
obr. 1.1.1.13: Patent č. US 8276704 [2]

Název patentu: Sestava kloubového válce (AJ) (viz obr. 1.1.1.14)

Číslo patentu: US 3814531

Stav: -

Popis: Přední a zadní část kloubového vibračního válce jsou spojeny dvojicí čepů.



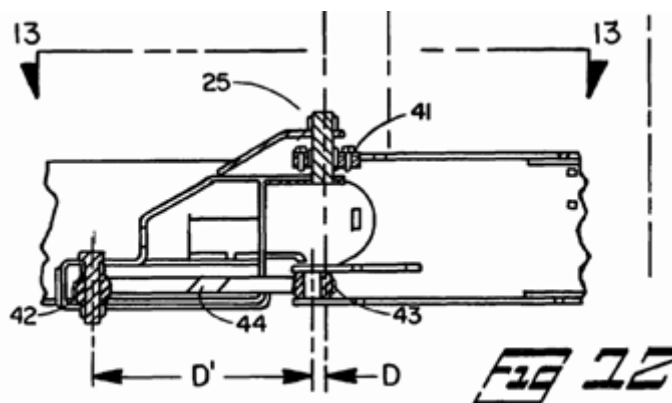
obr. 1.1.1.14: Patent č. US 3814531 [2]

Název patentu: Konstrukce kloubového traktoru (AJ) (viz obr. 1.1.1.15)

Číslo patentu: US 7694772

Stav: platný dokument

Popis: Ukázka kloubového spojení tlumící rázy použitého u kloubových traktorů.



obr. 1.1.1.15: Patent č. US 7694772 [2]

Další patenty

Už nepopisují celý kloub, ale pouze některé aspekty.

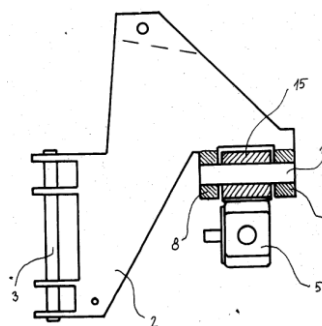
Název patentu: Kloubový podvozek rýpadla – nakladače (CZ) (viz obr. 1.1.1.16)

Číslo patentu: 212914

Stav: zaniklý dokument

Popis: Nakladač je řízen pomocí čepového spojení uloženého v ložiscích. Volnost pohybu okolo podélné osy je zaručena výkyvnou přední nápravou.

Podstata: Výkyvná náprava může vést k nestabilitě při určitých činnostech. Proto je zde použita pevná zadní náprava, aby při práci s rýpadlem byla zadní část vozidla stabilnější. [3]



obr. 1.1.1.16: Patent č. 212914 [3]

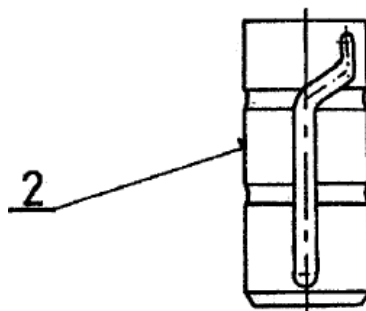
Název patentu: Spojovací kloub (CZ) (viz obr. 1.1.1.17)

Číslo patentu: 8810 (obdoba 102574)

Stav: zaniklý dokument

Popis: Kloub je tvořen vidlicí připojenou k jedné části, čepem a táhlem spojeným s druhou částí důlního zařízení.

Podstata: Na čepu je vytvořená drážka ve tvaru písmena „Z“ proti samovolnému vysunutí ze spoje. Protikus zapadající do drážky je zhotoven z pružného kolíku. [3]



obr. 1.1.1.17: Patent č. 8810 [3]

1.1.2 Normy

Na stránkách Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [4] jsem nenašel žádné konkrétní normy týkajících se kloubového spojení, proto jsem vyhledal normy související s daným tématem.

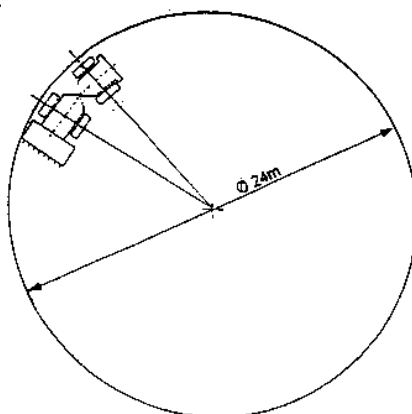
Název normy: Stroje pro zemní práce – Stroje na kolovém podvozku – Požadavky na řízení

Číslo normy: ČSN EN 12 643

Platnost: platná norma

Předmět normy: Tato norma platná pro traktory, dampy aj. stanovuje zkoušky řízení stroje a ohodnocuje tuto schopnost řízení. Platí pro samojízdné stroje na podvozku s pneumatikami a rychlostí větší než 20 km/h. [4]

Důvod zařazení: Určuje vlastnosti hydraulického řízení a může také stanovit rozsah kloubu na základě geometrie zkušební dráhy. (viz obr. 1.1.2.1)



obr. 1.1.2.1: ČSN EN 12 643 Zkušební dráha alternativní zkoušky řízení [4]

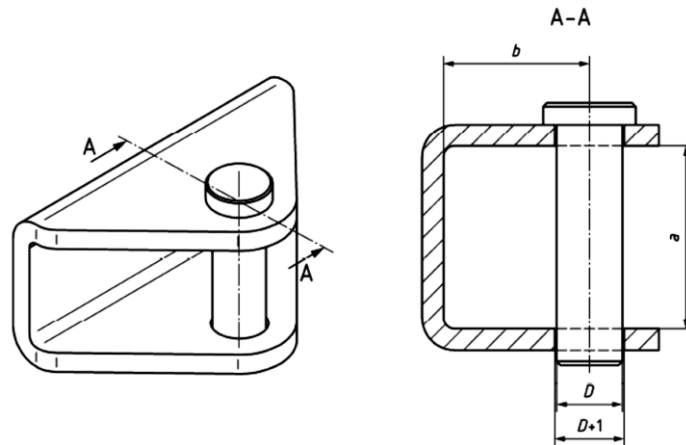
Název normy: Zemědělské stroje. Mechanická spojení, tažená a tažná vozidla –
- Část 5. Specifikace pro neotočné čepové spojovací zařízení

Číslo normy: ISO 6489-5

Platnost: platná norma

Předmět normy: Tato část ISO 6489 stanovuje požadavky na neotočné čepové spojovací zařízení použité pro připevnění zemědělských přívěsů a náradí vybavených otočným připojovacího oka, jak je uvedeno v ISO 5692-3 na zadní straně motorové zemědělské stroje.

Důvod zařazení: Prvek, ze kterého by se mohl skládat kloub. (viz obr. 1.1.2.2)



obr. 1.1.2.2: ISO 6489-5 Neotočné čepové spojení [5]

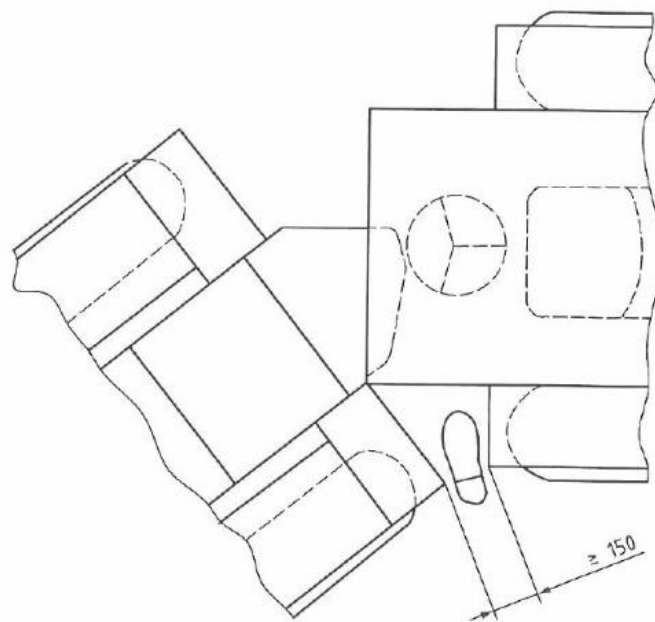
Název normy: Lesnické stroje – Obecné bezpečnostní požadavky

Číslo normy: ČSN EN ISO 11850

Platnost: platná norma

Předmět normy: Tato norma stanovuje bezpečnostní požadavky pro samojízdné lesnické stroje a řeší všechna významné nebezpečné situace. [4]

Důvod zařazení: Může určovat kinematiku a rozsah kloubového spojení. (viz obr. 1.1.2.3)



obr. 1.1.2.3: ČSN EN ISO 11850 Vymezení kloubové mezery [4]

1.2 Užití v praxi

Kloubová spojení se používá převážně u vozidel pohybujících se v terénu nebo ve stísněných prostorech, tomu také odpovídají jednotlivé oblasti využití kl. spojení.

Oblasti využití kloubových spojení:

- zemědělské stroje
- stavební stroje
- manipulační technika
- lesní stroje

1.2.1 Kloubový nakladač

Kloubové nakladače se vyskytují v několika verzích například teleskopické nebo mininakladače a v několika velikostech. Já jsem zde uvedl jejich stručný souhrn.

Provedení kloubového spojení:

- spoj umožňující zatáčení: čep uložený v ložiscích
- spoj umožňující spojitý dotyk s terénem: výkyvná zadní (přední) náprava /výkyvná celá zadní (přední) část vozidla / trojice výkyvných ložisek
- použitá ložiska k uložení čepu: kuželíková (velký nakladač) / kluzná (pro trojici ložisek – velký nakladač)
- rozsah pohybu zatáčení (úhel vytočení od podélné osy vozidla): 40°-50°
- rozsah pohybu výkyvu nápravy/části vozidla (úhel natočení od příčné osy): 12°
- zástavbové parametry: kloub přibližně uprostřed rozvoru náprav
- řízení: hydraulické motory

Podmínky využití kloubového spojení³:

- pracovní prostředí: terén
- užitečné zatížení (nosnost): 1 – 8 tun
- rychlost: 20-40 km/h
- výrobce: Liebherr, JCB, New Holland, Bobcat, Weidemann, Paload, In-track, Caterpillar (viz obr. 1.2.1.1 - 1.2.1.4)

[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]

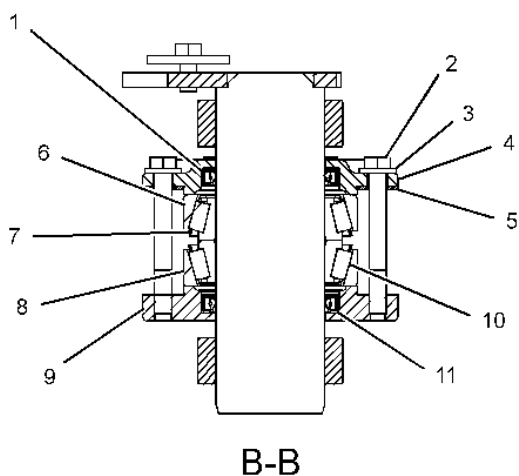
³ Pro srovnání s PVK uvádím podmínky použití jednotlivých kloubních spojení.



obr. 1.2.1.1: Mininakladač od firmy In-track [12]



obr. 1.2.1.2: Nakladač od firmy Weidemann [10]



obr. 1.2.1.3: Velký nakladač od firmy Caterpillar (bokorys) [13]



obr. 1.2.1.4: Velký nakladač z Agritechnica Hannover

Obdobné uspořádání a vlastnosti kloubu se používají i pro kloubové traktory nebo nosiče nářadí.

1.2.2 Damper

Damper je v provedení kloubovém (rozměrově větší) a kolovém (rozměrově menší).

Provedení kloubového spojení:

- spoj umožňující zatáčení: čep uložený v ložiscích
- spoj umožňující spojitý dotyk s terénem: výkyvná zadní (přední) náprava /výkyvná celá zadní (přední) část vozidla
- použitá ložiska k uložení čepu: kuželíková (kloubové dampery)
- rozsah pohybu zatáčení (úhel vytočení od podélné osy vozidla): 45°
- rozsah pohybu výkyvu nápravy/části vozidla (úhel natočení od příčné osy): $45^\circ <$ (kloubové dampery)
- zástavbové parametry: kloub blíže k přední nápravě (kloubové dampery)
kloub přibližně uprostřed rozvoru náprav (kolové dampery)
- řízení: hydraulické motory

Podmínky využití kloubového spojení:

- pracovní prostředí: terén
- užitečné zatížení (nosnost): 20-40 tun (kloubové dampery)
2-9 tun (kolové dampery)
- rychlost: 30-50 km/h (kloubové dampery)
10-30 km/h (kolové dampery)
- výrobce: Volvo, Terex, NC Engineering, Liebherr (viz obr. 1.2.2.1 - 1.2.2.2)

[14, 15, 16, 17]



obr. 1.2.2.1: Kloubový damper od firmy Volvo [14]



obr. 1.2.2.2: Kolový damper od firmy Terex [15]

1.2.3 Harvestor

Provedení kloubového spojení:

- spoj umožňující zatáčení: čep uložený v ložiscích
- spoj umožňující spojitý dotyk s terénem: výkyvná náprava a zároveň střední část je spojena s přední i zadní částí pomocí otočných čepů
- rozsah pohybu zatáčení (úhel vytočení od podélné osy vozidla): $40^\circ - 44^\circ$
- rozsah pohybu výkyvu nápravy/části vozidla (úhel natočení od příčné osy): $16^\circ - 22^\circ$
- zástavbové parametry: kloub přibližně uprostřed rozvoru náprav
- řízení: hydraulické motory

Podmínky využití kloubového spojení:

- pracovní prostředí: terén
- výrobce: Komatsu, John Deere, Logset, Ponsse, Rottne (viz obr. 1.2.3.1)

[18, 19, 20, 21, 22]



obr. 1.2.3.1: Harvestor od firmy Ponsse [21]

1.2.4 Jednonápravový traktor (spojený s přívěsem)

Provedení kloubového spojení:

- spoj umožňující zatáčení: čep uložený kluzně bez ložisek
- spoj umožňující spojitý dotyk s terénem: bez rotace okolo podélné osy, přenos výkonu při nerovnostech pouze pomocí uzávěrky diferenciálu
- rozsah pohybu zatáčení (úhel vytočení od podélné osy vozidla): $<90^\circ$
- zástavbové parametry: kloub blíže přední nápravě
- řízení: lidská síla

Podmínky využití kloubového spojení:

- pracovní prostředí: terén
- rychlost: $<10\text{km/h}$
- výrobce: BCS, Agria, MKS, Terra-Vari (viz obr. 1.2.4.1)

[23, 24, 25, 26]



obr. 1.2.4.1: Jednonápravový traktor Terra-Vari [26]

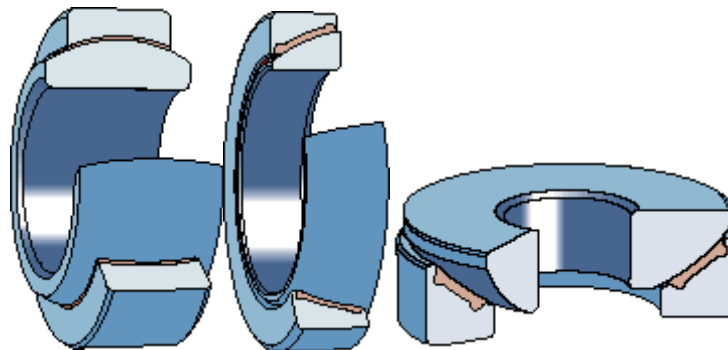
1.2.5 Výrobci spojovací techniky

Ložiska

Uvedu zde jen některé výrobce, kteří se také orientují na kloubová ložiska, protože kuželíková ložiska vyrábí mnoho firem.

- produkt:
 - kloubová ložiska – kluzná ložiska, vyrobená v mnoha provedeních a s různými kombinacemi kluzných povrchů, vhodná pro kývavý pohyb kloubů
 - kuželíková ložiska – valivá ložiska, vhodná pro velké radiální a axiální zatížení
- cena: při porovnávání ložiska stejného typu, tak cenově jsou tyto firmy na porovnatelné úrovni. Levnější ložiska se dají pořídit například u tuzemské firmy ZKL. (srovnáváno na <http://www.loziska-arkov.cz/>)
- výrobce: SKF, FAG, INA, Timken (viz obr. 1.2.5.1)

[27, 28, 29, 30]



obr. 1.2.5.1: Kloubová ložiska SKF (bráno zleva)
- radiální ložisko nevyžadující mazání
- ložisko s kosoúhlým stykem [27]

1.3 Výsledné varianty

tab. 1.2.6.1: Výsledné varianty kloubů dle řešeršní části

Spoj umožňující zatáčení	Spoj umožňující spojitý dotyk s terénem
čep (dvojice čepů) uložený ve valivých ložiscích	zadní (popř. přední) celá část vozu uložená v ložiscích (vytvoření mezičlánu s valivými ložisky)
čep (dvojice čepů) uložený v kluzných ložiscích	výkyvná (popř. přední) pouze zadní náprava
rotace způsobená pohybem ozubeného soukolí	bez rotace okolo podélné osy, přenos výkonu při nerovnostech pouze pomocí uzávěrky diferenciálu
čep (dvojice čepů) uložený pouze kluzně bez ložisek	spojovací mezičlánek nebo jednotlivé části spojené torzní spojkou
pevné táhlo s třemi kluznými ložisky	

Jen pro úplnost ještě doplním způsoby řízení zatáčení vozidla:

- hydraulické řízení pomocí jednoho nebo dvojice hydromotorů
- lidská síla
- hydraulické řízení pomocí rotačního hydromotoru

Praktická část

Na rešerši navazuje v praktické části návrh jednotlivých variant spojení a celá problematika kloubových spojů je uzavřena jednoduchým návrhem délky spojení.

V další části je pak hodnocení MKP analýzy vybraných částí přípojného vyvážedče, kterou předchází sestavení a uvolnění modelu zatížení v jednotlivých jízdních situacích.

2 Koncepční návrh spojovacího bodu vyvážedče

2.1 Varianty kloubových spojení

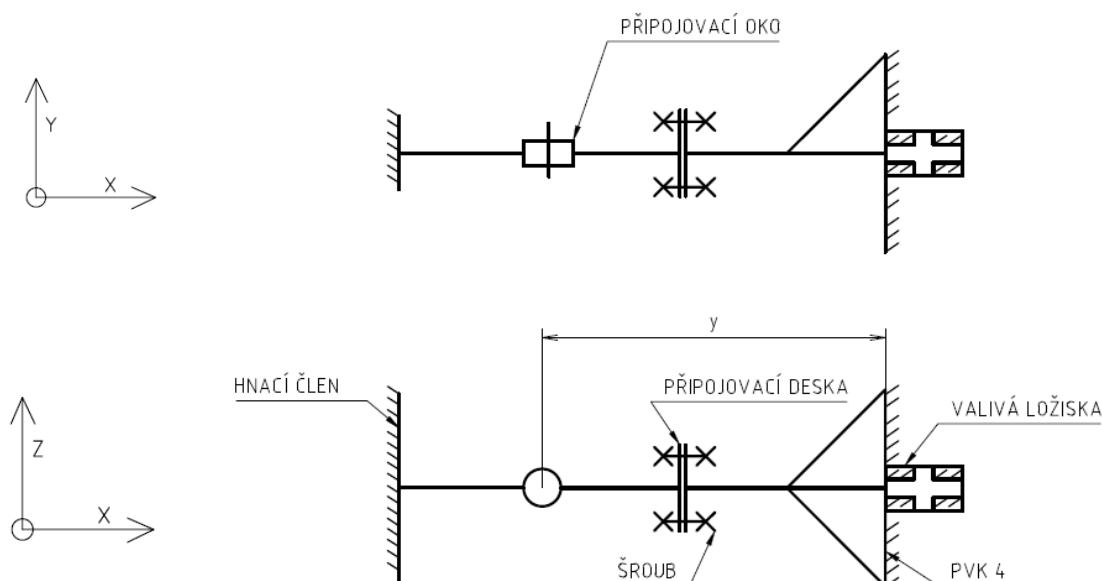
Vytvořené konstrukční varianty se řídí dle variant vyskytujících se na trhu v oblasti zemědělské či lesnické techniky, proto jsem neuvažoval například možnost řízení zatáčení pomocí rotačního hydromotoru nebo vyrovnávání nerovností pomocí torzní spojky a zároveň jsem je přizpůsoboval rozměrům a váze PVK, proto se zde neuplatní řízení pouze lidskou silou nebo čep uložený kluzně bez ložisek.

