

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## **Analýza chování kapaliny v cisterně**

Analysis of the Behavior of the Liquid in the Tank

Student:

Václav Novák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání bakalářské práce

Student: **Václav Novák**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Analýza chování kapaliny v cisterně**  
**Analysis of the Behavior of the Liquid in the Tank**

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte chování kapaliny při pohybu v cisterně.
2. Zpracujte dynamiku pohybu vozidla.
3. Zpracujte metodiku základních případů chování kapaliny v cisterně při přepravě po pozemních komunikacích a vyberte nejkritičtější variantu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
- [2] JANALÍK, J.: *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
- [3] VLK F.: *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. Brno, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [4] MATĚJKA, R. *Vozidla silniční dopravy I*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1990.
- [5] Technická dokumentace k vybrané cisterně
- [6] ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [7] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu

V Ostravě ..... 19. 5. 2014 .....

..... *Bachelor Kuzák* .....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 17.5.2019



Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Václav Novák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Těšínská, 895

Šenov, 739 34

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

NOVÁK, Václav. *Analýza chování kapaliny v cisterně : bakalářské práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 57 s. Vedoucí práce: Jablonská, J.

Bakalářská práce se zabývá metodikou základních případů chování kapaliny v cisterně při přepravě po pozemních komunikacích. Součástí této práce je rešerše, která obsahuje rozbor základních jízdních situací jako je brzdění na vodorovné rovině, brzdění z kopce, brzdění do kopce a průjezd zatáčkou. Pro tyto jízdní situace jsou řešeny brzdné dráhy, mez smyku a mez převrácení cisternového vozidla. Na základě zmíněných jízdních situací je zpracována metodika výpočtu relativního klidu kapaliny a následně je tato metodika výpočtu aplikována na zvoleném cisternovém vozidle.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

NOVÁK, Václav. *Analysis of the Behavior of the Liquid in the tank : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2014, 57 p. Thesis head: Jablonská, J.

The bachelor thesis deals with the methodology of the basic cases of behavior of the liquid in the tank during transport on the road. Research of this thesis includes analysis of basic driving situations such as braking on a horizontal plane, braking downhill, braking uphill and cornering. For those transport situations are solved braking distances, skid limit and tank vehicle overturn limit. Methodology of calculation of relative calm liquids is processed on the basis of these driving situations and subsequently this methodology of calculations is applied to the selected tank vehicle.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	7
Seznam použitých zkratk .....	9
Úvod .....	10
1 Přeprava kapalin.....	11
1.1 Rozdělení cisteren .....	11
1.2 Přeprava nebezpečných věcí (ADR) .....	12
2 Dynamika pohybu vozidel .....	14
2.1 Síly působící na vozidlo .....	14
2.1.1 Odpor válivý .....	15
2.1.2 Odpor stoupání .....	15
2.1.3 Odpor vzduchu .....	15
2.1.4 Odpor setrvačnosti.....	15
2.2 Rozbor jízdních situací.....	16
2.2.1 Akcelerace .....	16
2.2.2 Brzdění .....	17
2.2.3 Průjezd zatáčkou .....	17
3 Vliv chování se kapalin při pohybu v cisterně .....	19
3.1 Rovnoměrný přímočarý pohyb .....	19
3.2 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb ve vodorovné rovině.....	19
3.3 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb na nakloněné rovině .....	21
4 Síly působící na stěny cisterny a přepážky .....	24
4.1 Síla působící na stěnu cisterny .....	24
4.2 Síla působící na boční stěnu cisterny .....	25
5 Výpočet chování kapaliny při vybraných jízdních situacích na zvoleném vozidle .....	26
5.1 Výpočet síly působící na stěnu cisterny při brzdění .....	28
5.1.1 Brzdění na vodorovné rovině .....	28
5.1.2 Brzdění na nakloněné rovině .....	30
5.2 Výpočet síly působící na bok stěny cisterny při průjezdu zatáčkou .....	32
5.3 Aplikace výpočtu na mnou zvoleném cisternovém vozidle a cisterny.....	36
5.3.1 Brzdění .....	36
5.3.2 Průjezd zatáčkou .....	45
Závěr.....	49
Použitá literatura.....	50
Seznam příloh.....	52

## Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Měřicí jednotka	Význam
$B$	[m]	rozchod kol
$E_k$	[J]	kinetická energie
$F$	[N]	tlaková síla
$F_B$	[N]	brzdná síla
$F_d$	[N]	obvodová síla kola
$F_k$	[N]	hnací síla
$F_o$	[N]	odstředivá síla
$F_{oc}$	[N]	odstředivá síla kapaliny v cisterně
$F_{ov}$	[N]	odstředivá síla vozidla
$F_s$	[N]	setrvačná síla
$F_x$	[N]	síla působící na stěnu cisterny
$F_y$	[N]	třecí síla
$F_z$	[N]	reakční síla
$G$	[N]	tíha vozidla
$G_c$	[N]	tíha kapaliny v cisterně
$G_v$	[N]	tíha prázdného vozidla
$H_0$	[m]	výška hladinové plochy
$O$	[N]	jízdní odpor
$O_a$	[N]	odpor setrvačnosti
$O_{ap}$	[N]	odpor setrvačnosti posuvných hmot
$O_{ar}$	[N]	odpor setrvačnosti rotačních hmot
$O_f$	[N]	odpor válivý
$O_s$	[N]	odpor stoupání
$O_v$	[N]	odpor vzduchu
$R$	[m]	poloměr zatáčky
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha stěny cisterny
$S_v$	[m <sup>2</sup> ]	čelní plocha vozidla
$S_x$	[m <sup>2</sup> ]	průmět křivé plochy do svislé roviny
$T$	[1]	těžiště
$V_y$	[m <sup>3</sup> ]	objem zatěžujícího obrazce

$W$	[J]	práce
$a$	[m·s <sup>-2</sup> ]	zrychlení vozidla
$c_x$	[1]	součinitel odporu vzduchu
$d$	[m]	průměr cisterny
$f$	[1]	součinitel odporu válení
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$g'$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení korigované o složku vnějšího zrychlení
$h$	[m]	výška hladinové plochy
$h_T$	[m]	výška těžiště
$h_{Tc}$	[m]	výška těžiště kapaliny v cisterně od vozovky
$h_{Tv}$	[m]	výška těžiště prázdného vozidla od vozovky
$l$	[m]	délka cisterny
$l_z$	[m]	příčná vzdálenost těžiště
$l_{zc}$	[m]	příčná vzdálenost těžiště kapaliny v cisterně
$l_{zv}$	[m]	příčná vzdálenost těžiště prázdného vozidla
$m$	[kg]	hmotnost vozidla
$p_d$	[Pa]	dynamický tlak
$p_T$	[Pa]	hydrostatický tlak
$r$	[m]	poloměr cisterny
$r_t$	[m]	vzdálenost těžiště kapaliny od středu cisterny
$s$	[m]	brzdná dráha
$t$	[s]	čas
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost vozidla
$v_0$	[m·s <sup>-1</sup> ]	počáteční rychlost vozidla
$\alpha$	[°]	sklon hladiny kapaliny v cisterně za pohybu od vodorovné hladiny
$\beta$	[°]	sklon hladiny kapaliny v cisterně za pohybu od nakloněné roviny
$\mu$	[1]	součinitel adheze
$\mu_y$	[1]	součinitel boční soudržnosti
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota kapaliny
$\tau$	[1]	součinitel rotujících hmot
$\varphi$	[°]	sklonu vozovky



# Seznam použitých zkratk

ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
EHK OSN	Evropská hospodářská komise Spojených národů

## Úvod

Prvními prostředky používané k přepravě kapalin z místa A do místa B, byly například keramické džbány. V dnešní době se používá potrubí pro přepravu velkého množství kapaliny a pro menší množství, kde by nemělo smysl dělat velkou výstavbu rozvodného potrubního systému, tak se uplatňují cisterny. Cisterny slouží pro přepravu, anebo také pro uskladnění kapalin.

Kapalina patří mezi nejnebezpečnější náklad při přepravě, které jsou přepravovány ve speciálních nádobách, tj. cisternách nebo v láhvích, kanystrech, sudech, atd. Pokud není cisterna zcela zaplněna kapalinou, pak vzniká v cisterně na rozhraní vzduchu a kapaliny volná hladina. Při různých jízdních situacích kapalina nezaujímá klidovou polohu, ale pohybuje se a přizpůsobuje se tvaru nádoby. Důsledkem toho se mění i těžiště v prostoru, které kapalina zaujímá. To je příčinou působení nežádoucích sil při jízdě vozidla, které kapalinu přepravuje. V kritických jízdních situacích, může dojít ke smyku vozidla nebo k jeho překlopení. Důsledky, které vzniknout při nehodě mohou mít za následek požár, výbuch, poškození životního prostředí a v nejhorším případě i smrt člověka.

Cílem této práce je vyhodnotit chování kapaliny v cisterně, jenž ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla. V této práci se budu zabývat silami působící na stěny cisterny a přepážky, dynamické vlastnosti cisterny při průjezdu zatáčkou, dynamické vlastnosti při rozjezdu, brzdění, jízdě do kopce a z kopce. A následujícím výběr nejkritičtější situace, která může nastat při přepravě kapaliny v cisterně po pozemní komunikaci.

# 1 Přeprava kapalin

Cisterny se využívají pro přepravu látek ve skupenstvích kapalných, plynných i pevných. Téměř všechny kapalné látky je možno přepravovat cisternou jak chemikálie (pohonné hmoty, kyseliny, dusičnany, apod.), tak i potraviny (mléko, potravinářských olejů, apod.). Jako pevné látky se přepravují sypké hmoty (granuláty, práškové substráty apod.). Všechny tyto látky musí splňovat podmínky pro přepravu nebezpečného nákladu jak pro konstrukční řešení, tak i pro přepravovaný druh nákladu. Tyto podmínky ukládá ADR - Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (z Accord Dangereuse Route) z roku 1968.

## 1.1 Rozdělení cisteren

Cisterny můžeme rozdělit podle nastavby na podvozku a to na cisternovou nastavbu (obr. 1), cisternový přívěs (obr. 2) a cisternový návěs (obr. 3). Dále můžeme rozdělit cisterny podle konstrukčního řešení na snímatelné a nesnímatelné. [9]

### Cisternová nastavba nákladního vozu

U tohoto řešení může být cisternová nastavba snímatelná i nesnímatelná. Při snímatelné nádrži se jedná o cisternu kontejnerovou (viz obr. 1). Množství kapaliny u tohoto řešení je omezeno rozměry vozidla a jeho maximální hmotnosti na nápravu. Výhodou je, že toto vozidlo se může pohybovat po nepevněné vozovce oproti návěsovým cisternám.



Obr. 1 Cisternové vozidlo pro přepravu pohonných hmot [5]

## Cisternový návěs

Toto řešení je nejvýhodnější pro přepravu velkého množství kapaliny. Cisternový návěs (obr. 2) není moc vhodný do členitého terénu, nejčastěji se využívá pro přepravu kapalin po zpevněné vozovce na dlouhých trasách.



Obr. 2 Cisternový návěs pro přepravu pohonných hmot [6]

## Cisternový přívěs

Používá se pro zvýšení přepravovaného množství kapaliny. Většinou se zapojuje do soupravy s nákladním vozidlem. Po odpojení může setrvat na místě (obr. 3) po zajištění proti pohybu a může sloužit, jako zásobování pitné vody v místě, kde byla např. přerušena dodávka.



Obr. 3 Cisternový přívěs pro přepravu pohonných hmot [7]

## 1.2 Přeprava nebezpečných věcí (ADR)

Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) byla sjednána v Ženevě dne 30. září 1957 pod patronací EHK OSN a vstoupila v platnost dne 29. ledna 1968.

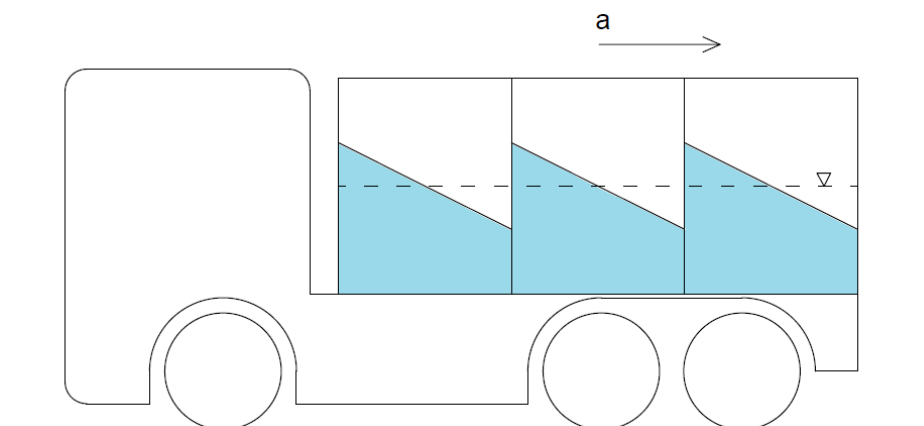
ADR udává, jakým způsobem lze přepravovat zboží, podmínky pro konstrukci cisteren a samotnou přepravu látek. Hlavním cílem této dohody je maximální eliminace rizik, které souvisí s konstrukcí a provozem cisternových vozidel na pozemní komunikaci. Tato dohoda dále obsahuje třídění nebezpečných látek a předmětů podle jejich nebezpečných vlastností. Stanovuje technické požadavky na vozidla, zápis do přepravních dokladů, dozor nad přepravovaným materiálem, atd. Každý náklad musí být označen identifikačním číslem nebezpečných věcí. [9]