Pro jednotlivé varianty mají společné následující faktory:

- řízené zatáčení vozidla je určeno jedním nebo dvojicí hydromotorů upevněných po stranách kloubu
- ložiska určená k neustálému kontaktu s povrchem jsou kuželíková (viz požadavky STS)
- ložiska určená k uložení čepu jsou valivá kuželíková nebo kluzná kloubová
- přední panel vyvážedče je shodný jak pro variantu s připojovacím okem určeným pro tažení traktorem, tak pro variantu samohybu tj. vyvážedč a tažný člen spojený kloubem, proto zde uvádím obě varianty, aby zde vyplynuly některé výhody a nevýhody daných řešení

2.1.1 Varianta dle původních parametrů STS Prachatice

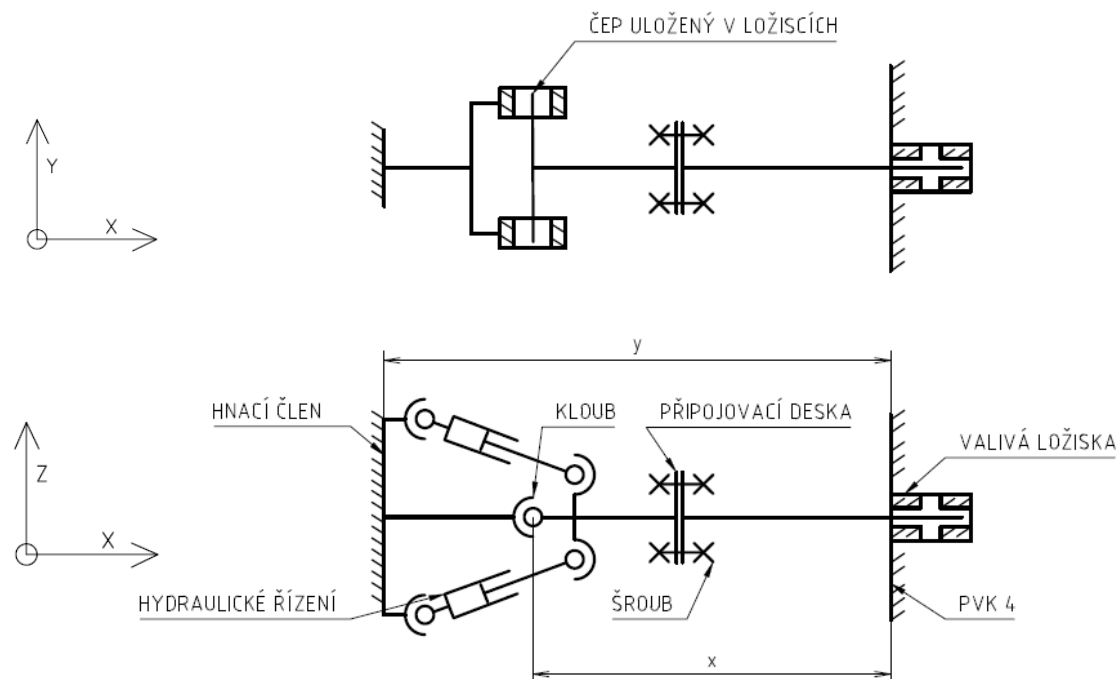
- varianta s přípojovacím okem: (viz obr. 2.1.1.1)



obr. 2.1.1.1: Provedení s přípojovacím okem dle STS

PVK s připojeným přípojovacím okem a ložisky v předním modulu, připravenými i pro možnost výměny za kloub.

- varianta s kloubovým spojením: (viz obr. 2.1.1.2)

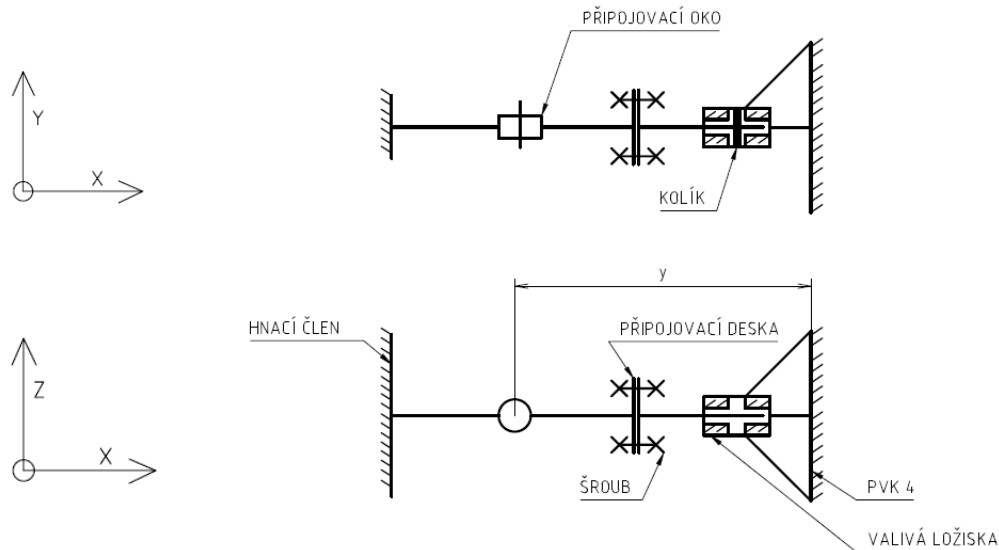


obr. 2.1.1.2: Provedení s kloubovým spojením dle STS

Samojízdný PVK po odebrání předního závěsu s okem, s připojeným kloubem uloženým v ložiscích předního panelu. Výměnu provádí výrobce.

2.1.2 Další upravené varianty

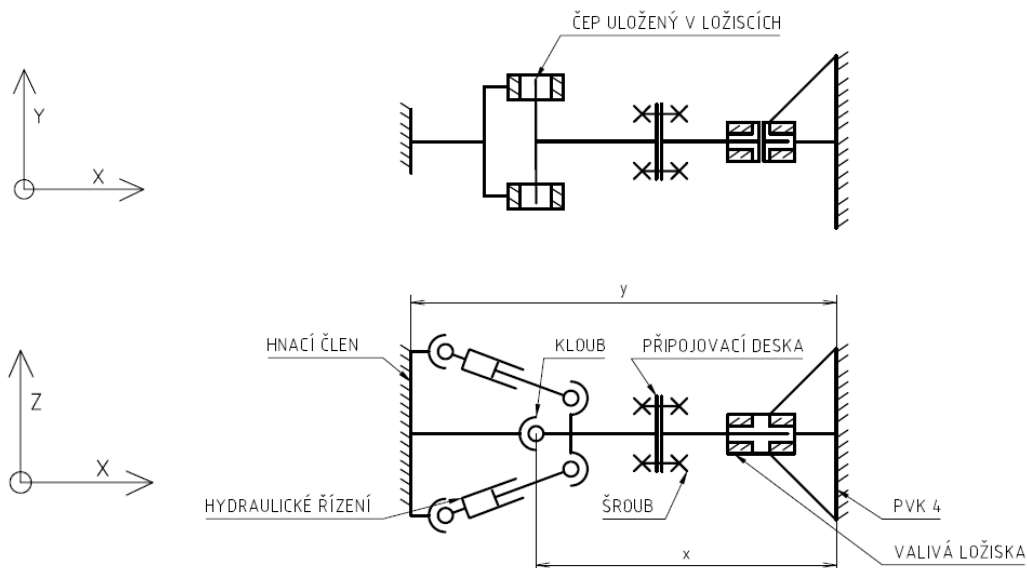
- **varianta s ložisky v závěsu a zajišťovacím kolíkem**
 - varianta s přípojovacím okem: (viz obr. 2.1.2.1)



obr. 2.1.2.1: Provedení s ložisky v závěsu, kolíkem a přípojovacím okem

V případě snadné demontáže (například dokonce zákazníkem) v oblasti přípojovací desky (povolení šroubů) lze přední závěs s ložisky ponechat a pouze zakolíkovat a zajistit tak nehybnost okolo podélné osy vyvážedce.

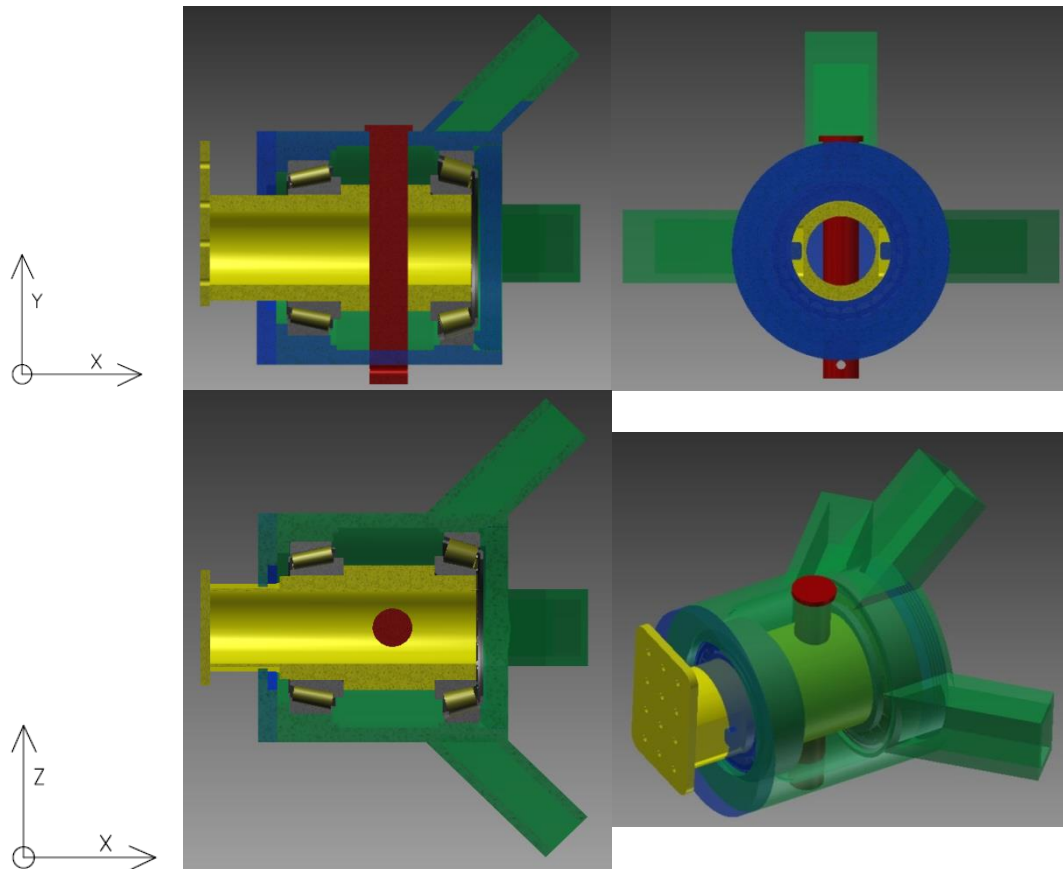
- varianta s kloubovým spojením: (viz obr. 2.1.2.2)



obr. 2.1.2.2: Provedení s ložisky v závěsu, bez kolíku a kloubovým spojením

Lze vyměnit pouze část s přípojovacím okem za kloub v přípojovací desce a odjistit kolík pro volný pohyb okolo podélné osy.

Konstrukce ložisek v závěsu

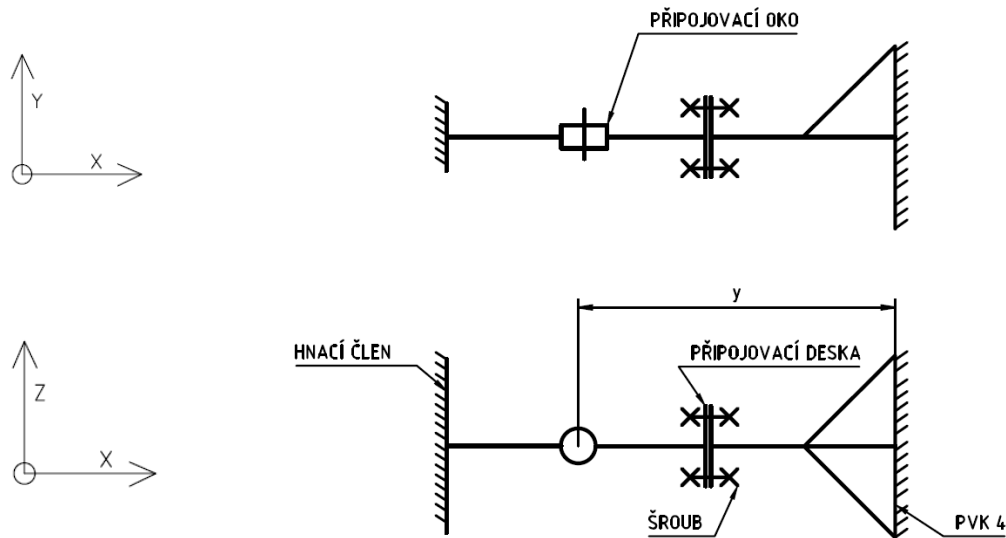


obr. 2.1.2.3: Model uložení ložisek v závěsu

Na dutou hřídel jsou uložena kuželíková ložiska, celek se pak vloží do trubky s těsněními a zajistí maticí z pravé strany (viz. obr. 2.1.2.3). Koncové dorazy jsou umístěny na víku vlevo a zapadají do drážek na hřídeli. Poté jsou přivařeny přípojovací desky a ramena závěsu. Pro zajištění nehybnosti slouží kolík se závlačkou.

- výhody oproti původní koncepci:
 - přední modul PVK není zeslaben prostorem pro ložiska
 - přední modul vyvážče při změně na samohyb je zatížen rovnoměrněji ve třech bodech
 - jednodušší výměna z přípojovacího oka na kloubové spojení ať už pro zákazníka nebo pro výrobce
- nevýhoda:
 - v případě výměny zákazníkem z oka na samohyb a naopak nastává namáhavá manipulace s jednotlivými částmi, díky velké váze částí

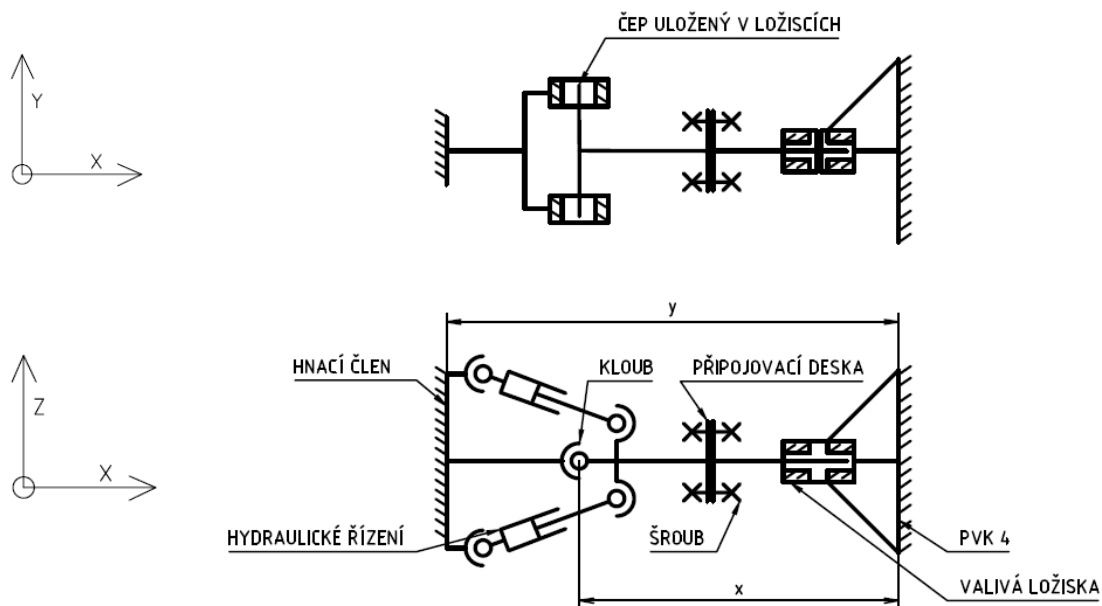
- **varianta s ložisky v závěsu a jednoduchým závěsem**
 - varianta s přípojovacím okem: (viz obr. 2.1.2.4)



obr. 2.1.2.4: Provedení s jednoduchým závěsem a přípojovacím okem

Jednoduchý závěs upnutý ve třech bodech k PVK.

- varianta s kloubovým spojením: (viz obr. 2.1.2.5)



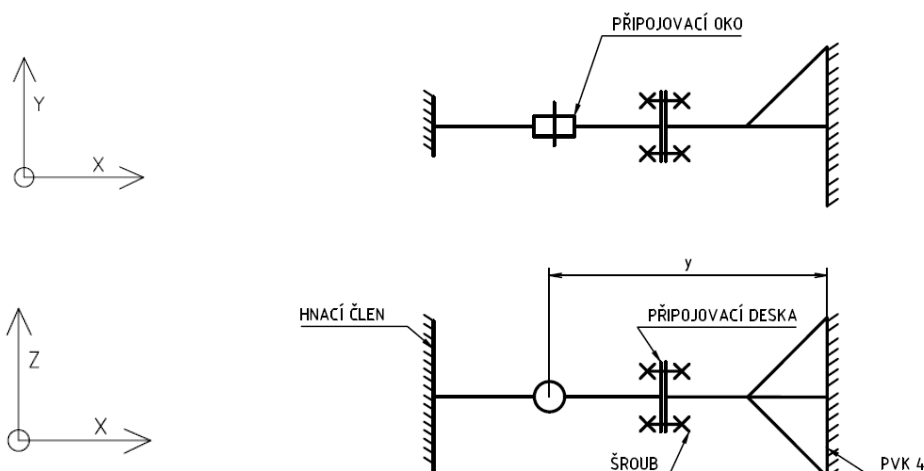
obr. 2.1.2.5: Provedení s ložisky v závěsu, bez kolíku a kloubovým spojením

Změnu na samohyb provádí výrobce odebráním jednoduchého závěsu a nahradí ho závěsem s ložisky, který oproti předchozí verzi nemá žádné uplatnění pro kolík.

Zde odpadá případná nevýhoda předchozí verze a to nesnadná manipulace pro zákazníka při změně na samohyb, protože výměnu musí udělat výrobce.

- **varianta s táhlem a kulovými čepy a jednoduchým závěsem**

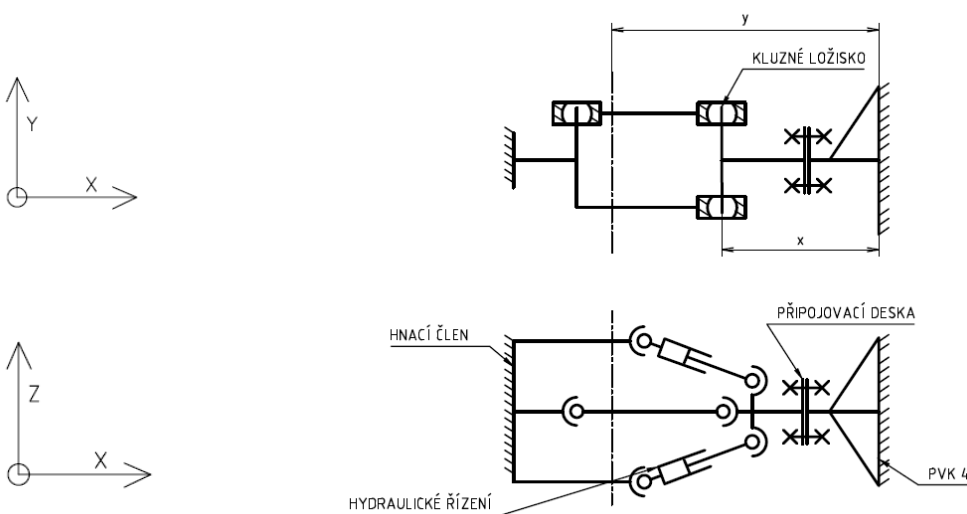
- varianta s připojovacím okem: (viz obr. 2.1.2.6)



obr. 2.1.2.6: Provedení s jednoduchým závěsem a připojovacím okem

Jednoduchý závěs je totožný jako v předchozím případě.

- varianta s kloubovým spojením: (viz obr. 2.1.2.7)



obr. 2.1.2.7: Provedení s kluznými ložisky v závěsu

K výkyvu okolo podélné osy dochází díky trojici kluzných ložisek, z nichž jedno mění svojí polohu (na obr. 2.1.2.7 je to pravé horní).

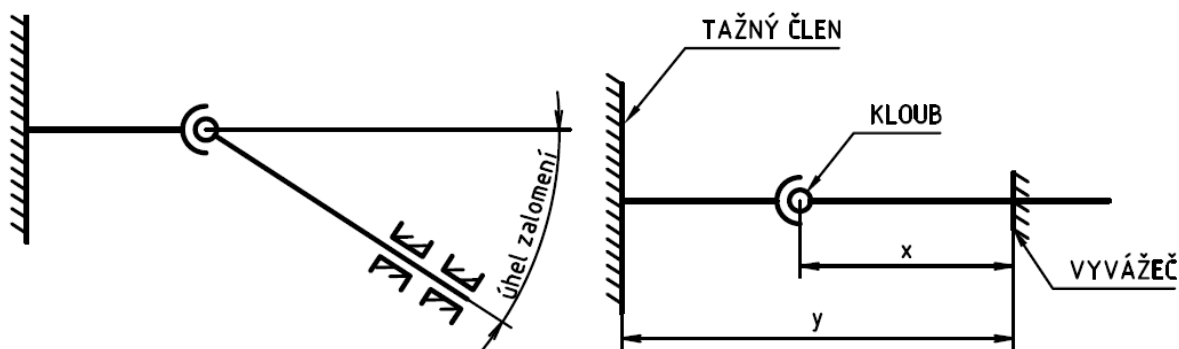
Jak je vidět ze schématu, části závěsů do připojovací desky jsou shodné, což opět nabízí myšlenku výměny v oblasti připojovací desky ať už zákazníkem nebo výrobcem a zároveň zřejmě z hlediska výrobních nákladů bude toto řešení ještě výhodnější, protože konstrukčně je jednodušší. Jinak upevnění na závěs skýtá samé výhody jako u předešlých verzí a to, neměnnost předního modulu a zároveň jeho rovnoměrnější zatížení.

2.2 Výpočet délky kloubového spojení

Pro výpočet délky spojení jsem stanovil následující podmínky:

- šířka tažného členu má maximální povolené rozměry tj. 2 500 mm
- šířka taženého členu (vyvážeče) má hodnotu 1 820 mm
- úhel zalomení (úhel vytočení jednoho členu od podélné osy druhého členu) má hodnotu 50° , což je horní hranice používané pro obdobné stroje na trhu
- dle ČSN EN ISO 11 850 je vymezena minimální mezera mezi členy kloubového spojení 150 mm.

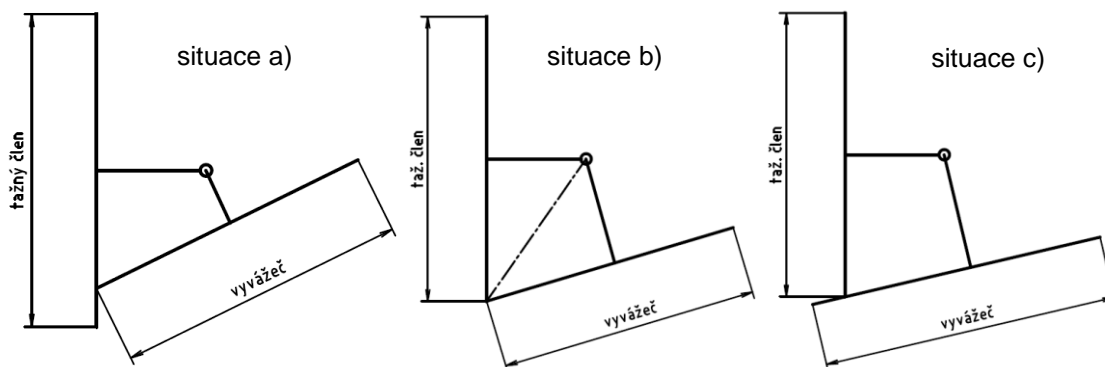
Zavedení značení (viz obr. 2.2.1)



obr. 2.2.1: Značení při výpočtu délky závěsu (půdorys)

2.2.1 Postup výpočtu

- Rozdělení na tři možné situace: (viz obr. 2.2.1.1)
 - vyvážeč narazí do tažného členu (situace a)
 - vyvážeč a tažný člen se střetnou v rozích (situace b)
 - tažný člen narazí do vyvážeče (situace c)



obr. 2.2.1.1: Situace možné kolize vyvážeče a tažného členu (půdorys)

- Návrh parametrů shodných pro všechny situace:
 - hodnota y je dána jako funkce x (z důvodu většího počtu neznámých než rovnic, viz následující bod)

$$y = k \cdot x \quad (2.2.1.1)$$

- hodnota $x < 1\,000$ mm (zvolená hodnota – vyšší hodnota by znamenala příliš dlouhou délku spojení)
- hodnota $k = \langle 1; 10 \rangle$ (zvolený interval – nižší hodnota by z logického důvodu neměla smysl, protože $x \leq y$)
- Výpočet dílčích rozměrů:

- situace a) - výpočet rozměru *rameno*:

$$\text{rameno} = \sqrt{\left(\frac{1\,820}{2}\right)^2 + x^2 - (k \cdot x - x)^2} \quad (\text{viz obr. 2.2.1.2}) \quad (2.2.1.2)$$

- situace b) - výpočet rozměru x :

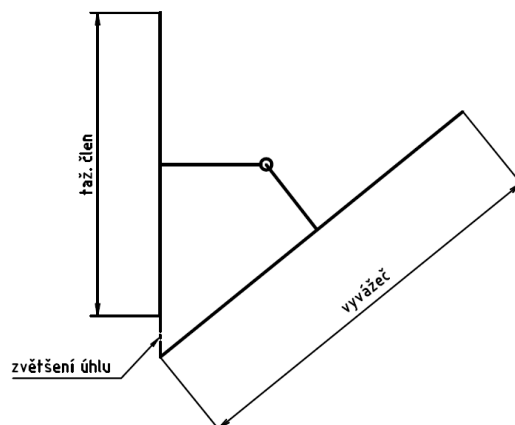
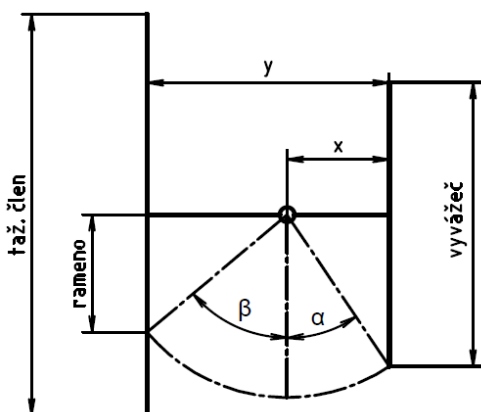
$$\sqrt{\left(\frac{2\,500}{2}\right)^2 + (k \cdot x - x)^2} = \sqrt{\left(\frac{1\,820}{2}\right)^2 + x^2} \quad (\text{viz obr. 2.2.1.1}) \quad (2.2.1.3)$$

po úpravě:

$$x = \sqrt{\frac{\left(\frac{1\,820}{2}\right)^2 - \left(\frac{2\,500}{2}\right)^2}{(k-1)^2 - 1}} \quad (2.2.1.4)$$

z povahy odmocniny má rovnice (4) smysl pouze pro $k = \langle 1; 2 \rangle$

- situace c) - tuto situaci lze řešit dle stejného vzorce (2) jako situaci a) (viz obr. 2.2.1.3.), při řešení podle vzorce (2) nastává situace c) až po situaci a) (viz. příloha tab.1), tj. *rameno* pro situaci c) je větší než pro situaci a) a dochází, tak ke zvyšování celkové délky y kloubového spojení, **proto dále se situací c) nebude počítáno**



obr. 2.2.1.2: Výpočet ramena pro situaci a) obr. 2.2.1.3: Výpočet ramena pro situaci c)

- Výpočet rozměru y shodného pro všechny situace:

$$y = k \cdot x \quad (2.2.1.5)$$

- Výpočet úhlu zalomení $\alpha + \beta$ shodného pro všechny situace:

$$\alpha + \beta = \arctg\left(\frac{x}{\frac{1820}{2}}\right) + \arctg\left(\frac{y-x}{rameno}\right) \quad (\text{viz obr. 2.2.1.2.}) \quad (2.2.1.6)$$

pro situaci b) se $rameno = 2500/2$

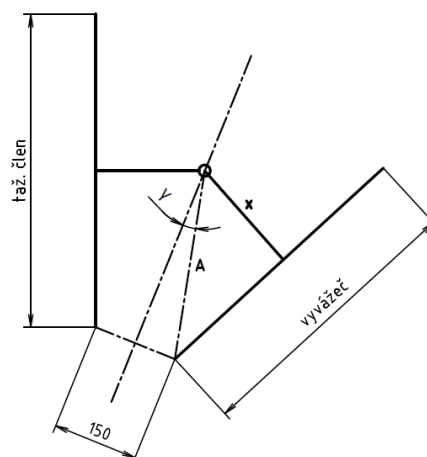
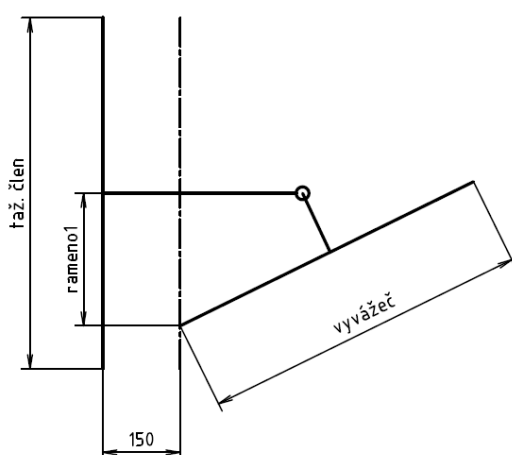
- Výpočet dílčích rozměrů s uvažováním minimální vůle 150 mm:

- situace a) - výpočet rozměru $rameno1$:

$$rameno1 = \sqrt{\left(\frac{1820}{2}\right)^2 + x^2 - (k \cdot x - 150 - x)^2} \quad (\text{viz obr. 2.2.1.4.}) \quad (2.2.1.7)$$

- situace b) - výpočet rozměru A :

$$A = \sqrt{\left(\frac{1820}{2}\right)^2 + x^2} \quad (\text{viz obr. 2.2.1.5.}) \quad (2.2.1.8)$$



obr. 2.2.1.4: Výpočet ramena1 pro situaci a) obr. 2.2.1.5: Výpočet rozměru A , γ pro situaci b)

- Výpočet skutečného úhlu zalomení $\alpha1 + \beta1$:

- situace a):

$$\alpha 1 + \beta 1 = \arctg\left(\frac{x}{\frac{1820}{2}}\right) + \arctg\left(\frac{y - 150 - x}{rameno1}\right) \quad (2.2.1.9)$$

- situace b):

$$\alpha 1 + \beta 1 = \alpha + \beta - 2 \cdot \gamma = \alpha + \beta - \arcsin\left(\frac{150}{A}\right) \quad (\text{viz obr. 2.2.1.5.}) \quad (2.2.1.10)$$

- Výpočet kontrolního rozměru:

- situace a):

$$y - x - 150 < 1\,820/2 \quad (2.2.1.11)$$

- situace b):

$$y - x < 1\,820/2 \quad (2.2.1.12)$$

Pokud daná geometrie spojovacího kloubu nespĺňuje podmínku kontrolního rozměru, může dojít k vytočení přední části oproti zadní o více než 90° (úhel zalomení $\geq 90^\circ$)

- Porovnávací hlediska = konečná délka musí splňovat všechny následující podmínky:
 - splnění podmínky úhel zalomení je alespoň 50°
 - splnění podmínky kontrolního rozměru
 - situace a) - splnění podmínky $rameno1 < 2500/2$, protože pokud nastane situace a) tj. narazí vyvážec do tažného členu, z geometrie vyplývá, že nemůže být *rameno1* delší než polovina šířky tažného členu
 - splnění podmínky nejkratší délky y

2.2.2 Výsledná varianta

Po zohlednění všech porovnávacích hledisek (viz. příloha tabulky 1-9) vyšla následující varianta:

$$y^4 = 1\,045 \text{ mm}$$

$$x = 550 \text{ mm}$$

$$\text{úhel zalomení} = 50,08^\circ$$

$$k = 1,9$$

Sice varianta pro situaci a), $k > 2$ má menší celkovou délku y , ale velmi malý prostor pro uložení hydromotorů a ložisek do závěsu, proto jsem nakonec zvolil variantu ze situace a), $k = <1;2>$.

4 Celková délka spojení se může měnit podle uspořádání jednotlivých prvků (ložiska, hydromotory) na závěsu.

3 MKP analýza vybraných součástí PVK

3.1 Zatěžovací model

Firmou STS Prachatice byly zadány následující parametry (z důvodu výpočtu v základních jednotkách jsou milimetry převedeny na metry atd.):

hmotnost prázdného vozíku	$m_{PVK} = 2\ 000\ \text{kg}$
maximální hmotnost nákladu	$m_n = 4\ 500\ \text{kg}$
maximální celková hmotnost	$m_c = 6\ 500\ \text{kg}$
pozice těžiště prázdného PVK (T0)	0,628 m – vertikálně od vozovky 0,617 m – horizontálně před nápravou 0 m – od roviny symetrie
pozice těžiště prázdného PVK (T)	1,029 m – vertikálně od vozovky 0,329 m – horizontálně před nápravou 0 m – od roviny symetrie

Zatěžující stavy při maximálním zatížení:

- 1) Statické vertikální zatížení
- 2) Statické vertikální zatížení s posunutým těžištěm nákladu o 0,85 m dopředu a využití maximálně přípustného radiálního zatížení 1 500 kg (14 715 N)
- 3) Průjezd zatáčkou – $v = 40\ \text{km/h}$ (11,111 m/s), poloměr zatáčky $r = 35\ \text{m}$
- 4) Průjezd zatáčkou – $v = 40\ \text{km/h}$ (11,111 m/s), poloměr zatáčky $r = 25\ \text{m}$
- 5) Brzdění – zpomalení $a = 4,905\ \text{m/s}^2$
- 6) Jízda do kopce – $\gamma = 30^\circ$ (0,524 rad) stoupání
- 7) Jízda z kopce – $\gamma = 30^\circ$ (0,524 rad) klesání

Pro stav, který bude vyhodnocen jako nejtěžší, je potřeba zjistit napjatost a deformace i pro náklad ve formě cisterny na vodu (napáječky).

Parametry odečtené z objemového modelu poskytnutého firmou STS Prachatice (viz obr. 3.1.1 – 3.1.7.1) nebo jinak stanovené:

hmotnost kola	$m_k = 56,39\ \text{kg}$
hmotnost ramene zavěšení kola	$m_r = 110,88\ \text{kg}$
hmotnost odpružení kola	$m_p = 13,53\ \text{kg}$
hmotnost podlahy	$m_{pod} = 472,87\ \text{kg}$
dynamický poloměr kola	$r_{dyn} = 0,443\ \text{m}$
součinitel valivého odporu (bahnitý podklad)	$f = 0,2$



tíhové zrychlení

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

délkové rozměry

$$b = -0,102 \text{ m}^5$$

$$c = 0,540 \text{ m}$$

$$d = 0,095 \text{ m}$$

$$e = -0,050 \text{ m}^5$$

$$f1 = 0,089 \text{ m}$$

$$g1 = 0,000 4 \text{ m}$$

$$h = 0,347 \text{ m}$$

$$i = 0,000 4 \text{ m}$$

$$j = 0,173 \text{ m}$$

$$k1 = 0,000 2 \text{ m}$$

$$o = 3,453 \text{ m}$$

$$p = 0,333 \text{ m}$$

$$q = 3,903 \text{ m}$$

$$s = 3,276 \text{ m (pro náklad ve formě cisterny: } s = 3,097 \text{ m)}^6$$

$$t = 0,203 \text{ m (pro náklad ve formě cisterny: } t = 0,310 \text{ m)}^6$$

$$s1 = 3,358 \text{ m (pro náklad ve formě cisterny: } s1 = 3,236 \text{ m)}^6$$

$$t1 = 0,171 \text{ m (pro náklad ve formě cisterny: } t1 = 0,249 \text{ m)}^6$$

$$u = 2,185 \text{ m}$$

$$u^* = 2,486 \text{ m (vzdálenost osy nápravy od počátku souř. systému)}$$

$$w = 0,461 \text{ m}$$

$$z = 3,994 \text{ m}$$

Dopočtené parametry potřebné k určení reakcí pro zatěžující stavy:

- Výpočet ramena valivého odporu:

$$\xi = f \cdot r_{dyn} = 0,2 \cdot 0,443 = 0,089 \text{ m} \quad [31, \text{ str.60}] \quad (3.1.1)$$

- Výpočet pozice těžiště nákladu ve vodorovném směru:

- momentová rovnováha k počátku souř. systému objem. modelu:

$$l^* = \frac{m_c \cdot g \cdot (u^* - 0,329) - m_{PVK} \cdot g \cdot (u^* - 0,617)}{m_n \cdot g} \quad (3.1.2)$$

$$l^* = \frac{6\,500 \cdot (2,486 - 0,329) - 2000 \cdot (2,486 - 0,617)}{4\,500} = 2,285 \text{ m} \quad (3.1.3)$$

5 Vzdálenosti b , e mají opačný směr než ve schématech, to respektuje znaménko minus v odečtených rozměrech a zároveň v rovnicích mají momenty související s těmito vzdálenostmi opačný směr než dle schématu.

6 Vzhledem k tomu, že při dopravě cisterny dochází k odebrání podlahy pro kontejnery, dochází také ke změně souřadnic těžiště samotného vyvážedce.

- rozměr l po přičtení vzdálenosti mezi počátkem souř. sys. a koncem závěsu:

$$l = l^* + 1,507 = 2,285 + 1,507 = 3,792 \text{ m} \quad (3.1.4)$$

(pro náklad ve formě cisterny: $l = 3,803 \text{ m}$)⁴

- Výpočet pozice těžiště nákladu ve svislém směru:

- momentová rovnováha k počátku souř. systému objem. modelu:

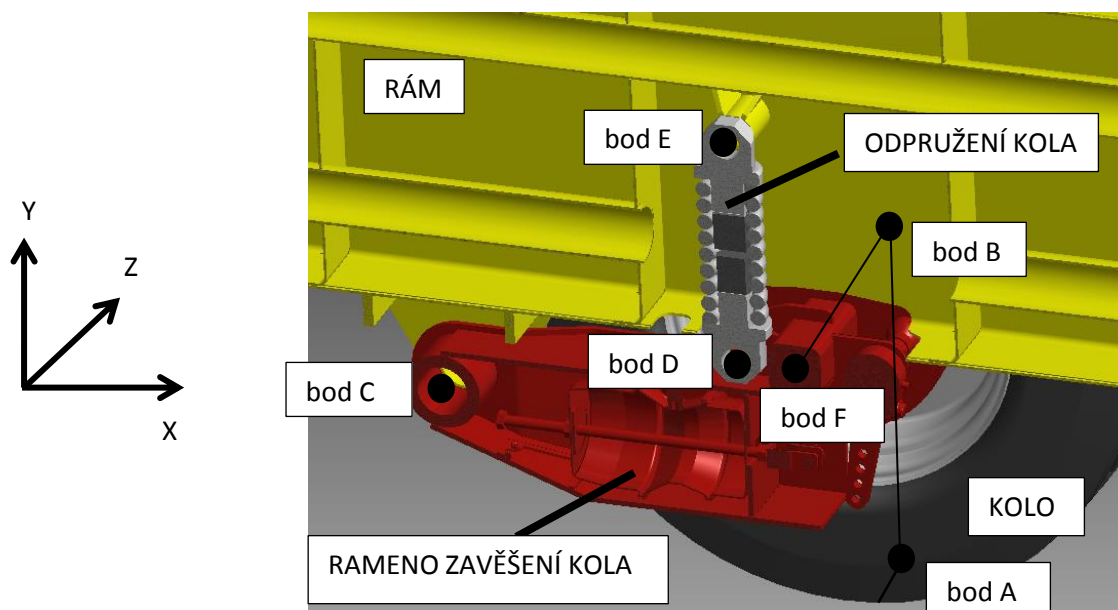
$$m^* = \frac{m_c \cdot a \cdot 1,029 - m_{PVK} \cdot a \cdot 0,628}{m_n \cdot a} \quad (3.1.5)$$

$$m^* = \frac{6\,500 \cdot 1,029 - 2\,000 \cdot 0,628}{4\,500} = 1,207 \text{ m} \quad (3.1.6)$$

- rozměr m po odečtení vzdálenosti mezi počátkem souř. sys. a koncem závěsu:

$$m = m^* - 0,461 = 1,207 - 0,461 = 0,746 \text{ m} \quad (3.1.7)$$

(pro náklad ve formě cisterny: $m = 0,906 \text{ m}$)⁴



obr. 3.1.1: Polonáprava se souřadnicovým systémem výpočtu

Zjednodušující aspekty zátěžového modelu:

- zanedbání vlivu: pružnosti pneumatiky, setrvačnosti výkyvného pohybu odpružení => odpružení je počítáno pouze v jednom okamžiku (nejvíce stlačené), čepového tření kloubových spojení
- zjednodušení: stejné tečné reakce působící na levou i pravou pneumatiku při průjezdu zatáčkou a směřující do středu oblouku (viz. rovnice 3.1.3.24)

3.1.1 Zatěžující stav 1 – statické vertikální zatížení

- Počet stupňů volnosti (DOF):

Protože, zde nepůsobí žádné boční síly, lze danou úlohu řešit jako rovinnou.

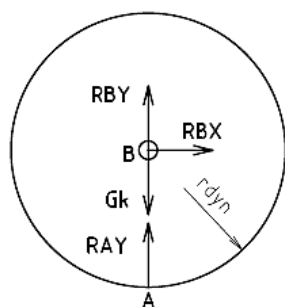
$$DOF = 3 \cdot (t - 1) - 2 \cdot rot - 1 \cdot o = 3 \cdot (5 - 1) - 2 \cdot 4 - 1 \cdot 1 = 3^\circ \quad (3.1.1.1)$$

,kde t - počet těles, r - počet rotačních vazeb a o - počet vazeb obecných.

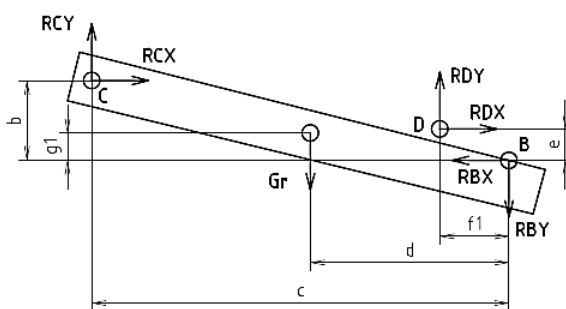
Úloha je symetrická, proto lze počítat pouze s polovinou vyvážedce tj. 5 těles (i s vozovkou), 4 rotační vazby v bodech B až E a 1 obecná vazba v bodě A . (viz obr. 3.1.1) Stupně volnosti odpovídají pojezdu, naklánění vyvážedce a možnému prokluzu kol, proto pro úplnou rovnováhu je potřeba spojit vyvážedce v předním závěsu s tažným členem a znemožnit prokluz kol. V případě statiky jsou však tečná reakce s vozovkou a akční síla pohybující s vyvážedcem ve směru jízdy nulové.