### **Konstrukční podmínky pro přepravu daného množství kapaliny**

Jestliže chceme přepravovat kapalinu v cisterně, která není rozdělaná přepážkami nebo peřejníky do komor s maximálním vnitřním objemem 7500 litrů, musí být tato cisterna naplněna nejméně na 80 % nebo nejvýše na 20 % jejího objemu. [9]

Přepážky (obr. 4) slouží pro zvýšení stability při jízdě, kdy při brzdění nebo akceleraci dochází k přelévání kapaliny z jedné části cisterny do druhé. Dále slouží, jako oddělení různých kapalin aby se nemísily.

Peřejníky napomáhají ke snížení kinetické energie kapaliny při přelévání, kdy laminární proudění se mění v turbulentní. [4]

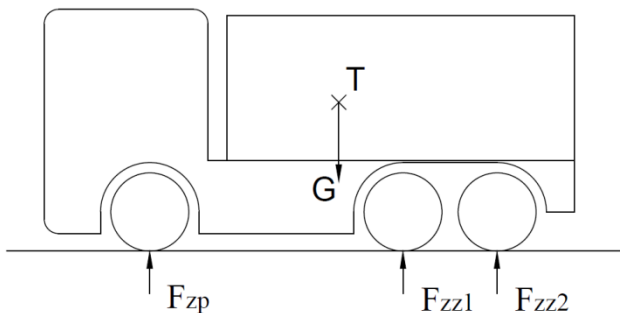


**Obr. 4 Cisternové vozidlo s přepážkami při brzdění**

## 2 Dynamika pohybu vozidel

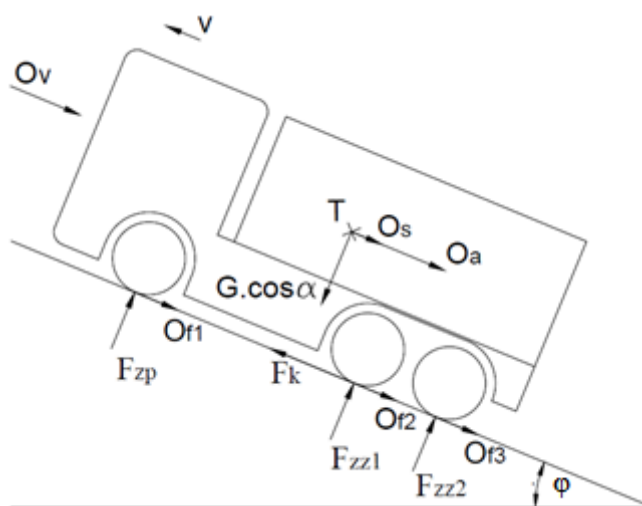
### 2.1 Síly působící na vozidlo

Pokud vozidlo stojí na vodorovné rovině, pak na vozidlo působí reakční síly  $F_z$  v bodech styku vozidla s rovinou (vozovkou) a vlastní tíha vozidla  $G$  působí kolmo na vozovku, kde působíště tíhy vozidla je v jeho těžišti  $T$ .



Obr. 5 Síly působící na cisternové vozidlo v klidu na vodorovné rovině

Abychom uvedli vozidlo do pohybu, je zapotřebí vyvinout na hnanou nápravu vozidla sílu, která bude působit v požadovaném směru jízdy. Tuto sílu budeme nazývat hnací silou  $F_k$ . Při rovnoměrném pohybu vozidla začínají na vozidlo působit jízdní odpory  $O$ . [2]



Obr. 6 Síly působící na cisternové vozidlo v pohybu na nakloněné rovině

Odporové a reakční síly působící na vozidlo:  $O_f$  – odpor válivý [N],  $O_s$  – odpor stoupání [N],  $O_v$  – odpor vzduchu [N],  $O_a$  – odpor setrvačnosti [N],  $F_z$  – reakční síla [N],  $F_k$  – hnací síla [N],  $G \cdot \cos \varphi$  – složka tíhy vozidla kolmá k vozovce [N]