- Uvolnění součástí: (viz obr. 3.1.1.1)

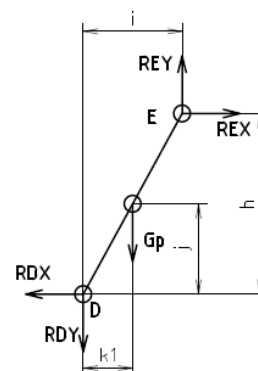
KOLO



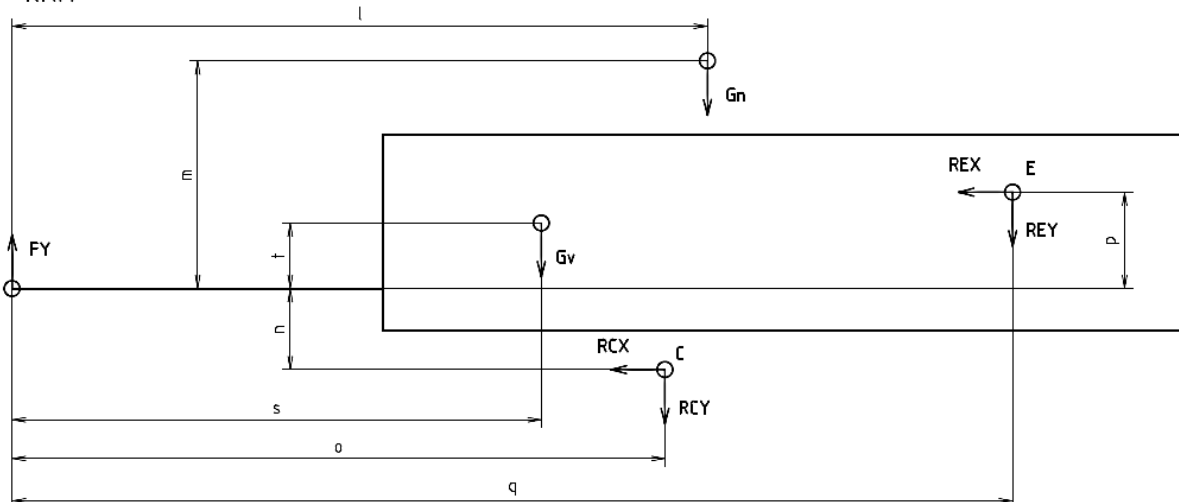
RAMENO ZAVĚŠENÍ KOLA



ODPRUŽENÍ KOLA



RÁM



obr. 3.1.1.1: Uvolnění jednotlivých částí pro stav 1 (bokorys)⁷

⁷ Označení tíhových sil je na obr. 3.1.1.1 pomocí písmena G , ale v rovnicích $m \cdot g$.

$$\text{Kolo:} \quad R_{BX} = 0 \quad (3.1.1.2)$$

$$R_{AY} + R_{BY} - m_k \cdot g = 0 \quad (3.1.1.3)$$

$$\text{Zavěšení:} \quad -R_{BX} + R_{DX} + R_{CX} = 0 \quad (3.1.1.4)$$

$$-R_{BY} - m_r \cdot g + R_{DY} + R_{CY} = 0 \quad (3.1.1.5)$$

$$-R_{CY} \cdot c + R_{CX} \cdot b + m_r \cdot g \cdot d - R_{DY} \cdot f_1 - R_{DX} \cdot g_1 = 0 \quad (3.1.1.6)$$

$$\text{Odpružení:} \quad -R_{DX} + R_{EX} = 0 \quad (3.1.1.7)$$

$$R_{EY} - m_p \cdot g - R_{DY} = 0 \quad (3.1.1.8)$$

$$-m_p \cdot g \cdot k_1 + R_{EY} \cdot i - R_{EX} \cdot h = 0 \quad (3.1.1.9)$$

$$\text{Rám:} \quad F_Y - m_n \cdot g - 2 \cdot R_{EY} - 2 \cdot R_{CY} - [m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot g = 0 \quad (3.1.1.10)$$

$$-m_n \cdot g \cdot l - 2 \cdot R_{CY} \cdot o - 2 \cdot R_{CX} \cdot n + 2 \cdot R_{EX} \cdot p - 2 \cdot R_{EY} \cdot q - [m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot g \cdot s = 0 \quad (3.1.1.11)$$

Dále výpočet pokračoval přepisem rovnic do maticového tvaru $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{B}$, kde \mathbf{A} je matice koeficientů neznámých veličin, \mathbf{x} je vektor neznámých veličin označených v rovnicích písmenem R a F (10 rovnic indikuje 10 neznámých) a \mathbf{B} je nenulový vektor známých veličin. Takto přepsanou soustavu lineárních rovnic jsem řešil pomocí programu Matlab.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.1.1: Reakce pro stav 1

R_{AY}	R_{BX}	R_{BY}	R_{CX}	R_{CY}
29 304 N	0 N	-28 750 N	40 N	5 766 N
R_{DX}	R_{DY}	R_{EX}	R_{EY}	F_Y
-40 N	-33 429 N	-40 N	-33 296 N	5 158 N

Z výsledků je patrné, že odpružení kola přenáší i malou sílu ve směru x (téměř kolmém na osu pružiny), kterou by měla pružina být schopna přenést.

Z visutého uložení kola (viz obr. 3.1.1) vyplývá moment, který zatěžuje rám v bodě C (dochází k rotaci okolo osy x) a je roven reakci v bodě B pronásobené vzdáleností $|BF|$. V tomto případě se moment rovná 8 050 Nm.

Zbývající zatěžovací stavy probíhají dle stejné osnovy řešení, proto dále uvedu jen rozdílné prvky výpočtu.

3.1.2 Zatěžující stav 2 – statické vertikální zatížení s posunutým těžištěm dopředu

Vzhledem k tomu, že stav 2 se od stavu 1 liší pouze posunutým těžištěm (tj. zmenšení hodnoty souřadnice l), uvedu jen tabulku s výsledky.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.1.2: Reakce pro stav 2

R_{AY}	R_{BX}	R_{BY}	R_{CX}	R_{CY}
24 525 N	0 N	-23 972 N	33 N	4 809 N
R_{DX}	R_{DY}	R_{EX}	R_{EY}	F_Y
-33 N	-27 694 N	-33 N	-27 561 N	14 715 N
moment v bodě C				
6 734,28 Nm				

3.1.3 Zatěžující stav 3 – průjezd zatáčkou s poloměrem 35 m, rychlostí 40 km/h

Zatěžující stavy 3 a 4 již nejsou z pohledu zatížení rovinné případy, protože na vyvážeč působí i boční síly. Z této skutečnosti také vyplývá to, že nelze řešit pouze polovinu stroje, jako to bylo v případech předešlých, jelikož velikosti sil a momentů budou odlišné na obou stranách vyvážeče.

- Počet stupňů volnosti (DOF):

Povaze prostorové úlohy se musí přizpůsobit i výpočet stupňů volnosti. Každá součást má v prostoru 6 dof. S tímto faktem souvisí i zvýšení počtu rovnic a neznámých, které je potřeba vyřešit. Proto také jsem zjednodušil řešený model a uvažoval rám, odpružení a rameno zavěšení jako jednu součást tj. celkem 4 součásti i s vozovkou. Geometrie uvolněného modelu díky tomuto doznala změny a to, změnu souřadnic těžiště celku vyvážeče z s, t na $s1, t1$. (viz obr. 3.1.3.1)

$$DOF = 6 \cdot (t - 1) - 3 \cdot val - 5 \cdot rot = 6 \cdot (4 - 1) - 3 \cdot 2 - 5 \cdot 2 = 2^\circ \quad (3.1.3.1)$$

2 rotační vazby jsou počítány v bodech B (levá strana ve směru jízdy) a v jeho protějšku $B1$ (pravá strana ve směru jízdy) a 2 valivé v bodech A a $A1$. 2 stupně volnosti odpovídají tomu, že vyvážeč se může naklápět a popojíždět.

- Uvolnění součástí: (viz obr. 3.1.3.1)

Dopočet potřebných parametrů:

- úhlová rychlost:

$$\Omega = \frac{v}{r} = \frac{11,1}{35} = 0,318 \text{ rad/s} \quad (3.1.3.2)$$

- rychlost vnějšího kola:

$$v_{vne} = \Omega \cdot \left(r + \frac{u}{2}\right) = 0,318 \cdot \left(35 + \frac{2,185}{2}\right) = 11,458 \text{ m/s} \quad (3.1.3.3)$$

- rychlost vnitřního kola:

$$v_{vni} = \Omega \cdot \left(r - \frac{u}{2}\right) = 0,318 \cdot \left(35 - \frac{2,185}{2}\right) = 10,764 \text{ m/s} \quad (3.1.3.4)$$

- odstředivá síla celku vyvážedce:

$$O_v = (m_{PVK} - 2 \cdot m_k) \cdot \frac{v^2}{r} = (2\,000 - 2 \cdot 256,39) \cdot \frac{11,1^2}{35} = 6\,656,9 \text{ N} \quad (3.1.3.4)$$

- odstředivá síla nákladu:

$$O_n = m_n \cdot \frac{v^2}{r} = 4\,500 \cdot \frac{11,1^2}{35} = 15\,873 \text{ N} \quad (3.1.3.5)$$

- odstředivá síla kol:

$$O_{k_vne} = m_k \cdot \frac{v_{vne}^2}{r + 0,5 \cdot u} = 56,39 \cdot \frac{11,458^2}{35 + 0,5 \cdot 2,185} = 205,115 \text{ N} \quad (3.1.3.6)$$

$$O_{k_vni} = m_k \cdot \frac{v_{vni}^2}{r - 0,5 \cdot u} = 56,39 \cdot \frac{10,764^2}{35 - 0,5 \cdot 2,185} = 192,698 \text{ N} \quad (3.1.3.7)$$

- úhel působení odstředivé síly nákladu (viz obr. 3.1.3.1):

$$\alpha_{On} = \arctg \frac{z - s1}{r} = \arctg \frac{3,994 - 3,358}{35} = 0,018 \text{ rad/s} \quad (3.1.3.8)$$

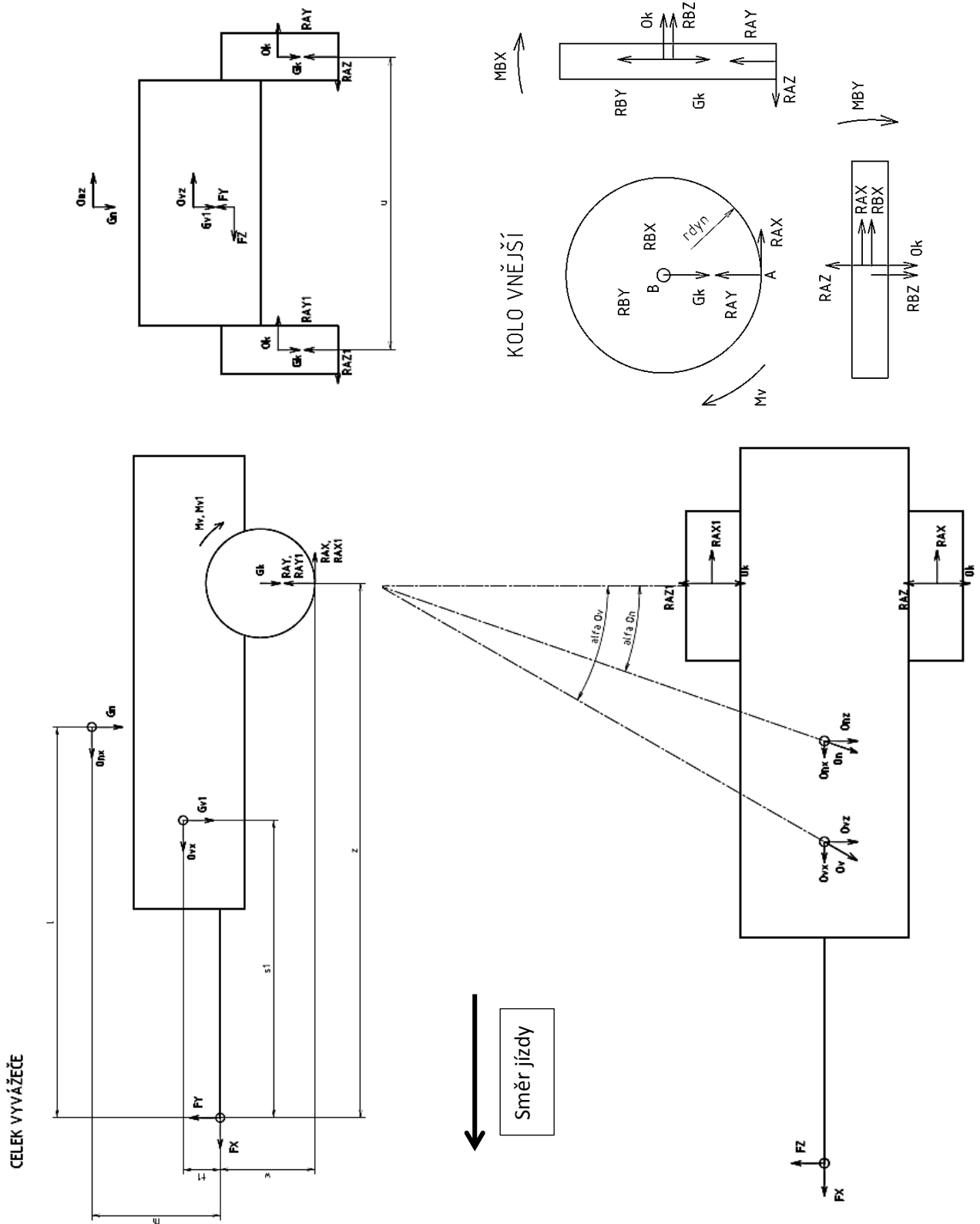
- odstředivá síla nákladu:

$$O_{nx} = O_n \cdot \sin(\alpha_{On}) = 15\,873 \cdot \sin(0,018) = 91,343 \text{ N} \quad (3.1.3.9)$$

$$O_{nz} = O_n \cdot \cos(\alpha_{On}) = 15\,873 \cdot \cos(0,018) = 15\,873 \text{ N} \quad (3.1.3.10)$$

- odstředivá síla vyvážedce (obdoba ods. síly nákladu, proto jen výsledky):

$$\alpha_{Ov} = 0,018 \text{ rad/s} \quad O_{vx} = 120,834 \text{ N} \quad O_{vz} = 6\,655,8 \text{ N} \quad (3.1.3.11)$$



obr. 3.1.3.1: Uvolnění jednotlivých částí pro stav 3 (sružené pohledy)

Jak už bylo naznačeno dříve, reakce s indexem 1 se týkají veličin pravé strany (vnitřní bok vyvážedce z pohledu průjezdu zatáčkou) ve směru jízdy dopředu a veličiny bez číselného indexu označují stranu levou (vnější z pohledu průjezdu zatáčkou).

$$\text{Levé (vnější) kolo:} \quad R_{AX} + R_{BX} = 0 \quad (3.1.3.12)$$

$$R_{AY} + R_{BY} - m_k \cdot g = 0 \quad (3.1.3.13)$$

$$-R_{AZ} + R_{BZ} + O_{k_{vne}} = 0 \quad (3.1.3.14)$$

$$-M_{BX} - R_{AZ} \cdot r_{dyn} = 0 \quad (3.1.3.15)$$

$$-M_{BY} = 0 \quad (3.1.3.16)$$

$$-R_{AY} \cdot \xi + R_{AX} \cdot r_{dyn} = 0 \quad (3.1.3.17)$$

Pravé (vnitřní) kolo: rovnice shodné s levým kolem pouze s indexem 1

$$\text{Celek rámu:} \quad -F_X - O_{vx} - O_{nx} + R_{AX} + R_{AX1} = 0 \quad (3.1.3.18)$$

$$F_Y + m_n \cdot g - (m_{PVK} - 2 \cdot m_k) \cdot g + R_{AY} + R_{AY1} = 0 \quad (3.1.3.19)$$

$$O_{nz} + O_{vz} - F_Z - R_{AZ} - R_{AZ1} + O_{k_{vne}} + O_{k_{vni}} = 0 \quad (3.1.3.20)$$

$$(O_{k_{vne}} + O_{k_{vni}}) \cdot (w - r_{dyn}) - O_{nz} \cdot m - O_{vz} \cdot t1 - R_{AZ} \cdot w - R_{AZ1} \cdot w - \quad (3.1.3.21)$$

$$-R_{AY} \cdot 0,5 \cdot u - R_{AY1} \cdot 0,5 \cdot u - m_k \cdot g \cdot 0,5 \cdot u + m_k \cdot g \cdot 0,5 \cdot u = 0$$

$$-O_{vz} \cdot s1 - O_{nz} \cdot l - R_{AZ} \cdot z - R_{AZ1} \cdot z + R_{AX} \cdot 0,5 \cdot u + R_{AX1} \cdot 0,5 \cdot u - \quad (3.1.3.22)$$

$$-(O_{k_{vne}} + O_{k_{vni}}) \cdot z = 0$$

$$O_{vx} \cdot t1 + O_{nx} \cdot m - m_n \cdot g \cdot l - (m_{PVK} - 2 \cdot m_k) \cdot g \cdot s1 + R_{AY} \cdot z + R_{AY1} \cdot z \quad (3.1.3.23)$$

$$-R_{AY} \cdot \xi - R_{AY1} \cdot \xi + R_{AX} \cdot w + R_{AX1} \cdot w - m_k \cdot g \cdot z = 0$$

$$R_{AZ} = R_{AZ1} \quad (3.1.3.24)$$

19 lineárních rovnic znamená 19 neznámých.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.3.1: Reakce pro stav 3

R_{AX}	R_{AY}	R_{AZ}	R_{BX}	R_{BY}	R_{BZ}
7 882 N	39 408 N	9 978 N	-7 882 N	-38 855 N	9 773
M_{BX}	M_{BY}	R_{AX1}	R_{AY1}	R_{AZ1}	R_{BX1}
-4 424 Nm	0 Nm	3 822 N	19 109 N	9 978 N	-3 822 N
R_{BY1}	R_{BZ1}	M_{BX1}	M_{BY1}	F_X	F_Y
-18 556 N	9 785 N	-4 424 N	0 Nm	11 491 N	5 247 N
F_Z	2 970 N				

3.1.4 Zatěžující stav 4 – průjezd zatáčkou s poloměrem 25 m, rychlostí 40 km/h

Stav 4 je totožný se stavem 3 pouze se změnou poloměru zatáčky. Opět uvedu jen výsledky.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.4.1: Reakce pro stav 4

R_{AX}	R_{AY}	R_{AZ}	R_{BX}	R_{BY}	R_{BZ}
8 691 N	43 437 N	13 968 N	-8 691 N	-42 904 N	13 678 N
M_{BX}	M_{BY}	R_{AX1}	R_{AY1}	R_{AZ1}	R_{BX1}
-6 193 Nm	0 Nm	3 008 N	15 039 N	13 968 N	-3 008 N
R_{BY1}	R_{BZ1}	M_{BX1}	M_{BY1}	F_X	F_Y
-14 486 N	13 702 N	-6 193 Nm	0 Nm	11 283 N	5 269 N
F_Z	4 158 N				

3.1.5 Zatěžující stav 4 – průjezd zatáčkou s poloměrem 25 m, rychlostí 40 km/h, s cisternou na vodu

Vzhledem k náročnosti výpočtu bylo stanoveno, že zatížení cisternou bude prozkoumáno pouze pro nejnáročnější stav, kterým se podle analýzy MKP (viz dále) ukázal stav 4. Změna oproti výpočtu třetího stavu byla opět jen v zadávajících parametrech jako poloměr zatáčky, hmotnost a pozice těžiště PVK a nákladu.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.5.1: Reakce pro stav 4 - cisterna

R_{AX}	R_{AY}	R_{AZ}	R_{BX}	R_{BY}	R_{BZ}
7 553 N	37 764 N	11 315 N	-7 553 N	-37 211 N	11 024 N
M_{BX}	M_{BY}	R_{AX1}	R_{AY1}	R_{AZ1}	R_{BX1}
-5 017 N	0 Nm	2 022 N	10 112 N	11 315 N	-2 022 N
R_{BY1}	R_{BZ1}	M_{BX1}	M_{BY1}	F_X	F_Y
-9 559 N	11 049 N	-5 017 Nm	0 Nm	9 217 N	4 543 N
F_Z	3 753 N				

3.1.6 Zatěžující stav 5 – brzdění se zpomalením $a = 4,905 \text{ m/s}^2$

- Počet stupňů volnosti (DOF):

Jako v případě zatěžujících stavů 1 a 2 je tento případ rovinný a symetrický.

$$DOF = 3 \cdot (t - 1) - 2 \cdot (rot + val) = 3 \cdot (5 - 1) - 2 \cdot (4 + 1) = 2^\circ \quad (3.1.6.1)$$

opět se jedná o 5 těles, 4 rotační vazby v bodech B až E a obecnou vazbu v bodě A vystřídala vazba valivá. 2 dof se dají vysvětlit jako naklánění a pojezd vozíku.

- Uvolnění součástí: (viz obr. 3.1.6.1)

Dopočet potřebných parametrů:

- moment setrvačnosti kola:

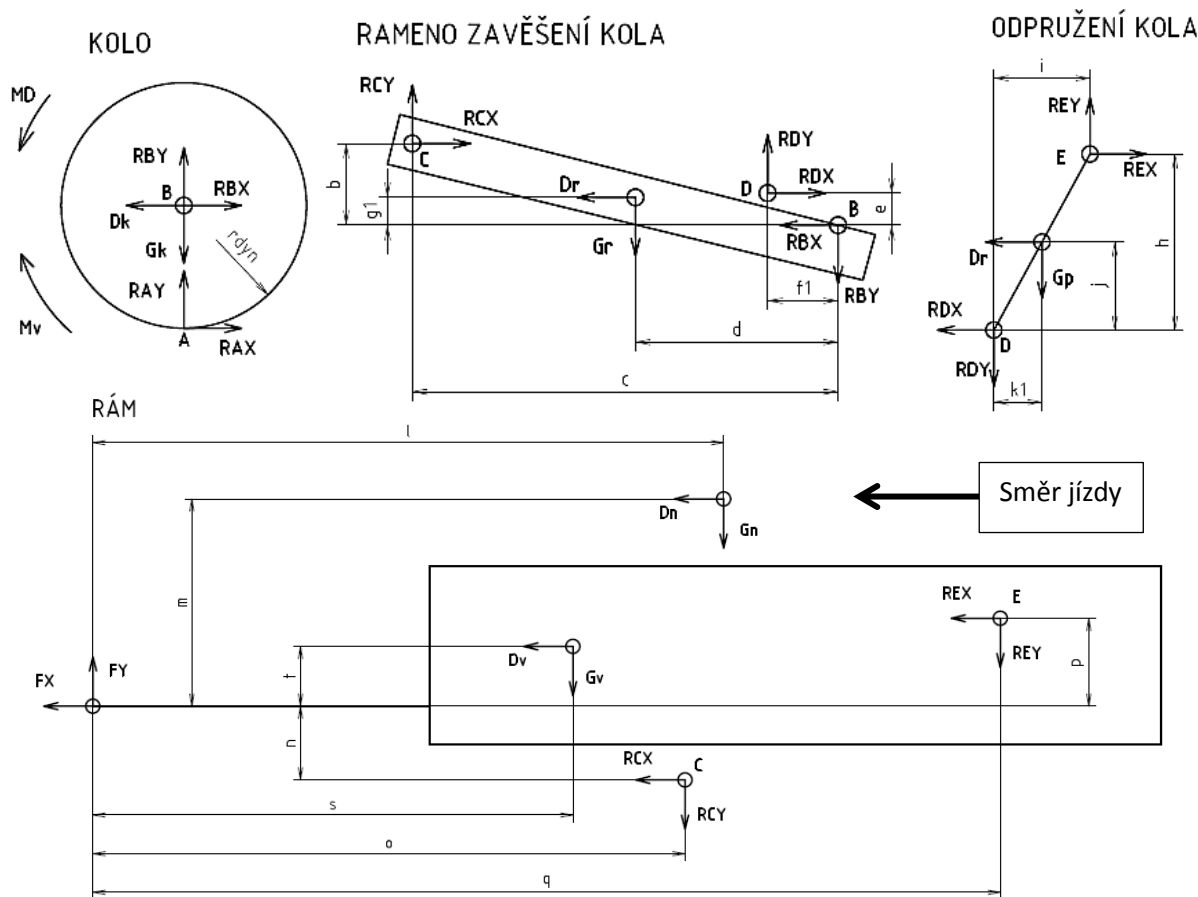
$$I_k = 0,5 \cdot m_k \cdot r_{dyn}^2 = 0,5 \cdot 56,39 \cdot 0,443^2 = 5,543 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.1.6.2)$$

- úhlové zrychlení kola:

$$\varphi = \frac{a}{r_{dyn}} = \frac{4,905}{0,443} = 11,063 \text{ rad/s}^2 \quad (3.1.6.3)$$

- dynamický moment kola:

$$M_D = I_k \cdot \varphi = 5,543 \cdot 11,063 = 61,318 \text{ Nm} \quad (3.1.6.4)$$



obr. 3.1.6.1: Uvolnění jednotlivých částí pro stav 5 (bocorsy)⁸

$$\text{Kolo:} \quad R_{AX} + R_{BX} - m_k \cdot a = 0 \quad (3.1.6.5)$$

$$R_{AY} + R_{BY} - m_k \cdot g = 0 \quad (3.1.6.6)$$

$$-R_{AY} \cdot \xi + R_{AX} \cdot r_{dyn} + M_D = 0 \quad (3.1.6.7)$$

$$\text{Zavěšení:} \quad -R_{BX} + R_{DX} + R_{CX} - m_r \cdot a = 0 \quad (3.1.6.8)$$

$$-R_{BY} - m_r \cdot g + R_{DY} + R_{CY} = 0 \quad (3.1.6.9)$$

$$-R_{CY} \cdot c + R_{CX} \cdot b + m_r \cdot g \cdot d - R_{DY} \cdot f_1 - R_{DX} \cdot g_1 - m_r \cdot a \cdot e = 0 \quad (3.1.6.10)$$

$$\text{Odpružení:} \quad -R_{DX} + R_{EX} - m_p \cdot a = 0 \quad (3.1.6.11)$$

$$R_{EY} - m_p \cdot g - R_{DY} = 0 \quad (3.1.6.12)$$

$$-m_p \cdot g \cdot k_1 + R_{EY} \cdot i - R_{EX} \cdot h + m_p \cdot a \cdot j = 0 \quad (3.1.6.13)$$

$$\text{Rám:} \quad -F_X - 2 \cdot R_{CX} - 2 \cdot R_{EX} - [m_n + m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot a = 0 \quad (3.1.6.14)$$

$$F_Y - 2 \cdot R_{EY} - 2 \cdot R_{CY} - [m_n + m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot g = 0 \quad (3.1.6.15)$$

$$m_n \cdot (a \cdot m - g \cdot l) - 2 \cdot R_{CY} \cdot o - 2 \cdot R_{CX} \cdot n + 2 \cdot R_{EX} \cdot p - 2 \cdot R_{EY} \cdot q + [m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot (a \cdot t - g \cdot s) = 0 \quad (3.1.6.16)$$

12 rovnic signalizuje 12 neznámých.

- Výsledky reakcí:

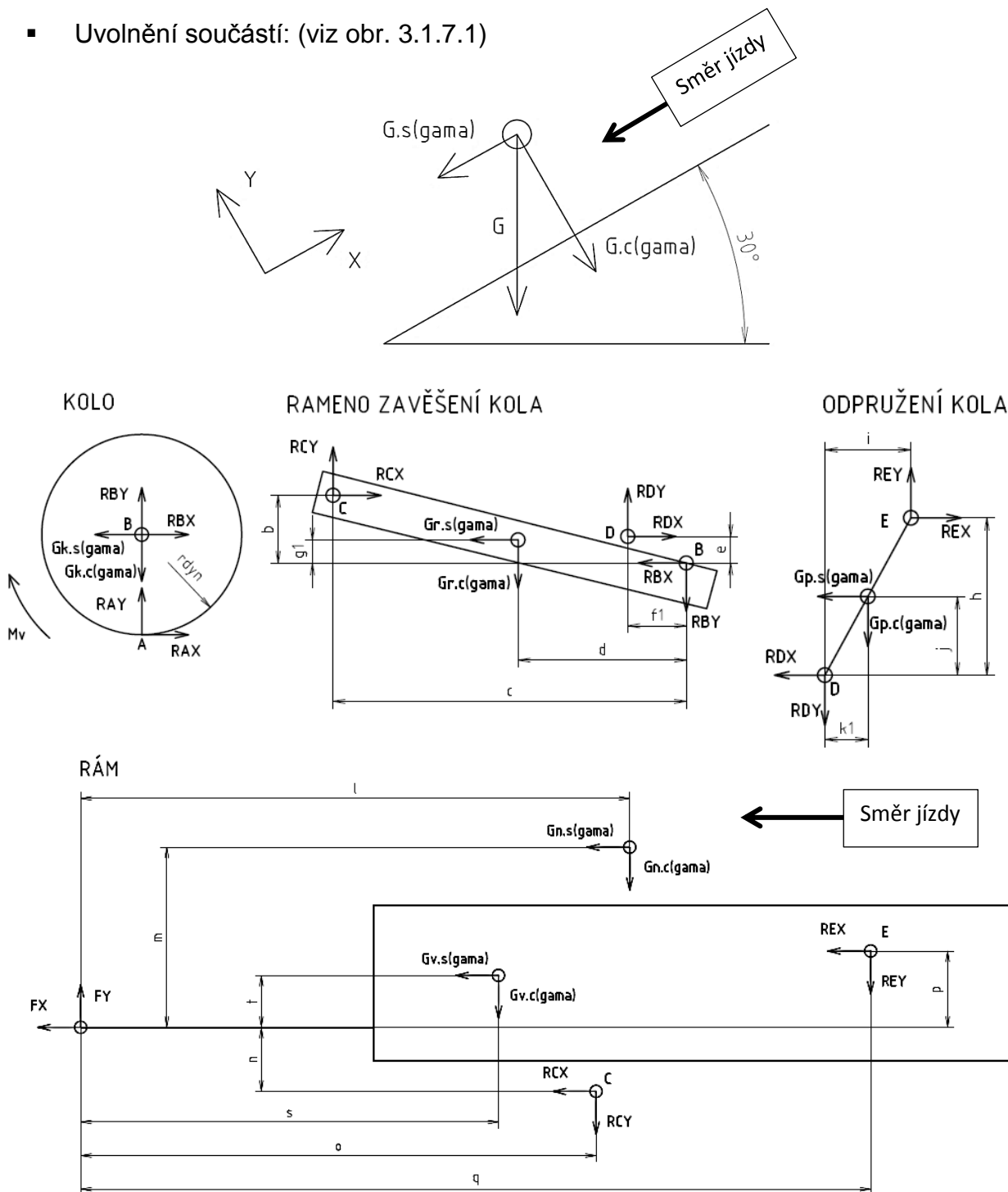
tab. 3.1.6.1: Reakce pro stav 5

R_{AX}	R_{AY}	R_{BX}	R_{BY}	R_{CX}	R_{CY}
5 267 N	27 025 N	-4 990 N	-26 472 N	-4 378 N	4 249 N
R_{DX}	R_{DY}	R_{EX}	R_{EY}	F_X	F_Y
-69 N	-29 633 N	-2 N	-29 500 N	-21 349 N	9 716 N
moment M_x v bodě C		moment M_y v bodě C			
7 412 Nm		-1 397,2 Nm			

8 Dynamické síly jsou ve schématu označeny písmenem D zatímco v rovnicích $m \cdot a$.

3.1.7 Zatěžující stav 6 – jízda z kopce se 30° klesáním

- Počet stupňů volnosti (DOF):
Pro stav 6 a 7 platí ta samá pravidla jako u stavu 5, tj. úlohy mají 2 dof.
- Uvolnění součástí: (viz obr. 3.1.7.1)



obr. 3.1.7.1: Uvolnění jednotlivých částí pro stav 6 (bokorys)

$$\text{Kolo:} \quad R_{AX} + R_{BX} - m_k \cdot g \cdot \sin \gamma = 0 \quad (3.1.7.1)$$

$$R_{AY} + R_{BY} - m_k \cdot g \cdot \cos \gamma = 0 \quad (3.1.7.2)$$

$$-R_{AY} \cdot \xi + R_{AX} \cdot r_{dyn} = 0 \quad (3.1.7.3)$$

$$\text{Zavěšení:} \quad -R_{BX} + R_{DX} + R_{CX} - m_r \cdot g \cdot \sin \gamma = 0 \quad (3.1.7.4)$$

$$-R_{BY} - m_r \cdot g \cdot \cos \gamma + R_{DY} + R_{CY} = 0 \quad (3.1.7.5)$$

$$-R_{CY} \cdot c + R_{CX} \cdot b + m_r \cdot g \cdot \cos \gamma \cdot d - R_{DY} \cdot f_1 - R_{DX} \cdot g_1 - m_r \cdot g \cdot \sin \gamma \cdot e = 0 \quad (3.1.7.6)$$

$$\text{Odpružení:} \quad -R_{DX} + R_{EX} - m_p \cdot g \cdot \sin \gamma = 0 \quad (3.1.7.7)$$

$$R_{EY} - m_p \cdot g \cdot \cos \gamma - R_{DY} = 0 \quad (3.1.7.8)$$

$$-m_p \cdot g \cdot \cos \gamma \cdot k_1 + R_{EY} \cdot i - R_{EX} \cdot h + m_p \cdot a \cdot \sin \gamma \cdot j = 0 \quad (3.1.7.9)$$

$$\text{Rám:} \quad -F_X - 2 \cdot R_{CX} - 2 \cdot R_{EX} - [m_n + m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot g \cdot \sin \gamma = 0 \quad (3.1.7.10)$$

$$F_Y - 2 \cdot R_{EY} - 2 \cdot R_{CY} - [m_n + m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot g \cdot \cos \gamma = 0 \quad (3.1.7.11)$$

$$m_n \cdot g (\sin \gamma \cdot m - \cos \gamma \cdot l) - 2 \cdot R_{CY} \cdot o - 2 \cdot R_{CX} \cdot n + 2 \cdot R_{EX} \cdot p - 2 \cdot R_{EY} \cdot q + [m_{PVK} - 2 \cdot (m_k + m_r + m_p)] \cdot (\sin \gamma \cdot t - \cos \gamma \cdot s) \cdot g = 0 \quad (3.1.7.12)$$

Opět úloha má 12 neznámých.

- Výsledky reakcí:

tab. 3.1.7.1: Reakce pro stav 6

R_{AX}	R_{AY}	R_{BX}	R_{BY}	R_{CX}	R_{CY}
4 620 N	23 101 N	-4 344 N	-22 622 N	-3 736 N	3 624 N
R_{DX}	R_{DY}	R_{EX}	R_{EY}	F_X	F_Y
-63 N	-25 304 N	3 N	-25 189 N	-22 642 N	9 020 N
moment M_x v bodě C		moment M_y v bodě C			
6 334,16 Nm		-1 216,32 Nm			

3.1.8 Zatěžující stav 7 – jízda z kopce se 30° stoupáním

Rozdíl mezi 7 a 6 stavem je následující. Protože složka tíhové síly $G.\sin\alpha$ působí proti směru pohybu (díky jízdě do kopce), změní se v rovnicích rovnováhy znaménko na opačné právě u sil a momentů souvisejících s x -sovou složkou tíhy ($G.\sin\alpha$).

- Výsledky reakcí:

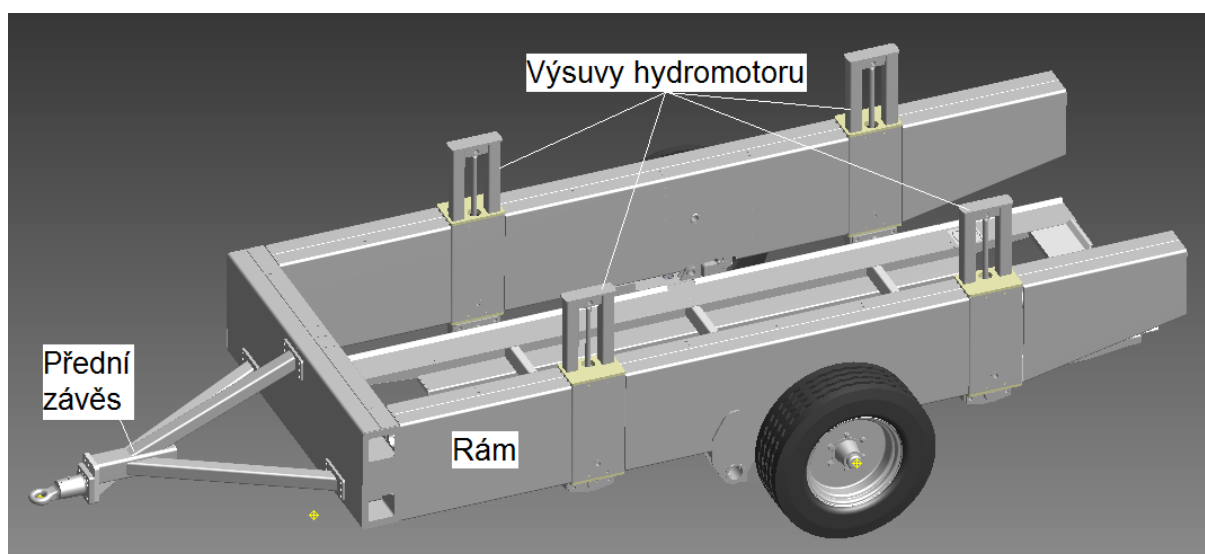
tab. 3.1.8.1: Reakce pro stav 7

R_{AX}	R_{AY}	R_{BX}	R_{BY}	R_{CX}	R_{CY}
5 523 N	27 615 N	-5 800 N	-27 136 N	-6 340 N	4 056 N
R_{DX}	R_{DY}	R_{EX}	R_{EY}	F_X	F_Y
-3 N	-30 250 N	-69 N	-30 135 N	42 929 N	-8 N
moment M_x v bodě C		moment M_y v bodě C			
7 598,08 Nm		-1 624 Nm			

V původních podmínkách firmy STS Prachatice byl i fakt minimálního zatížení předního závěsu, které činilo 300 kg neboli 2 943 N v radiálním směru. Tato podmínka při tomto stavu není dodržena, jak je vidět z výsledné síly F_Y , která je nejen nedostatečná, ale má i opačný směr působení tzn. směr vzhůru.

3.2 Tvorba MKP modelu

Objemový model od firmy STS Prachatice neobsahoval svary, to znamená, že chyběly kontakty mezi jednotlivými částmi rámu. Proto jsem tyto kontakty doplnil v programu Autodesk Inventor 2014 a uložil jednotlivé součásti do souboru STEP. Samotný MKP model jsem pak již tvořil ve vývojovém prostředí programu Abaqus 6.14. Pro analýzu byly určeny následující součásti: přední závěs, výsuv hydraulického motoru a rám (obr. 3.2.1).



obr. 3.2.1: Součásti určené pro MKP výpočet [1]

3.2.1 Part

Vzhledem k tomu, že součásti byly tvarově složité, využil jsem importování souborů typu STEP. V nastavení importace jsem zachoval původní měřítko modelu, 3D typ součásti a její deformovatelnost. Dále jsem využil možnosti zkombinování do jednoho partu při zachování možnosti dělicích rovin, která mi následně usnadnila „nařezání“ modelu a vytvoření tak lepší sítě. Pro usnadnění výpočtu u zatěžovacích stavů 1,2,5,6 a 7 (tj. stavů, kde zatížení i geometrie modelů byly symetrické) jsem použil jen polovinu objemového modelu a příslušnou okrajovou podmínku symetrie.

3.2.2 Property

V materiálových vlastnostech jsem přiřadil atributy jednotlivým součástem. Atributy byly dány použitým materiálem určeným z objemového modelu. Pro ocel (materiály S355 a Strenx700) jsem volil modelu pružnosti $2-2,1 \cdot 10^5$ MPa, Pissonova konstanta 0,3 a hustota $7,8 \cdot 10^{-9}$ t/mm³.

3.2.3 Assembly

Při vkládání modelů do assembly se nejvhodnější možností ukázala volba, síť závislá na součásti. Dále pak jsem zde skládal jednotlivé součásti dohromady jako například u rámu, kde bylo potřeba doplnit spojovací součásti pro adekvátní chování modelu.

3.2.4 Step

Podmínky výpočetní úlohy jsem vždy nastavil jako statické a z důvodu předpokládaných malých deformací i zkrácení výpočetního času jsem zaškrtnul lineární úlohu. Dále jsem pak určil velikost počátečního kroku, maximální a minimální hodnotu inkrementu, tyto veličiny se lišily podle složitosti úlohy (např. maximální inkrement pro přední závěs byl větší než u rámu).