### 2.1.1 Odpor válivý

Odpor válivý  $O_f$  vzniká deformací pneumatiky vozidla a deformací vozovky. Většinou uvažujeme vozovku jako tuhou, pak dochází k deformaci jen pneumatiky. [1]

$$O_f = \sum F_{zi} \cdot f = G \cdot \cos\varphi \cdot f \quad [N] \quad (1)$$

kde:  $F_z$  – reakční síla kola [N],  $f$  – součinitel odporu válení [1],  $G$  – tíhová síla vozidla [N],  $\varphi$  – úhel svírající rovinu vozovky s vodorovnou rovinou

### 2.1.2 Odpor stoupání

Odpor stoupání je složka tíhy vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky. Pokud se vozidlo pohybuje do svahu, pak nabývá záporné hodnoty. Jedoucí vozidlo ze svahu nabývá kladné hodnoty, kdy sinová složka nepůsobí jako odpor, ale jako pohon vozidla.

$$O_s = \pm G \cdot \sin\varphi \quad [N] \quad (2)$$

### 2.1.3 Odpor vzduchu

Důsledkem proudění vzduchu kolem pohybujícího se vozidla, vzniká za vozidlem víření (to je zapříčiněno neuzavírajícími se proudnicemi) a tím vzniká odpor vzduch  $O_v$ . Velikost této vzdušné síly je dána výslednicí normálových tlaků vzduch na povrchu karosérie a třecích sil, které působí v tečném směru proudění vzduchu kolem karosérie.

$$O_v = p_d \cdot c_x \cdot S_v = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c_x \cdot S_v \quad [N] \quad (3)$$

kde:  $p_d$  – dynamický tlak [Pa],  $c_x$  – součinitel odporu vzduchu [1],  $S_v$  – čelní plocha vozidla [m<sup>2</sup>],  $\rho$  – hustota vzduchu [kg·m<sup>3</sup>],  $v$  – rychlost vozidla za bezvětří [m·s<sup>-1</sup>]

### 2.1.4 Odpor setrvačnosti

Při zrychlování vozidla působí proti směru zrychlení setrvačná síla, kterou nazýváme odpor setrvačnosti  $O_a$ .

$$O_a = O_{ap} + O_{ar} = m \cdot a \cdot \tau \quad [N] \quad (4)$$

kde:  $O_{ap}$  – odpor setrvačnosti posuvných hmot [N],  $O_{ar}$  – odpor setrvačnosti rotujících hmot [N],  $m$  – hmotnost vozidla [kg],  $a$  – zrychlení vozidla [m·s<sup>-2</sup>],  $\tau$  – součinitel rotujících hmot [1]

## Obecná pohybová rovnice vozidla

Aby se vozidlo uvedlo do pohybu, musí být hnací síla  $F_k$  větší než součet všech jízdních odporů.

$$F_k > O_f + O_s + O_v + O_a \quad (5)$$

$$m \cdot a = O_f + O_s + O_v + O_a$$

$$m \cdot a = G \cdot \cos\varphi \cdot f + G \cdot \sin\varphi + p_d \cdot c_x \cdot S + m \cdot a \cdot \tau \quad (6)$$

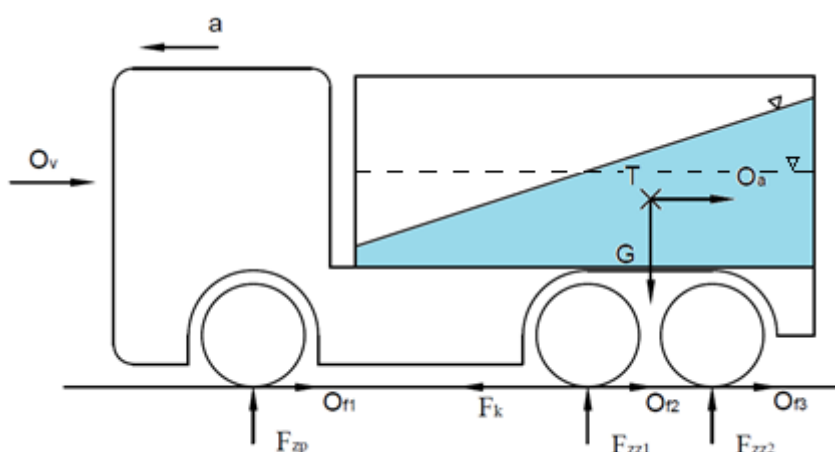
kde:  $m$  – hmotnost vozidla [kg],  $a$  – zrychlení vozidla [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

## 2.2 Rozbor jízdních situací

Když cisternové vozidlo bude naplněno kapalinou jenom částečně, pak bude při velkých změnách zrychlení docházet k nežádoucímu přelévání kapaliny z jedné části cisterny do druhé, což má za nežádoucí účinek neustálou změnu polohy těžiště. Změny polohy těžiště cisternového vozidla má značný vliv na jízdní vlastnosti a na bezpečnost silničního provozu. Pokud je cisternové vozidlo prázdné nebo zcela naplněné kapalinou, pak je těžiště neměnné při různých hodnotách zrychlení.