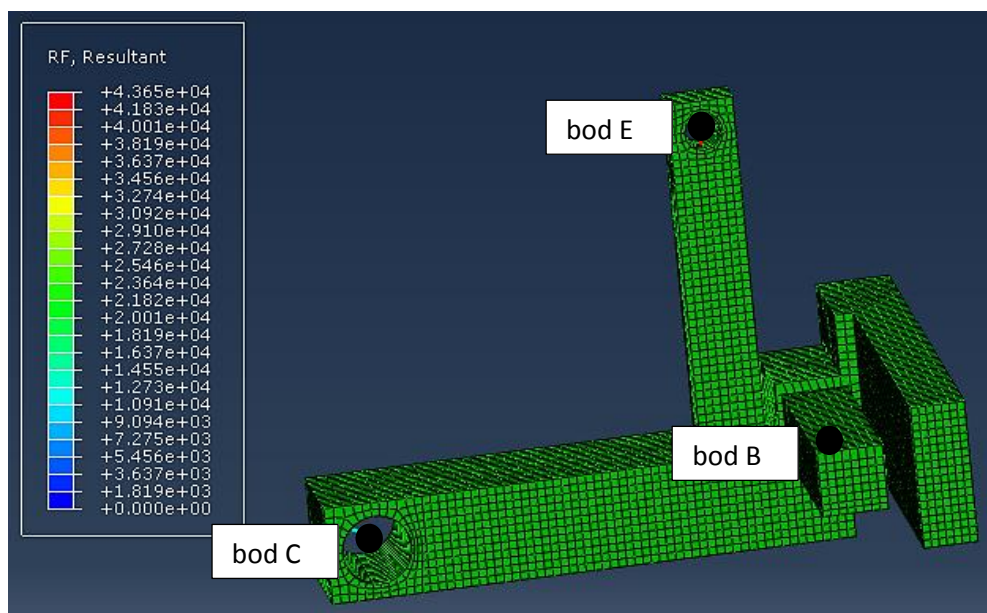
3.2.5 Interaction

Vazby, které jsem použil pro spojení jednotlivých entit (např. bod - plocha) nebo jednotlivých těles (např. čep – rám), byly:

- kontakt – simulace normálového dotyku a smykového tření
 - využil jsem ho v případech, kdy nešlo dvě součásti natvrdo spojit, např. interakce mezi výsuvem hydromotoru a opěrným členem
- TIE kontakt – náhrada lepení popř. svařování (dvě součásti jsou nehybně spojeny), např. výsuv – čep podlahy nákladu
- Coupling kinematic/distributing – vazba pro spojení nejčastěji zavazbeného bodu s plochou a zjištění tak reakcí v tomto bodě
 - přesný typ vazby jsem aplikoval dle charakteru spojení, pokud se jednalo o spoj, kde bod i plocha mají svázané posuvy => kinematika (reakce v připojovacích deskách závěsu k rámu), v opačném případě distribuce (dovoluje určitou kinematickou volnost a s tím související deformaci plochy vůči bodu)

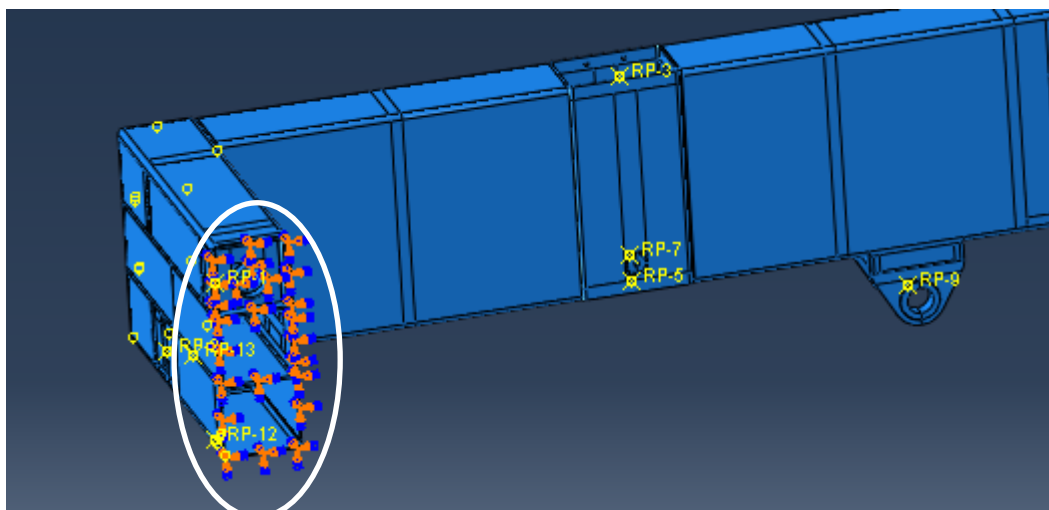
3.2.6 Load

Model je zatížen základními typy zatížení a to koncentrovanou silou, momentem a gravitací v mm/s^2 . U zatěžujících stavů 3 a 4, z důvodu složitosti analytického řešení (velký počet rovnic a neznámých, dále několikrát staticky neurčitá soustava), nebylo možné zjistit síly a momenty působící přímo na rám v místě připojení polonápravy (bod C) a odpružení (bod E). Protože pole napětí a deformací v případě polonápravy není předmětem zkoumání, vytvořil jsem zjednodušený model ramena a odpružení kola. Zjednodušený model měl stejné připojovací rozměry (umístění bodů C, E), hmotnost a pozici těžiště jako původní komponenty. Pak už jsem jen geometrii převedl do Abaqusu, zatížil reakcemi v místě B a pomocí MKP výpočtu zjistil reakce v bodech C, E. (viz obr. 3.2.6.1)

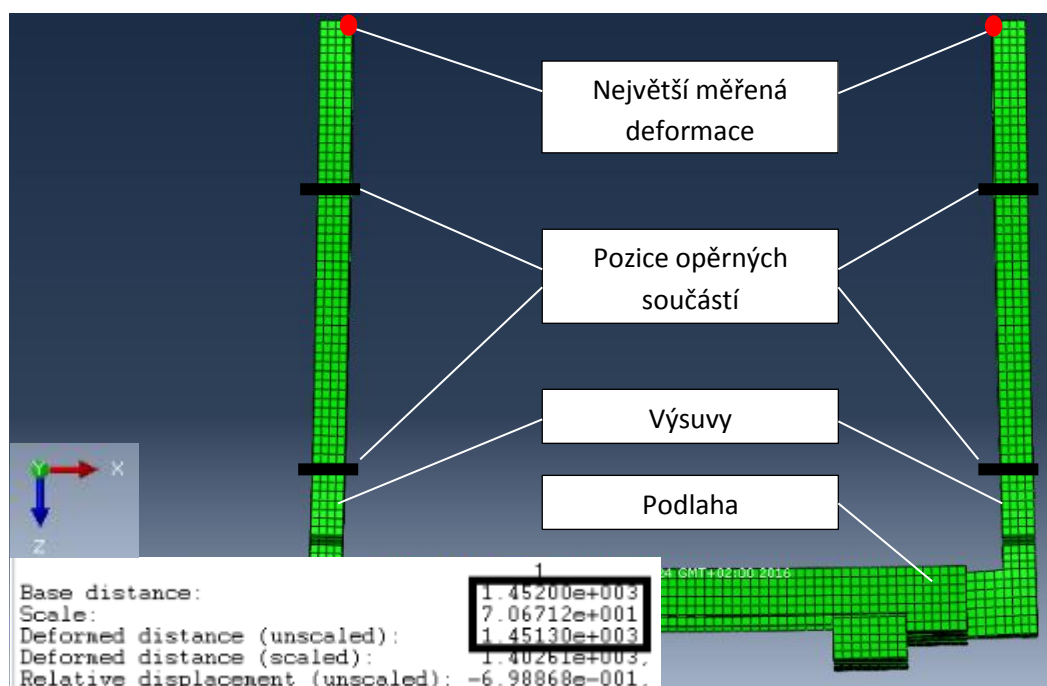


obr. 3.2.6.1: Zjednodušený model levé části polonápravy pro stav 3

Okrajové podmínky u jednotlivých součástí byly různé. V případě předního závěsu jsem zamezil rotaci i posuvy v dosedacích plochách k rámu, což je náhrada pevného šroubového spojení. U samotného rámu je okrajovou podmínkou vetknutí prostředku předního modulu. (viz obr. 3.2.6.2) Došlo tak k vyztužení předního modulu, což by na jeho deformaci a napětí nemělo mít takový vliv, protože ve skutečnosti je k němu připojen přední závěs, který ho právě zpevňuje. Situace u výsuvů byla podstatně složitější, protože bylo třeba určit při jakém zatěžujícím stavu a v jakém místě se dotkne tělo výsuvu o opěrné části. Tuto skutečnost jsem určil opět s dopomocí zjednodušených modelů výsuvů a podlahy, které měly stejné rozměry jako originální geometrie. (viz obr. 3.2.6.3)



obr. 3.2.6.2: Okrajová podmínka rámu pro zatěžovací stav 2



obr. 3.2.6.3: Zjednodušený model výsuvů a podlahy pro stav 5 – deformace nedosáhla limitu 1 mm, který je dán objemovým modelem (mezera mezi výsuvem a opěrnou plastovou částí)
=> výsuvy se nedotknou opěrných součástí ve směru x (směr kolmý na směr jízdy)

3.2.7 Mesh

Tělesa jsem vysítval pomocí šestistěnnů nebo s převahou šestistěnnů. Pouze u tvarově velmi složitých částí jsem ponechal čtyřstěn. Křivku mezi body (vrcholy elementu) jsem stanovil jako lineární, opět kvůli urychlení výpočtu a snadnější optimalizaci. Dále jsem se snažil řídit nepsaným pravidlem alespoň 2-3 elementy na tloušťku a u kruhových součástí 5 elementů na 90°.

3.3 Výsledky MKP analýzy

3.3.1 Přední závěs

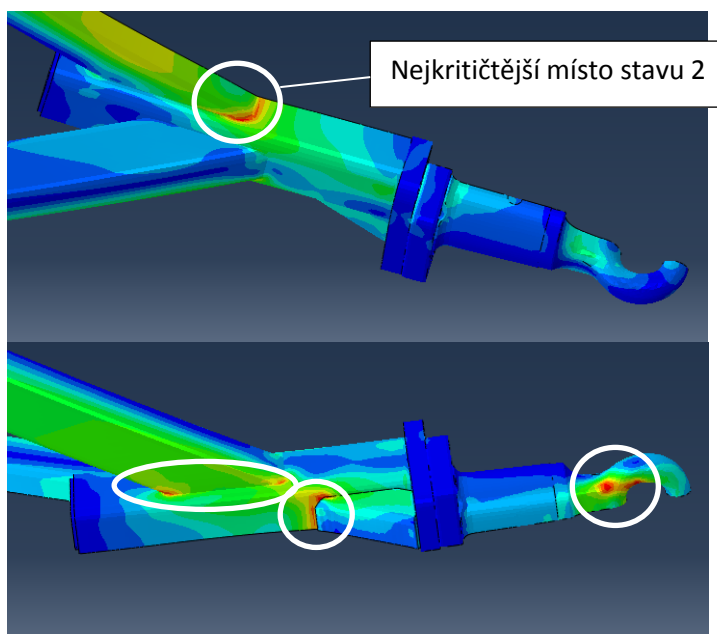
Pro stanovení hodnoty napětí jsem určil pevnostní metodu dle Tresca, abych byl na straně bezpečnosti. Pokud shrnu rozložení napěťového pole pro všechny zatěžující stavy, tak kritická místa se nachází ve spojení svařovaných profilů a na v některých případech i na připojovacím oku. (viz obr. 3.3.1.1) Nejvyšší vykazovaná hodnota napětí je při zatěžovacím stavu 4 a má hodnotu 224,3 MPa. Při bližším pohledu na model, ale je vidět, že se jedná o špičku a napětí v okolí výrazně klesá k hodnotám přibližně 80 MPa. (viz tab. 3.3.1.1) Vzhledem k tomuto faktu se nakonec ukázal být pro přední závěs nejtěžším stavem stav 2 (nejzatíženější místo ve svaru spojujícím střední a horní profil viz obr. 3.3.1.1 nahoře), kdy právě na přední závěs je přesunuto velké zatížení z důvodu přesunutí těžiště nákladu dopředu. Zbytek tělesa je pak namáhán napětím v řádech jednotek MPa.

V místě připojovacích desek k rámu rozložení napětí nemusí odpovídat realitě, protože zde nebyl použit typ zatížení *bolt*, které zhoršovalo stabilitu výpočtu a zároveň pro adekvátní rozložení napětí by se musela síť v okolí inkriminovaných míst velmi zjemnit (zvýšení výpočtového času). Napětí na zbylé části závěsu je však odpovídající.

Tvary deformace závěsů při jednotlivých zatěžujících stavech odpovídají směřům působící zátěže. Nejsložitější deformace je při zatáčce, kdy připojovací oko se nejen zvedá jako při ostatních stavech, ale i vychyluje do strany. Maximální výchylka je pak při stavu 7 o hodnotě 2,04 mm. (viz tab. 3.3.1.1)

tab. 3.3.1.1: Výsledky MKP pro závěs

	stav 1	stav 2	stav 3	stav 4	stav 4 cisterna	stav 5	stav 6	stav 7
napětí [MPa]	45,2	132,9	76,1 (209,1)	80,0 (224,3)	72,2 (192,1)	51,4	47,7	95,1
deformace [mm]	0,98	2,88	1,59	1,64	1,37	0,86	0,66	2,04



obr. 3.3.1.1: Kritická místa předního závěsu – pohled shora (nahore)
pohled zespoda (dole)

3.3.2 Výsuv hydromotoru

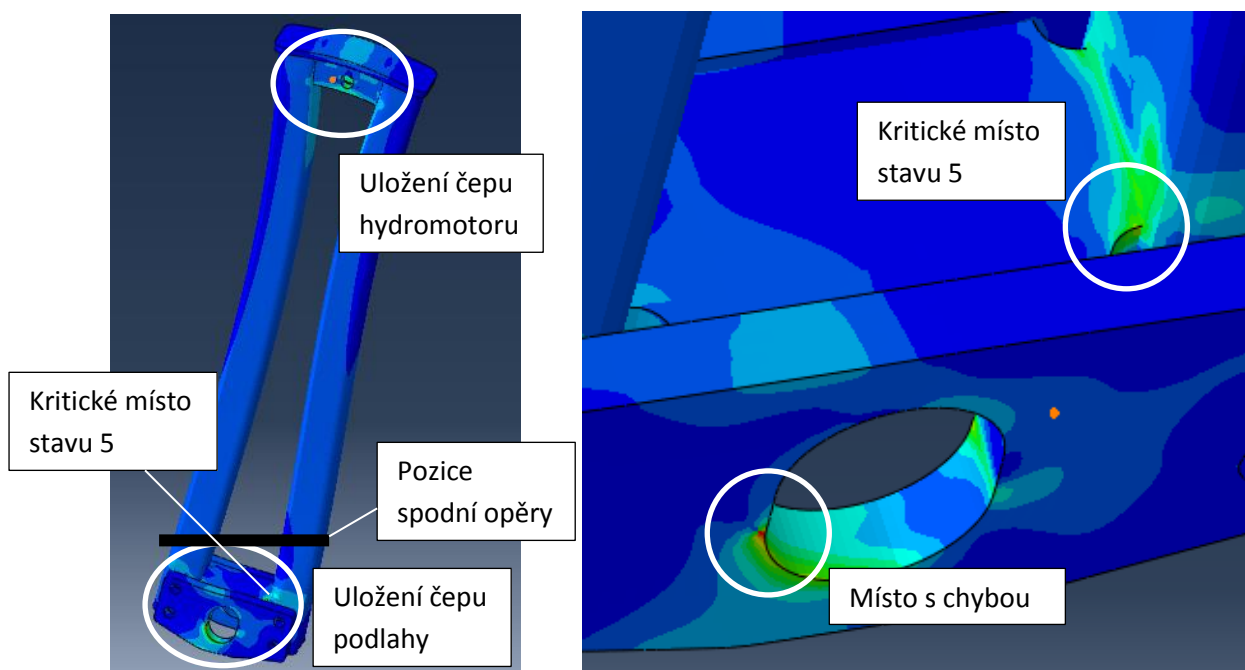
Oblasti s vyšší hodnotou napětí mají pro všechny zatěžující stavy obdobné rozmístění. Jedná se o uložení spodního čepu (čep spojený s podlahou) a horního čepu (čep spojený s hydromotorem) a jejich přilehlých částí. (viz obr. 3.3.2.1 vlevo) Nejkritičtější úloha se zdá být zatěžující stav 4 s hodnotou 92,7 MPa (dle Tresca) na díře spodního čepu. Takto vysokou hodnotu zřejmě má za následek využití kontaktní vazby *TIE*, čep se deformuje a prakticky „tahá“ s sebou díru, na okraji které se pak generuje takovéto napětí. (viz obr. 3.3.2.1. vpravo - chyba je stejná i pro stav 5, proto je také na obrázku stav 5) Vhodnější náhradou by bylo vytvořit hard kontakt, který ale opět prodlužuje a někdy i destabilizuje úlohu⁹. Pokud tedy pominu tuto zasaženou oblast (2-3 elementy od místa vzniku), tak největší napětí nakonec vykazuje stav 5 a podezřelá místa nepřesahují napětí spoje desky s profilem výsuvu (45 MPa). (viz obr. 3.3.2.1 vpravo) Zbytek součásti se pohybuje v jednotkách MPa.

O adekvátnosti modelů hovoří vedle uvěřitelného napětí i tvar deformace respektující opět směry působících sil, tj. například při působení akčních sil dopředu dojde k dotyku se spodní opěrnou součástí, načež dolní část výsuvu se posune vpřed, zatímco u horní části dojde k odklonu směrem dozadu. (viz obr. 3.3.2.1 vlevo) Maximální deformace se vyskytla při stavu 5 a to 0,446 mm. (viz tab. 3.3.2.1)

⁹ Spojení *kontaktem* jsem vyzkoušel, a protože na jednom výsuvu je 6 čepů a až 2 opěrné součásti. Úloha se tedy stala až příliš složitou a havarovala, proto jsem ponechal kontakt pouze u nezbytně nutných případů tj. dotyk mezi výsuvem a opěrnou součástí.

tab. 3.3.2.1: Výsledky MKP pro výsuv

	stav 1	stav 2	stav 3	stav 4	stav 4 cisterna	stav 5	stav 6	stav 7
napětí [MPa]	26,3 (39,4)	40,2 (63,6)	33,4 (77,2)	36,2 (92,7)	40,0	45,0 (84,6)	39,4 (69,3)	40,8 (71,5)
deformace [mm]	0,06	0,09	0,19	0,23	0,20	0,45	0,41	0,40



obr. 3.3.2.1: Kritická místa výsuvu s vyznačením pozice spodní opěry (vlevo), místo postižené chybou a místo s největším napětím (vpravo)

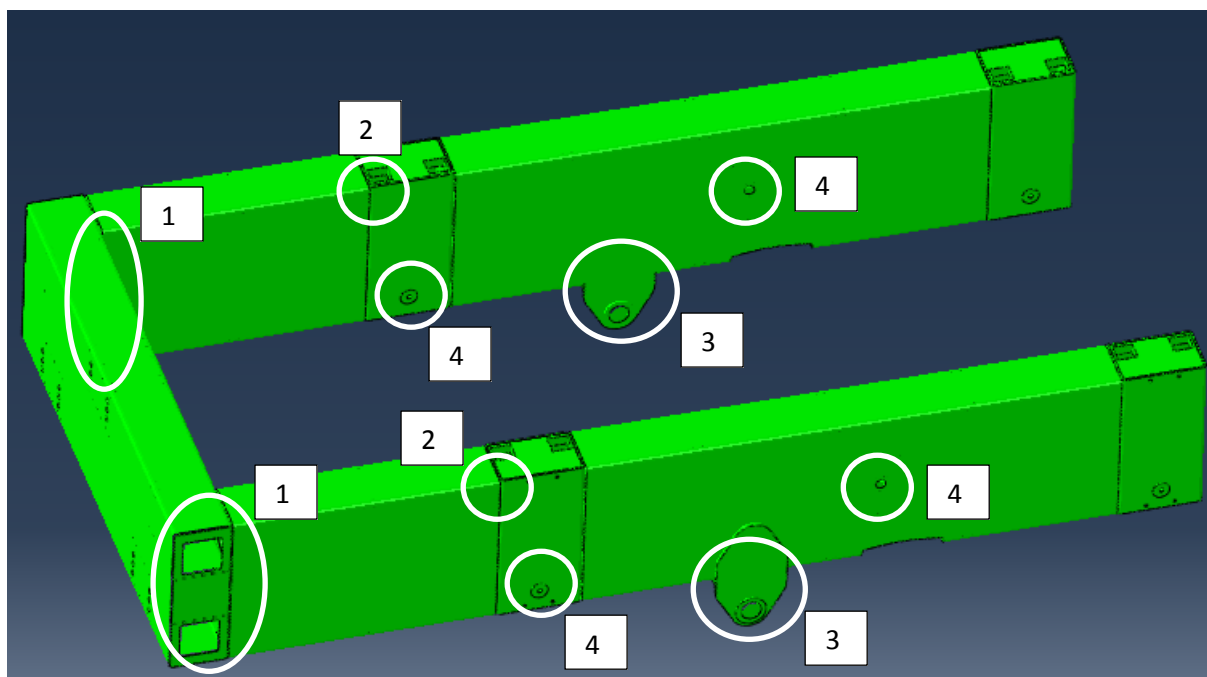
3.3.3 Rám

Místa s vyšším napětím jsou poměrně očekávatelné a jsou to rohy U-rámu, plechy okolo výsuvů hydromotorů, uložení a přilehlá místa čepů a uchycení předního závěsu. (viz obr. 3.3.3.1) U většiny vyjmenovaných dojde pouze ke zvýšení hodnoty napětí, která nepřesáhnou velikost 230 MPa. Problém však nastává u předních plechů lemujících opěrné součásti výsuvů. Téměř u každého zatěžujícího stavu jsou tyto oblasti kritické a vykazují největší napětí. (viz tab. 3.3.3.1)

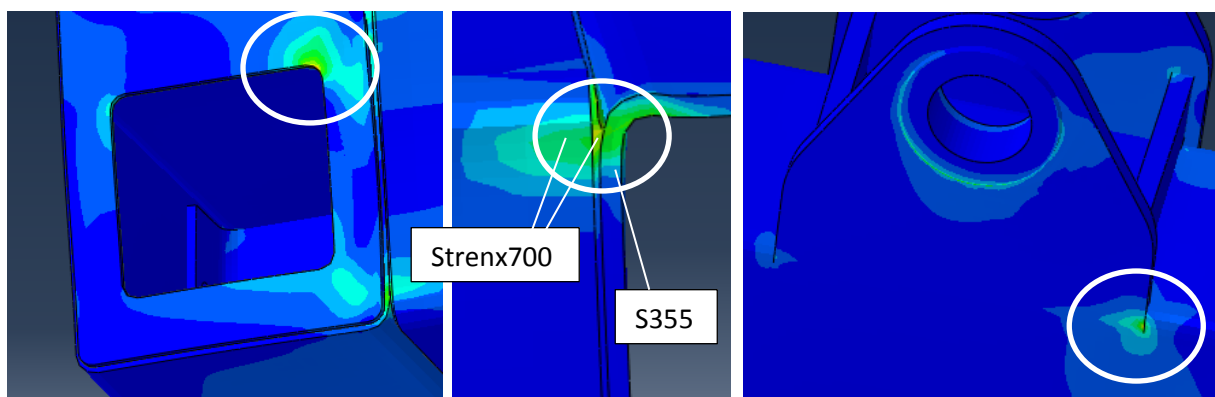
Jedinou výjimkou, u které nebyla tato část plechu (385 MPa) nejkritičtějším místem, se stal průjezd zatáčkou konkrétně stav 4, kde se přidala mezi kritická místa i oblast vnějšího rohu (475 Mpa) a přechod uchycení kola na rám (460 MPa). Jak je vidět na obrázku 3.3.3.2 roh i uchycení kola vykazují velké napětí pouze na malém prostoru, ale ovlivněné oblasti jsou značné, proto bych neřekl, že na těchto místech dosáhne napětí takovéto hodnoty, ale ke zvýšení napjatosti určitě dojde.

MKP model však nejvyšší napětí vykazuje na jiném místě, ale to jsem určil jako špičku. I přes tyto skutečnosti zatěžující stav 4 má nejvyšší pole napjatosti, a proto stal i nejkritičtějším a zároveň pro něj byl spočítán i případ, kdy PVK převáží cisternu. Pro náklad v podobě cisterny platí stejná kritická místa jako u stavu 4. Oblast rohu vnějšího boku rámu vzhledem k zatáčce ukazovala dokonce 654 MPa (špička napětí), ale i zde si myslím, že hodnota nebude tak vysoká a bude se pohybovat v rozmezí 200-300 MPa, jak naznačuje zbytek rohu.

Ještě upozorním, že na uložení čepů se vztahuje obdobná připomínka jako u připojovacích ploch předního závěsu a to, že pro přesné vykreslení napjatosti by síť musela být o mnoho jemnější a řešení napětí pouze kontaktních ploch čepu s rámem by vyžadovalo samostatnou úlohu.



obr. 3.3.3.1: Kritická místa rámu: 1 – vnější/vnitřní roh rámu, 2 – horní/dolní rohy plechů okolo předních výsuvů, 3 - uložení kol, 4 – uložení čepů a přilehlé části



obr. 3.3.3.2: Kritická místa rámu pro stav 4: vnější roh rámu (vlevo), spodní roh vnější strany rámu plechu okolo opěrné součásti (uprostřed), přechod mezi uchycením kola a rámu (vpravo)

U deformovaného rámu dochází k prohnutí, které začíná na předním panelu a prochází přes bočnice PVK. Zároveň jsou boky rámu krouceny směrem dovnitř. Opět je to pouze reakce rámu na zatížení respektive tíhu nákladu (prohnutí) a momenty od visutého uložení kola (nakroucení – vysvětlení viz str. 35 dole) popřípadě boční síly při průjezdu zatáčkou. Největší deformace je opět u stavu 4 a činí 19,9 mm a je vztažena k těžišti¹⁰ zadního modulu. Pokud si tedy zjistím deformaci ještě jednoho bodu a znám souřadnici koncového bodu zadního modulu, můžu pomocí linearizace zjistit celkovou hodnotu přetvoření 20,6 mm.

tab. 3.3.3.1: Výsledky MKP pro rám

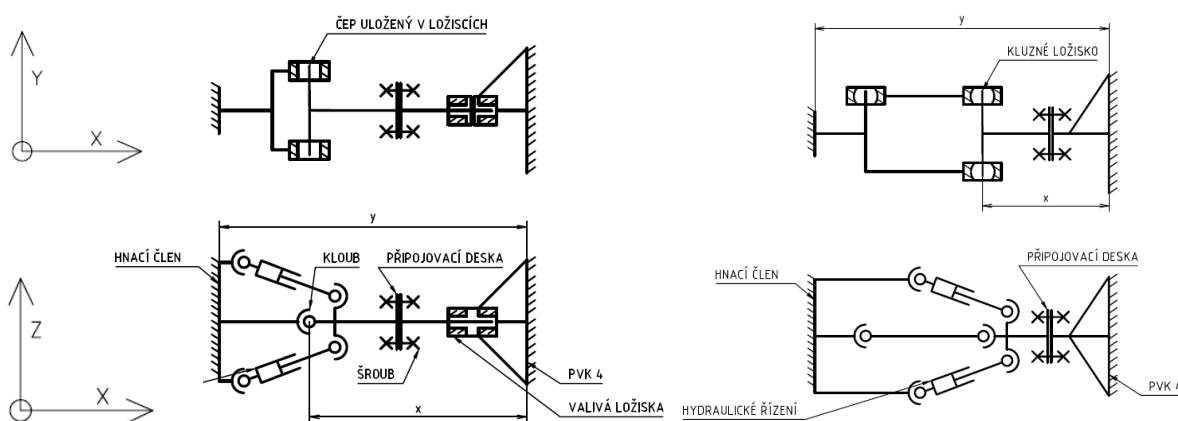
	stav 1	stav 2	stav 3	stav 4	stav 4 cisterna	stav 5	stav 6	stav 7
napětí [MPa]	234,0	374,6	370,4 (504,7)	385,0 (600,3)	300,3 (654,4)	352,5	310,9	306,4
deformace [mm]	2,72 (1,88)	6,33 (5,63)	19,9 (19,2)	20,6 (19,9)	15,5 (14,7)	8,22 (7,52)	7,28 (6,58)	7,07 (6,37)

¹⁰ Protože zadní modul se chová jako „přívěsek“ a nepřenáší žádné zatížení, nahradil jsem ho pouze jeho těžištěm a zjednodušil jsem tak MKP model.

Závěr

Závěr návrhu spojovací části

Pro další zpracování byly vybrány, díky svým vlastnostem (lepší rozdělení zatížení na přední modul, snazší výměna mezi samohybem a taženým vyvážedčem aj.), dvě nejvýhodnější varianty spojení. První varianta je s kuželovými ložisky v závěsu a kluznými ložisky pro uložení čepů a druhá s trojicí kluzných ložisek a táhlem. (viz obr. 4.1)



obr. 4.1: Provedení s kulovými čepi závěsu - s ložisky v závěsu (vlevo), s trojicí kluzných ložisek a táhlem (vpravo)

Obě tyto koncepce využívají jednoduchého závěsu pro připojení okem za tažený vůz.

Na základě rozměrů, podmínek a kinematiky kloubového spoje vyšly výsledné parametry spojení takto:

$$y=1\ 045\ \text{mm}$$

$$x=550\ \text{mm}$$

$$\text{úhel zalomení}=50,08^\circ$$

$$k=1,9$$

Závěr MKP analýzy

Pro výrobu předního závěsu i výsuvů hydromotoru je použit materiál S355 s mezí kluzu 355 MPa. Podle metody konečných prvků se ani u jednoho ze zatěžovacích stavů nepřiblížila hodnota napětí u závěsu ani u výsuvu k mezi kluzi. Naopak i při uvažování nejvyšší hodnoty napětí 132,9 MPa (závěs, stav 2) je bezpečnost vůči mezi kluzu 2,67, což dává i s ohledem na malou deformaci dobrý základ pro splnění použitelnosti pro výrobu. Otázkou je, jaký vliv na tento základ bude mít cyklické zatížení, dynamické rázy (náraz na kámen), ovlivnění materiálu svarem či v praxi vyskytující se přetížení.

Z kapitoly 3.3.3 vyplývá, že velmi kritickými místy ohledně napjatosti jsou rohy plechů okolo předních výsuvů a v případě zatáčky i rohy samotného U-rámu. Vysoké hodnoty rohu rámu mohou být způsobeny nedokonalostí sítě a přikláněl bych se tedy k tomu, že zde budou napětí podobná zbytku rohu, to jest do 300 MPa. Zároveň je zde použit materiál s mezí kluzu 700 MPa a dává tak větší jistotu pro použitelnost konstrukce. To se ale nedá již říct o plechách okolo výsuvů (viz obr. 3.3.3.2 uprostřed), které jsou zatěžovány napětím blížícím se k 390 MPa (385 MPa). Když beru v úvahu aplikovaný materiál S355, docházím k závěru, že tato konstrukce nemůže přenést dané zatížení. Navíc tato část bude i ovlivněna svary, které se chovají jako vruby a zmenšují tak odolnost materiálu a budou tu i další faktory jako například dynamické rázy. Jako řešení by se mohlo zdát výměna materiálu za již používaný Strenx700, ale je potřeba počítat s omezenou životností, protože dle výrobce je mez únavy tohoto materiálu 297 MPa. Případně druhou variantou řešení by mohlo být zesílení nebo vyztužení kritických míst (použití silnějšího plechu).

Seznam použité literatury

Literatura:

- [1] *Podklady PVK4*. STS Prachatice, 2015.
- [31] KOLÁŘ, Josef. *Přednášky z Dopravní techniky*. Praha: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, FS ČVUT Praha, 2012. 283 s.

Internetové odkazy:

- [2] Scholar. *Google*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-3]. Dostupné z: <https://scholar.google.cz/>
- [3] Rešeršní databáze patentů a užitných vzorů. *Úřad průmyslového vlastnictví*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-3]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/webapp/pts.frm>
- [4] Podrobné vyhledávání v normách. *ÚNMZ*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-3]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>
- [5] Směrnice evropské komise. *European Parliament*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-3]. Dostupné z: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeanee/comitologie/rps/2012/D022751-01/COM-AC_DRC\(2012\)D022751-01_CS.doc](http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeanee/comitologie/rps/2012/D022751-01/COM-AC_DRC(2012)D022751-01_CS.doc)
- [6] L 508 Compact. *Liebherr*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.liebherr.com/external/products/products-assets/250465/NTB_L506-L508_Compact_IIIB_enGB_16-03.pdf
- [7] JCB Nový Kloubový nakladač 436 AGRI. *JCB trac-technik*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.jcbtractechnik.sk/>
- [8] W 300 c. *New Holland Construction*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://assets.cnhindustrial.com/nhce/EU_Downloads/Equipment/Wheel-Loaders/W270C-W300C_30668GB.pdf
- [9] Člení kolové nakladače. *Bobcat*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: www.bobcat.cz/celni-kloubove-nakladace.html



- [10] Wheel Loaders Telehandlers. *Weideman*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/weidemann/telehandlers-2070-cx-lp-3070-cx-lp-2070-cx-lp-t-3070-cx-lp-t/52938-34063.html>
- [11] Kolové nakladače Paload. *Manatech*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.manatech.cz/data/2015-11-09-07-47-00-Prospekt-PL1105-CZ.pdf>
- [12] Intrac Technic. *Yumpu*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/de/intrac>
- [13] 993K Wheel Loader Steering System/ Articulated Hitch. *articulated-trucks*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://articulated-trucks.blogspot.cz/2014/06/993k-wheel-loader-steering-system_8923.html
- [14] Volvo Construction Equipment. *volvoce*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.volvoce.com/SiteCollectionDocuments/VCE/Documents%20Global/articulated%20haulers/Brochure_A25G_A30G_T4F_EN_21_20040112_B_2015.02.pdf
- [15] Terex demper. *cwplant*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.cwplant.co.uk/wp-content/uploads/2012/12/Terex-dumper-spec-sheet.pdf>
- [16] Kolový dumper NCSW9. *nc-engineering*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.nc-engineering.cz/download/2012/sw-9-dumper.pdf>
- [17] TA230. *liebherr*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.liebherr.com/external/products/products-assets/182599/NTB_TA230_de_13-03.pdf
- [18] Komatsu 951. *Komatsu*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.komatsuforest.com/default.aspx?id=115895&mode=specs&rootID=1475&productId=115643>
- [19] John Deere 1170E. *John Deere*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.merimex.cz/underwood/download/files/1170E_specs_ENG.pdf
- [20] Logset H5. *Logset*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.lesos.cz/prospekty/Flyer_5H_CZ.pdf



- [21] PONSSE Scorpion. *Ponsse*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.ponsse.com/content/download/12407/307565/file/PONSSE_Scorpion_CZE.pdf
- [22] Rottne harvester. *lesní technika*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.lesni-technika.cz/pdf/prospekty/Broschyr_skordare_2013_cz_FINAL.pdf
- [23] BCS. *zahrady s nápady*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.zahradysnapady.cz/soubory/files/%C5%99ada%20700.pdf>
- [24] Jednonápravový malotraktor 3600. *Agria*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.agria.cz/agria/stroj.asp?idstroj=109>
- [25] Jednoosý traktor – kultivátor MKS-60. *Kultivátory*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.kultivator.cz/kultivatory-mks-60.htm>
- [26] Malotraktory Vari. *Retos Praha s.r.o.*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.egner-retos.cz/naves-vyklapeci-anv-400-142.html>
- [27] Kloubová ložiska. *SKF*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/industry-solutions/marine/products-and-services/skf-bearings-and-housings/spherical-plain-bearings/index.html>
- [28] Bearings for Articulation/Swivel Joints. *FAG*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.fag.de/content.fag.de/en/branches/industry/constructionmachinery/productscm/swiveljoint/swivel_joint.jsp
- [29] Bearings for Articulation/Swivel Joints. *INA*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: http://www.ina.de/content.ina.de/en/branches/industry/constructionmachinery/productscm/swiveljoint/swivel_joint.jsp
- [30] Spherical Plain Bearings . *Timken*. [online]. 3.12.2015 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.timken.com/EN-US/products/bearings/productlist/sphericalplain/Pages/default.aspx>

Seznam obrázků a grafů

Číslo	Název
1	<i>Koncepce přípojného vyvážeece kontejnerů 4</i>
2	<i>Umístění ložisek v předním panelu PVK</i>
1.1.1.1	<i>Patent č. US 5113958</i>
1.1.1.2	<i>Patent č. US 3246778</i>
1.1.1.3	<i>Patent č. US 3253671</i>
1.1.1.4	<i>Patent č. US 3890005</i>
1.1.1.5	<i>Patent č. US 3189117</i>
1.1.1.6	<i>Patent č. US 5632350</i>
1.1.1.7	<i>Patent č. US 3191709</i>
1.1.1.8	<i>Patent č. US 4249629</i>
1.1.1.9	<i>Patent č. US 3442345</i>
1.1.1.10	<i>Patent č. US 3433502</i>
1.1.1.11	<i>Patent č. 219894</i>
1.1.1.12	<i>Patent č. US 3912300</i>
1.1.1.13	<i>Patent č. US 8276704</i>
1.1.1.14	<i>Patent č. US 3814531</i>
1.1.1.15	<i>Patent č. US 7694772</i>
1.1.1.16	<i>Patent č. 212914</i>
1.1.1.17	<i>Patent č. 8810</i>
1.1.2.1	<i>ČSN EN 12 643 Zkušební dráha alternativní zkoušky řízení</i>
1.1.2.2	<i>ISO 6489-5 Neotočné čepové spojení</i>
1.1.2.3	<i>ČSN EN ISO 11850 Vymezení kloubové mezery</i>
1.2.1.1	<i>Mininakladač od firmy In-track</i>
1.2.1.2	<i>Nakladač od firmy Weidemann</i>
1.2.1.3	<i>Velký nakladač od firmy Caterpillar</i>
1.2.1.4	<i>Velký nakladač z Agritechnica Hannover</i>
1.2.2.1	<i>Kloubový damper od firmy Volvo</i>
1.2.2.2	<i>Kolový damper od firmy Terex</i>
1.2.3.1	<i>Harvestor od firmy Ponsse</i>
1.2.4.1	<i>Jednonápravový traktor Terra-Vari</i>
1.2.5.1	<i>Kloubová ložiska SKF (bráno zleva) - radiální ložisko nevyžadující mazání - ložisko s kosoúhlým stykem</i>
2.1.1.1	<i>Provedení s přípojovacím okem dle STS</i>
2.1.1.2	<i>Provedení s kloubovým spojením dle STS</i>
2.1.2.1	<i>Provedení s ložisky v závěsu, kolíkem a přípojovacím okem</i>
2.1.2.2	<i>Provedení s ložisky v závěsu, bez kolíku a kloubovým spojením</i>
2.1.2.3	<i>Model uložení ložisek v závěsu</i>
2.1.2.4	<i>Provedení s jednoduchým závěsem a přípojovacím okem</i>
2.1.2.5	<i>Provedení s ložisky v závěsu, bez kolíku a kloubovým spojením</i>
2.1.2.6	<i>Provedení s jednoduchým závěsem a přípojovacím okem</i>
2.1.2.7	<i>Provedení s kulovými čepy závěsu</i>
2.2.1	<i>Značení při výpočtu délky závěsu (půdorys)</i>
2.2.1.1	<i>Situace možné kolize vyvážeece a tažného členu (půdorys)</i>
2.2.1.2	<i>Výpočet ramena pro situaci a)</i>
2.2.1.3	<i>Výpočet ramena pro situaci c)</i>
2.2.1.4	<i>Výpočet ramena1 pro situaci a)</i>
2.2.1.5	<i>Výpočet rozměru A, γ pro situaci b)</i>
3.1.1	<i>Polonáprava se souřadnicovým systémem výpočtu</i>
3.1.1.1	<i>Uvolnění jednotlivých částí pro stav 1 (bokorys)</i>



Číslo	Název
3.1.3.1	<i>Uvolnění jednotlivých částí pro stav 3 (sdružené pohledy)</i>
3.1.6.1	<i>Uvolnění jednotlivých částí pro stav 5 (bokorys)</i>
3.1.7.1	<i>Uvolnění jednotlivých částí pro stav 6 (bokorys)</i>
3.2.1	<i>Součásti určené pro MKP výpočet</i>
3.2.6.1	<i>Zjednodušený model levé části polonápravy pro stav 3</i>
3.2.6.2	<i>Okrajová podmínka rámu pro zatěžovací stav 2</i>
3.2.6.3	<i>Zjednodušený model výsuvů a podlahy pro stav 5 – deformace nedosáhla limitu 1 mm, který je dán objemovým modelem (mezera mezi výsuvem a opěrnou plastovou částí) => výsuvy se nedotknou opěrných součástí ve směru x (směr kolmý na směr jízdy)</i>
3.3.1.1	<i>Kritická místa předního závěsu – pohled shora (horní obrázek), pohled zespona (dolní obrázek)</i>
3.3.2.1	<i>Kritická místa výsuvu s vyznačením pozice spodní opěry (vlevo), místo postižené chybou a místo s největším napětím (vpravo)</i>
3.3.3.1	<i>Kritická místa rámu: 1 – vnější/vnitřní roh rámu, 2 – horní/dolní rohy plechů okolo předních výsuvů, 3 - uložení kol, 4 – uložení čepů a přilehlé části</i>
3.3.3.2	<i>Kritická místa rámu pro stav 4: vnější roh rámu (vlevo), spodní roh vnější strany rámu plechu okolo opěrné součásti (uprostřed), přechod mezi uchycením kola a rámu (vpravo)</i>
4.1	<i>Provedení s kulovými čepý závěsu - s ložisky v závěsu (vlevo), s trojicí kluzných ložisek a táhlem (vpravo)</i>



Seznam tabulek

Číslo	Název
1.2.6.1	<i>Výsledné varianty kloubů dle řešeršní části</i>
3.1.1.1	<i>Reakce pro stav 1</i>
3.1.1.2	<i>Reakce pro stav 2</i>
3.1.3.1	<i>Reakce pro stav 3</i>
3.1.4.1	<i>Reakce pro stav 4</i>
3.1.5.1	<i>Reakce pro stav 4 - cisterna</i>
3.1.6.1	<i>Reakce pro stav 5</i>
3.1.7.1	<i>Reakce pro stav 6</i>
3.1.8.1	<i>Reakce pro stav 7</i>
3.3.1.1	<i>Výsledky MKP pro závěs</i>
3.3.2.1	<i>Výsledky MKP pro výsuv</i>
3.3.3.1	<i>Výsledky MKP pro rám</i>



Seznam příloh

Příloha 1: Tabulky ke kapitole 2.2 Výpočet délky kloubového spojení

Příloha 2: 1x DVD obsahující:

- Diplomova_prace.pdf
- MKP modely pro Abaqus 6.14 předního závěsu, výsuvu hydromotoru, rámu, zjednodušeného modelu výsuvů a levé/pravé polonápravy pro zátěžové stavy 1-7 s koncovkou *.njl, *.cae
- Objemový model uložení ložisek v závěsu pro Inventor 2014 + videosoubor
- Výpočetní soubory pro Matlab R2014a zatěžovacích stavů 1-7
- Excel soubor: Výpočet přibližné délky kloubového spojení