### 2.2.1 Akcelerace

Akcelerací neboli zrychlení vozidla rozumíme charakteristiku pohybu popisující změnu rychlosti vozidla v čase. Jestliže jsou změny zrychlení příliš velké, pak může docházet k přelévání, proudění a narážení kapaliny na vnitřní stěny cisterny a na vozidlo tak působí dynamickými rázy, které mají vliv na chování vozidla při jízdě. Pokud je pohyb cisternového vozidla rovnoměrně zrychlený, můžeme situaci akcelerace uvažovat jako hydrostatickou úlohu. [1] [3]



Obr. 7 Síly působící na cisternové vozidlo při rovnoměrně zrychleném pohybu

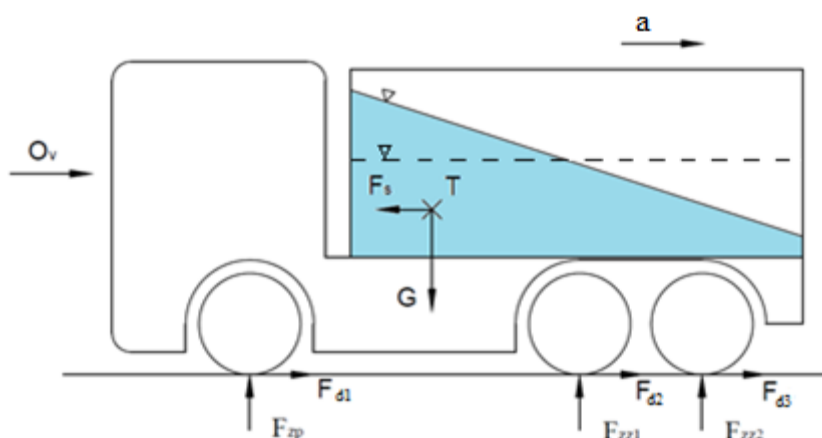


## Pohybová rovnice akcelerace

$$m \cdot a = O_a + G + O_v + \sum O_{fi} + \sum F_{zi} \quad (7)$$

### 2.2.2 Brzdění

Brzdění je jev, při kterém záměrně snižujeme rychlost vozidla nebo zabraňujeme rozjetí stojícího vozidla. Při brzdění působí setrvačná síla v opačném směru než při akceleraci a to ve směru jízdy. Tato síla obvykle dosahuje větších hodnot než u akcelerace. Přelévání kapaliny při brzdění v cisternovém vozidle je totožné jak u akcelerace, ale pohyb kapaliny je v opačném směru než u akcelerace a to ve směru jízdy při brzdění. [2]



Obr. 8 Síly působící na cisternové vozidlo při rovnoměrném zpomaleném pohybu

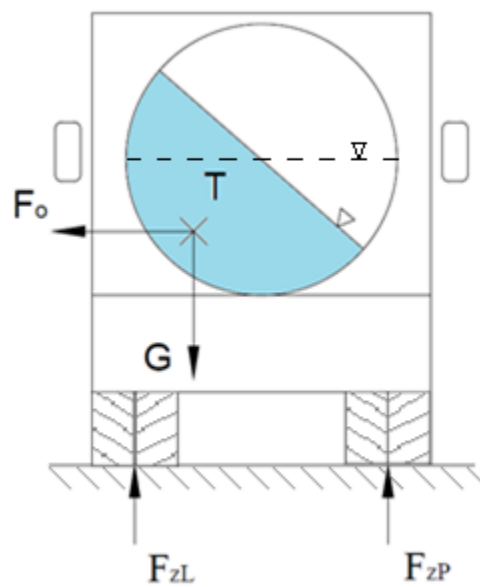
### Pohybová rovnice brzdění

$$m \cdot a = \sum F_{di} + G + O_v + \sum F_{zi} \quad (8)$$

kde:  $F_d$  – obvodová síla na jednotlivých kolech jako funkce času, skluzu a rychlosti jízdy [N],  $F_s$  – setrvačná síla [N]