Přílohy

Příloha 1: Tabulky ke kapitole 2.2 Výpočet délky kloubového spojení

tab. p1: Výpočet ramena1 pro situaci a), $k=<1;2$)

x [mm]/k[1] - rameno1 [mm]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55
50	898,94	899,76	900,56	901,32	902,05	902,76	903,44	904,09	904,71	905,30
100	903,11	904,71	906,20	907,58	908,85	910,00	911,04	911,98	912,80	913,51
150	910,00	912,35	914,44	916,28	917,88	919,23	920,33	921,18	921,79	922,16
200	919,57	922,61	925,20	927,36	929,09	930,38	931,24	931,67	931,67	931,24
250	931,72	935,40	938,40	940,73	942,39	943,38	943,72	943,38	942,39	940,73
300	946,36	950,63	953,94	956,29	957,71	958,18	957,71	956,29	953,94	950,63
350	963,38	968,18	971,70	973,95	974,94	974,67	973,14	970,35	966,28	960,92
400	982,65	987,93	991,56	993,58	993,98	992,77	989,95	985,49	979,39	971,60
450	1004,04	1009,74	1013,41	1015,07	1014,74	1012,41	1008,07	1001,69	993,23	982,64
500	1027,42	1033,49	1037,11	1038,32	1037,11	1033,49	1027,42	1018,87	1007,77	994,03
550	1052,66	1059,04	1062,54	1063,19	1060,99	1055,92	1047,95	1037,00	1022,99	1005,77
600	1079,63	1086,28	1089,59	1089,59	1086,28	1079,63	1069,58	1056,03	1038,85	1017,84
650	1108,20	1115,07	1118,12	1117,40	1112,88	1104,52	1092,25	1075,91	1055,32	1030,23
700	1138,24	1145,29	1148,04	1146,52	1140,70	1130,53	1115,89	1096,59	1072,38	1042,93
750	1169,66	1176,85	1179,24	1176,85	1169,66	1157,57	1140,44	1118,02	1090,00	1055,92
800	1202,33	1209,63	1211,61	1208,30	1199,67	1185,58	1165,85	1140,18	1108,15	1069,21
850	1236,16	1243,53	1245,07	1240,80	1230,65	1214,49	1192,06	1163,00	1126,81	1082,76
900	1271,06	1278,48	1279,53	1274,24	1262,54	1244,23	1219,02	1186,47	1145,95	1096,59
950	1306,94	1314,37	1314,91	1308,58	1295,26	1274,75	1246,68	1210,53	1165,55	1110,66

tab. p2: Výpočet rozměru y pro situaci a), $k=<1;2$)

x [mm]/k[1] - y[mm]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00	75,00	80,00	85,00	90,00	95,00
100	100,00	110,00	120,00	130,00	140,00	150,00	160,00	170,00	180,00	190,00
150	150,00	165,00	180,00	195,00	210,00	225,00	240,00	255,00	270,00	285,00
200	200,00	220,00	240,00	260,00	280,00	300,00	320,00	340,00	360,00	380,00
250	250,00	275,00	300,00	325,00	350,00	375,00	400,00	425,00	450,00	475,00
300	300,00	330,00	360,00	390,00	420,00	450,00	480,00	510,00	540,00	570,00
350	350,00	385,00	420,00	455,00	490,00	525,00	560,00	595,00	630,00	665,00
400	400,00	440,00	480,00	520,00	560,00	600,00	640,00	680,00	720,00	760,00
450	450,00	495,00	540,00	585,00	630,00	675,00	720,00	765,00	810,00	855,00
500	500,00	550,00	600,00	650,00	700,00	750,00	800,00	850,00	900,00	950,00
550	550,00	605,00	660,00	715,00	770,00	825,00	880,00	935,00	990,00	1045,00
600	600,00	660,00	720,00	780,00	840,00	900,00	960,00	1020,00	1080,00	1140,00
650	650,00	715,00	780,00	845,00	910,00	975,00	1040,00	1105,00	1170,00	1235,00
700	700,00	770,00	840,00	910,00	980,00	1050,00	1120,00	1190,00	1260,00	1330,00
750	750,00	825,00	900,00	975,00	1050,00	1125,00	1200,00	1275,00	1350,00	1425,00
800	800,00	880,00	960,00	1040,00	1120,00	1200,00	1280,00	1360,00	1440,00	1520,00
850	850,00	935,00	1020,00	1105,00	1190,00	1275,00	1360,00	1445,00	1530,00	1615,00
900	900,00	990,00	1080,00	1170,00	1260,00	1350,00	1440,00	1530,00	1620,00	1710,00
950	950,00	1045,00	1140,00	1235,00	1330,00	1425,00	1520,00	1615,00	1710,00	1805,00

tab. p3: Výpočet $\alpha_1 + \beta_1$ pro situaci a), $k < 1; 2$)

x [mm]/k[1] - $\alpha_1 + \beta_1$ [mm]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49
50	-6,33	-6,01	-5,69	-5,37	-5,06	-4,74	-4,42	-4,10	-3,79	-3,47
100	-3,16	-2,53	-1,89	-1,26	-0,63	0,00	0,63	1,26	1,89	2,51
150	0,00	0,94	1,88	2,82	3,76	4,70	5,63	6,56	7,50	8,43
200	3,13	4,37	5,62	6,85	8,09	9,32	10,55	11,78	13,01	14,24
250	6,22	7,75	9,28	10,80	12,32	13,84	15,36	16,88	18,40	19,92
300	9,24	11,05	12,86	14,66	16,45	18,25	20,04	21,84	23,64	25,44
350	12,19	14,26	16,33	18,39	20,45	22,51	24,57	26,63	28,70	30,78
400	15,05	17,38	19,69	22,00	24,30	26,61	28,92	31,24	33,58	35,92
450	17,82	20,38	22,92	25,47	28,01	30,55	33,10	35,67	38,25	40,86
500	20,48	23,26	26,03	28,79	31,55	34,31	37,09	39,89	42,72	45,58
550	23,04	26,02	28,99	31,96	34,92	37,90	40,89	43,92	46,98	50,08
600	25,49	28,66	31,82	34,98	38,13	41,31	44,51	47,74	51,02	54,36
650	27,83	31,18	34,51	37,84	41,18	44,54	47,93	51,36	54,86	58,43
700	30,06	33,57	37,07	40,56	44,07	47,60	51,17	54,79	58,49	62,28
750	32,19	35,85	39,49	43,14	46,80	50,49	54,23	58,04	61,93	65,93
800	34,21	38,01	41,79	45,58	49,38	53,23	57,12	61,10	65,17	69,38
850	36,13	40,06	43,97	47,88	51,82	55,81	59,85	63,99	68,24	72,64
900	37,95	42,00	46,03	50,06	54,13	58,24	62,42	66,71	71,13	75,73
950	39,68	43,84	47,97	52,12	56,30	60,53	64,85	69,28	73,86	78,64

tab. p4: Výpočet kontrolního rozměru $y - x - 150$ pro situaci a), $k < 1; 2$)

x [mm]/k[1] - $y - x - 150$ [mm]	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
0	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00
50	-150,00	-145,00	-140,00	-135,00	-130,00	-125,00	-120,00	-115,00	-110,00	-105,00
100	-150,00	-140,00	-130,00	-120,00	-110,00	-100,00	-90,00	-80,00	-70,00	-60,00
150	-150,00	-135,00	-120,00	-105,00	-90,00	-75,00	-60,00	-45,00	-30,00	-15,00
200	-150,00	-130,00	-110,00	-90,00	-70,00	-50,00	-30,00	-10,00	10,00	30,00
250	-150,00	-125,00	-100,00	-75,00	-50,00	-25,00	0,00	25,00	50,00	75,00
300	-150,00	-120,00	-90,00	-60,00	-30,00	0,00	30,00	60,00	90,00	120,00
350	-150,00	-115,00	-80,00	-45,00	-10,00	25,00	60,00	95,00	130,00	165,00
400	-150,00	-110,00	-70,00	-30,00	10,00	50,00	90,00	130,00	170,00	210,00
450	-150,00	-105,00	-60,00	-15,00	30,00	75,00	120,00	165,00	210,00	255,00
500	-150,00	-100,00	-50,00	0,00	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00
550	-150,00	-95,00	-40,00	15,00	70,00	125,00	180,00	235,00	290,00	345,00
600	-150,00	-90,00	-30,00	30,00	90,00	150,00	210,00	270,00	330,00	390,00
650	-150,00	-85,00	-20,00	45,00	110,00	175,00	240,00	305,00	370,00	435,00
700	-150,00	-80,00	-10,00	60,00	130,00	200,00	270,00	340,00	410,00	480,00
750	-150,00	-75,00	0,00	75,00	150,00	225,00	300,00	375,00	450,00	525,00
800	-150,00	-70,00	10,00	90,00	170,00	250,00	330,00	410,00	490,00	570,00
850	-150,00	-65,00	20,00	105,00	190,00	275,00	360,00	445,00	530,00	615,00
900	-150,00	-60,00	30,00	120,00	210,00	300,00	390,00	480,00	570,00	660,00
950	-150,00	-55,00	40,00	135,00	230,00	325,00	420,00	515,00	610,00	705,00

	splnění podmínky úhel zalomení je alespoň 50°
	splnění podmínky kontrolního rozměru
	splnění podmínky $rameno_1 < 2500/2$
	splnění podmínky nejkratší délky y a ostatních podmínek
	záporné/žádné hodnoty



tab. p5: Výpočet ramena1 pro situaci a), $k \leq 2; 10$

x [mm] /k[1] - rameno1 [mm]	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55	897,55
50	905,87	908,28	910,00	911,03	911,37	911,03	910,00	908,28	905,87	902,76	898,94	894,41	889,16	883,16	876,41	868,89	860,58
100	914,11	915,48	914,11	910,00	903,11	893,36	880,68	864,93	845,93	823,47	797,25	766,88	731,85	691,45	644,67	590,00	524,98
150	922,28	919,23	910,00	894,41	872,12	842,60	805,05	758,27	700,43	628,47	536,75	412,28	201,49	-	-	-	-
200	930,38	919,57	897,55	863,48	815,84	752,06	667,53	552,81	381,58	-	-	-	-	-	-	-	-
250	938,40	916,50	876,41	815,46	728,42	604,13	410,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	946,36	910,00	845,93	747,06	596,32	328,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	954,25	899,99	805,05	651,90	374,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	962,08	886,34	752,06	515,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	969,85	868,89	684,18	282,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	977,55	847,41	596,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
550	985,19	821,57	477,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600	992,77	790,95	292,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
650	1000,30	754,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
700	1007,77	712,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
750	1015,18	663,31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	1022,55	604,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
850	1029,85	533,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
900	1037,11	445,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
950	1044,32	324,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



tab. p6: Výpočet rozměru y pro situaci a), $k=<2;10>$

x [mm] /k[1] - y [mm]	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	100,00	125,00	150,00	175,00	200,00	225,00	250,00	275,00	300,00	325,00	350,00	375,00	400,00	425,00	450,00	475,00	500,00
100	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	550,00	600,00	650,00	700,00	750,00	800,00	850,00	900,00	950,00	1000,00
150	300,00	375,00	450,00	525,00	600,00	675,00	750,00	825,00	900,00	975,00	1050,00	1125,00	1200,00	1275,00	1350,00	1425,00	1500,00
200	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1000,00	1100,00	1200,00	1300,00	1400,00	1500,00	1600,00	1700,00	1800,00	1900,00	2000,00
250	500,00	625,00	750,00	875,00	1000,00	1125,00	1250,00	1375,00	1500,00	1625,00	1750,00	1875,00	2000,00	2125,00	2250,00	2375,00	2500,00
300	600,00	750,00	900,00	1050,00	1200,00	1350,00	1500,00	1650,00	1800,00	1950,00	2100,00	2250,00	2400,00	2550,00	2700,00	2850,00	3000,00
350	700,00	875,00	1050,00	1225,00	1400,00	1575,00	1750,00	1925,00	2100,00	2275,00	2450,00	2625,00	2800,00	2975,00	3150,00	3325,00	3500,00
400	800,00	1000,00	1200,00	1400,00	1600,00	1800,00	2000,00	2200,00	2400,00	2600,00	2800,00	3000,00	3200,00	3400,00	3600,00	3800,00	4000,00
450	900,00	1125,00	1350,00	1575,00	1800,00	2025,00	2250,00	2475,00	2700,00	2925,00	3150,00	3375,00	3600,00	3825,00	4050,00	4275,00	4500,00
500	1000,00	1250,00	1500,00	1750,00	2000,00	2250,00	2500,00	2750,00	3000,00	3250,00	3500,00	3750,00	4000,00	4250,00	4500,00	4750,00	5000,00
550	1100,00	1375,00	1650,00	1925,00	2200,00	2475,00	2750,00	3025,00	3300,00	3575,00	3850,00	4125,00	4400,00	4675,00	4950,00	5225,00	5500,00
600	1200,00	1500,00	1800,00	2100,00	2400,00	2700,00	3000,00	3300,00	3600,00	3900,00	4200,00	4500,00	4800,00	5100,00	5400,00	5700,00	6000,00
650	1300,00	1625,00	1950,00	2275,00	2600,00	2925,00	3250,00	3575,00	3900,00	4225,00	4550,00	4875,00	5200,00	5525,00	5850,00	6175,00	6500,00
700	1400,00	1750,00	2100,00	2450,00	2800,00	3150,00	3500,00	3850,00	4200,00	4550,00	4900,00	5250,00	5600,00	5950,00	6300,00	6650,00	7000,00
750	1500,00	1875,00	2250,00	2625,00	3000,00	3375,00	3750,00	4125,00	4500,00	4875,00	5250,00	5625,00	6000,00	6375,00	6750,00	7125,00	7500,00
800	1600,00	2000,00	2400,00	2800,00	3200,00	3600,00	4000,00	4400,00	4800,00	5200,00	5600,00	6000,00	6400,00	6800,00	7200,00	7600,00	8000,00
850	1700,00	2125,00	2550,00	2975,00	3400,00	3825,00	4250,00	4675,00	5100,00	5525,00	5950,00	6375,00	6800,00	7225,00	7650,00	8075,00	8500,00
900	1800,00	2250,00	2700,00	3150,00	3600,00	4050,00	4500,00	4950,00	5400,00	5850,00	6300,00	6750,00	7200,00	7650,00	8100,00	8550,00	9000,00
950	1900,00	2375,00	2850,00	3325,00	3800,00	4275,00	4750,00	5225,00	5700,00	6175,00	6650,00	7125,00	7600,00	8075,00	8550,00	9025,00	9500,00



tab. p7: Výpočet $\alpha_1 + \beta_1$ pro situaci a), $k = \langle 2; 10 \rangle$

x [mm] / k[1] - $\alpha_1 + \beta_1$	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49	-9,49
50	-3,15	-1,58	0,00	1,57	3,14	4,72	6,29	7,87	9,44	11,03	12,62	14,22	15,82	17,44	19,07	20,71	22,36
100	3,14	6,27	9,40	12,54	15,70	18,89	22,12	25,40	28,75	32,18	35,71	39,38	43,20	47,22	51,51	56,14	61,28
150	9,36	14,02	18,72	23,48	28,34	33,35	38,56	44,06	49,94	56,40	63,77	72,81	86,74	-	-	-	-
200	15,47	21,66	27,96	34,46	41,28	48,57	56,63	66,00	78,22	-	-	-	-	-	-	-	-
250	21,44	29,15	37,13	45,58	54,84	65,56	79,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	27,25	36,49	46,26	57,02	69,76	88,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	32,87	43,66	55,38	69,08	88,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400	38,29	50,65	64,56	82,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	43,50	57,45	73,94	100,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
500	48,49	64,09	83,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
550	53,25	70,56	94,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600	57,78	76,88	107,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
650	62,10	83,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
700	66,19	89,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
750	70,08	95,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
800	73,76	101,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
850	77,25	107,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
900	80,56	114,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
950	83,69	121,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



tab. p8: Výpočet kontrolního rozměru $y-x-150$ pro situaci a), $k=\langle 2;10 \rangle$

x [mm] / $k[1] - y-x-150$ [mm]	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00	-150,00
50	-100,00	-75,00	-50,00	-25,00	0,00	25,00	50,00	75,00	100,00	125,00	150,00	175,00	200,00	225,00	250,00	275,00	300,00
100	-50,00	0,00	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	550,00	600,00	650,00	700,00	750,00
150	0,00	75,00	150,00	225,00	300,00	375,00	450,00	525,00	600,00	675,00	750,00	825,00	900,00	975,00	1050,00	1125,00	1200,00
200	50,00	150,00	250,00	350,00	450,00	550,00	650,00	750,00	850,00	950,00	1050,00	1150,00	1250,00	1350,00	1450,00	1550,00	1650,00
250	100,00	225,00	350,00	475,00	600,00	725,00	850,00	975,00	1100,00	1225,00	1350,00	1475,00	1600,00	1725,00	1850,00	1975,00	2100,00
300	150,00	300,00	450,00	600,00	750,00	900,00	1050,00	1200,00	1350,00	1500,00	1650,00	1800,00	1950,00	2100,00	2250,00	2400,00	2550,00
350	200,00	375,00	550,00	725,00	900,00	1075,00	1250,00	1425,00	1600,00	1775,00	1950,00	2125,00	2300,00	2475,00	2650,00	2825,00	3000,00
400	250,00	450,00	650,00	850,00	1050,00	1250,00	1450,00	1650,00	1850,00	2050,00	2250,00	2450,00	2650,00	2850,00	3050,00	3250,00	3450,00
450	300,00	525,00	750,00	975,00	1200,00	1425,00	1650,00	1875,00	2100,00	2325,00	2550,00	2775,00	3000,00	3225,00	3450,00	3675,00	3900,00
500	350,00	600,00	850,00	1100,00	1350,00	1600,00	1850,00	2100,00	2350,00	2600,00	2850,00	3100,00	3350,00	3600,00	3850,00	4100,00	4350,00
550	400,00	675,00	950,00	1225,00	1500,00	1775,00	2050,00	2325,00	2600,00	2875,00	3150,00	3425,00	3700,00	3975,00	4250,00	4525,00	4800,00
600	450,00	750,00	1050,00	1350,00	1650,00	1950,00	2250,00	2550,00	2850,00	3150,00	3450,00	3750,00	4050,00	4350,00	4650,00	4950,00	5250,00
650	500,00	825,00	1150,00	1475,00	1800,00	2125,00	2450,00	2775,00	3100,00	3425,00	3750,00	4075,00	4400,00	4725,00	5050,00	5375,00	5700,00
700	550,00	900,00	1250,00	1600,00	1950,00	2300,00	2650,00	3000,00	3350,00	3700,00	4050,00	4400,00	4750,00	5100,00	5450,00	5800,00	6150,00
750	600,00	975,00	1350,00	1725,00	2100,00	2475,00	2850,00	3225,00	3600,00	3975,00	4350,00	4725,00	5100,00	5475,00	5850,00	6225,00	6600,00
800	650,00	1050,00	1450,00	1850,00	2250,00	2650,00	3050,00	3450,00	3850,00	4250,00	4650,00	5050,00	5450,00	5850,00	6250,00	6650,00	7050,00
850	700,00	1125,00	1550,00	1975,00	2400,00	2825,00	3250,00	3675,00	4100,00	4525,00	4950,00	5375,00	5800,00	6225,00	6650,00	7075,00	7500,00
900	750,00	1200,00	1650,00	2100,00	2550,00	3000,00	3450,00	3900,00	4350,00	4800,00	5250,00	5700,00	6150,00	6600,00	7050,00	7500,00	7950,00
950	800,00	1275,00	1750,00	2225,00	2700,00	3175,00	3650,00	4125,00	4600,00	5075,00	5550,00	6025,00	6500,00	6975,00	7450,00	7925,00	8400,00

- splnění podmínky úhel zalomení je alespoň 50°
- splnění podmínky kontrolního rozměru
- splnění podmínky $rameno1 < 2500/2$
- splnění podmínky nejkratší délky y a ostatních podmínek
- záporné/žádné hodnoty

tab. p9: Výpočet pro situaci b)

k [1]	x[mm]	y[mm]	uhel[rad]	uhel[°]	y-x[mm]	rozměr A [mm]	2*alfa [°]	rozdíl úhlů [°]
1	856,97	856,97	0,76	43,28	0,00	1250,00	6,88	36,40
1,05	858,04	900,95	0,79	45,28	42,90	1250,74	6,88	38,41
1,1	861,29	947,42	0,83	47,37	86,13	1252,96	6,86	40,50
1,15	866,78	996,79	0,86	49,54	130,02	1256,74	6,84	42,70
1,2	874,64	1049,57	0,90	51,83	174,93	1262,18	6,81	45,02
1,25	885,08	1106,35	0,95	54,24	221,27	1269,43	6,77	47,47
1,3	898,35	1167,86	0,99	56,80	269,51	1278,72	6,72	50,07
1,35	914,83	1235,03	1,04	59,52	320,19	1290,36	6,66	52,86
1,4	935,03	1309,05	1,09	62,44	374,01	1304,76	6,59	55,84
1,45	959,62	1391,45	1,14	65,58	431,83	1322,49	6,50	59,08
1,5	989,55	1484,32	1,20	68,99	494,77	1344,36	6,40	62,60
1,55	1026,11	1590,47	1,27	72,73	564,36	1371,50	6,27	66,46
1,6	1071,21	1713,94	1,34	76,86	642,73	1405,56	6,12	70,75
1,65	1127,69	1860,69	1,42	81,49	733,00	1449,06	5,93	75,55
1,7	1200,00	2040,00	1,51	86,73	840,00	1506,02	5,71	81,02
1,75	1295,62	2267,33	1,62	92,78	971,71	1583,27	5,43	87,35
1,8	1428,29	2570,91	1,74	99,93	1142,63	1693,55	5,08	94,85
1,85	1626,80	3009,58	1,90	108,67	1382,78	1864,02	4,61	104,05
1,9	1966,03	3735,45	2,09	119,92	1769,42	2166,42	3,97	115,96
1,95	2744,50	5351,78	2,37	136,04	2607,28	2891,44	2,97	133,07



splnění podmínky úhel zalomení je alespoň 50°

splnění podmínky kontrolního rozměru

splnění podmínky nejkratší délky y a ostatních podmínek