### 2.2.3 Průjezd zatáčkou

Pokud vozidlo najíždí do zatáčky konstantní rychlostí, pak začne na vozidlo působit příčné zrychlení, které působí na vozidlo v těžišti  $T$  a narůstá z nulové hodnoty na maximální hodnotu. Při výjezdu vozidla ze zatáčky příčné zrychlení naopak klesá z maximální hodnoty na nulovou hodnotu. Průjezd cisternového vozidla zatáčkou patří mezi nejnebezpečnější situace z důvodu přelévání kapaliny z jedné části cisterny do druhé. Toto přelévání kapaliny má za následek přemístění těžiště ve směru příčného zrychlení čímž, je narušena jízdní stabilita a může dojít k převrácení nebo ke smyku cisternového vozidla. [1]



Obr. 9 Síly působící na cisternové vozidlo při průjezdu pravotočivé zatáčky

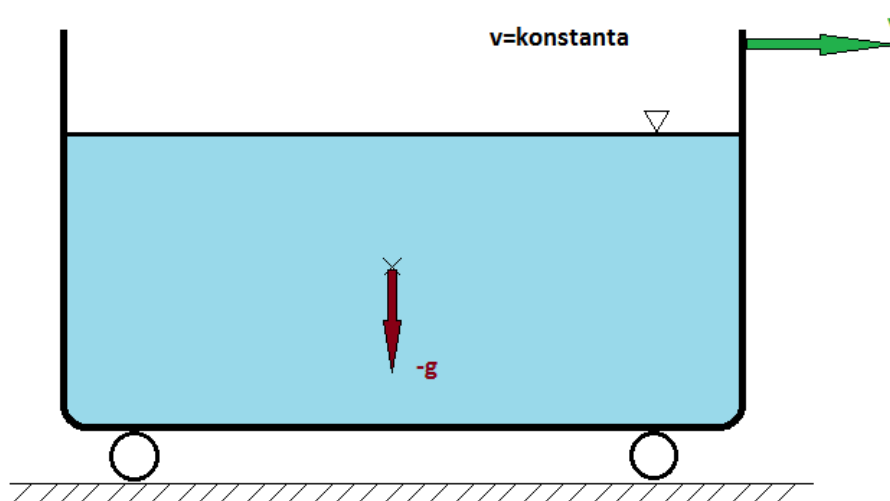
Síly působící na vozidlo při průjezdu zatáčkou:  $F_o$  – odstředivá síla [N],  $G$  – tíhová síla vozidla [N],  $F_z$  – reakční síla kola [N]

### 3 Vliv chování se kapalin při pohybu v cisterně

Za předpokladu, že cisterna se pohybuje po dráze, kde zanedbáme nerovnosti dráhy a odpružení vozidla pak kapalina, která se nachází v cisterně, může být v klidu nebo se přelévát z jedné části cisterny do druhé. Důsledkem přelévání může kapalina narážet na vnitřní stěny nádrže. Toto chování kapaliny ovlivňuje pohyb, jakým se cisternový vůz pohybuje.

#### 3.1 Rovnoměrný přímočarý pohyb

Kapalina, která je v klidu nebo při rovnoměrném přímočarém pohybu v cisterně je v relativním klidu vůči stěnám cisterny (obr. 10). Na kapalinu v klidu vůči stěnám působí pouze gravitační zrychlení a hladinová plocha je vodorovná.



Obr. 10 Schéma nádoby pohybující se rovnoměrným přímočarým pohybem

#### 3.2 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb ve vodorovné rovině

Na nádobu při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu působí hmotnostní síla a setrvačná síla (obr. 11). Ve směru proti pohybu působí setrvačné zrychlení  $-a$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]. [3]

Diferenciální rovnice hladinové plochy:

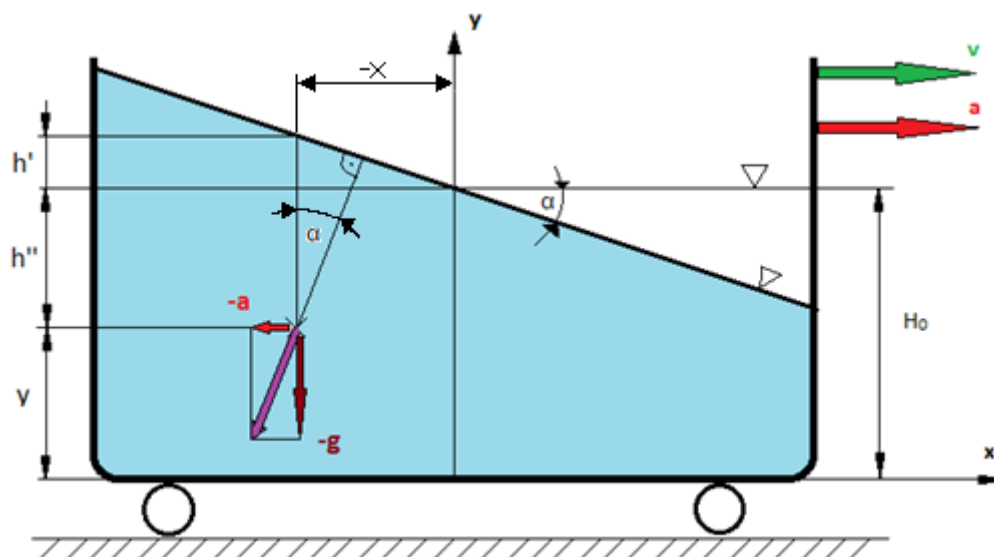
$$a_x dx + a_y dy = 0 \quad (9)$$

Kde:  $a_x = -a$  je setrvačné zrychlení ve směru osy  $x$

$a_y = -g$  je tíhové zrychlení ve směru osy  $y$

Všechna zrychlení dosadíme do rov.(9) a integruju:

$$-a dx - g dy = 0 \Rightarrow a \cdot x + g \cdot y = C \quad (10)$$



Obr. 11 Schéma nádoby pohybující se rovnoměrným přímočarým zrychleným pohybem

integrační konstanta  $C$  se určí z okrajové podmínky:

$$\text{pro: } x = 0 \quad \text{platí, že: } y = H_0$$

po dosazení:

$$C = a \cdot 0 + g \cdot H_0 \quad (11)$$

Rovnice hladinové plochy se určí dosazením rovnice (11) do rovnice (10):

$$ax + gy = gH_0$$

Po úpravě:

$$y = H_0 - \frac{a}{g} \cdot x \text{ [m]} \quad (12)$$

Sklon hladiny k vodorovné hladině při přímočarém zrychleném pohybu:

$$\text{tg} \alpha = \frac{a}{g} \text{ [m]} \quad (13)$$

Tlak kapaliny v libovolném místě:

$$dp = \rho \cdot (-adx - gdy)$$

Po integraci:

$$p = \rho \cdot (-a \cdot x - g \cdot y) + C \text{ [Pa]} \quad (14)$$

Integrační konstanta se určí z okrajové podmínky v místě  $x=0$  a současně  $y=H_0$  pak platí  $p=0 \text{ Pa}$ . Jelikož uvažujeme relativní tlak, po dosazení do rovnice (14) platí:

$$0 = \rho \cdot (-a \cdot 0 - g \cdot H_0) + C$$

po úpravě:

$$C = \rho \cdot g \cdot H_0 \quad (15)$$

Po dosazení do rovnice (14):

$$p = \rho \cdot (-ax - gy) + \rho \cdot g \cdot H_0 \text{ [Pa]} \quad (16)$$

Po úpravě:

$$p = \rho \cdot g \left( H_0 - \frac{a}{g} \cdot x - y \right) = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (17)$$

Protože:

$$h' = -x \cdot \operatorname{tg} \alpha = -\frac{a}{g} \cdot x \text{ [m]}$$
$$h'' = H_0 - y \Rightarrow p = \rho \cdot g \cdot (h' + h'') = \rho \cdot g \cdot h \text{ [m]} \quad (18)$$

### 3.3 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb na nakloněné rovině

V případě kdy se nádoba s kapalinou pohybuje po nakloněné rovině, působí vnější zrychlení  $a$  na kapalinu pod úhlem  $\varphi$  proto se rozkládá do obou os  $x$  a  $y$  případně do os  $x'$  a  $y'$  viz obr. 12. [4]

Úhly v silovém obrazci (viz obr. 13):

$\varphi$  – je úhel nakloněné roviny od vodorovné roviny

$\alpha$  – je sklon hladiny kapaliny v nádrži za pohybu od vodorovné hladiny

$\beta$  – je sklon hladiny za pohybu od nakloněné roviny, platí  $\beta = \alpha + \varphi$

Složky zrychlení:

$$a_x = -a \cdot \cos \varphi \quad a_y = -g - a \cdot \sin \varphi$$

$$a_{x'} = -a - g \cdot \sin \varphi \quad a_{y'} = -g \cdot \cos \varphi$$

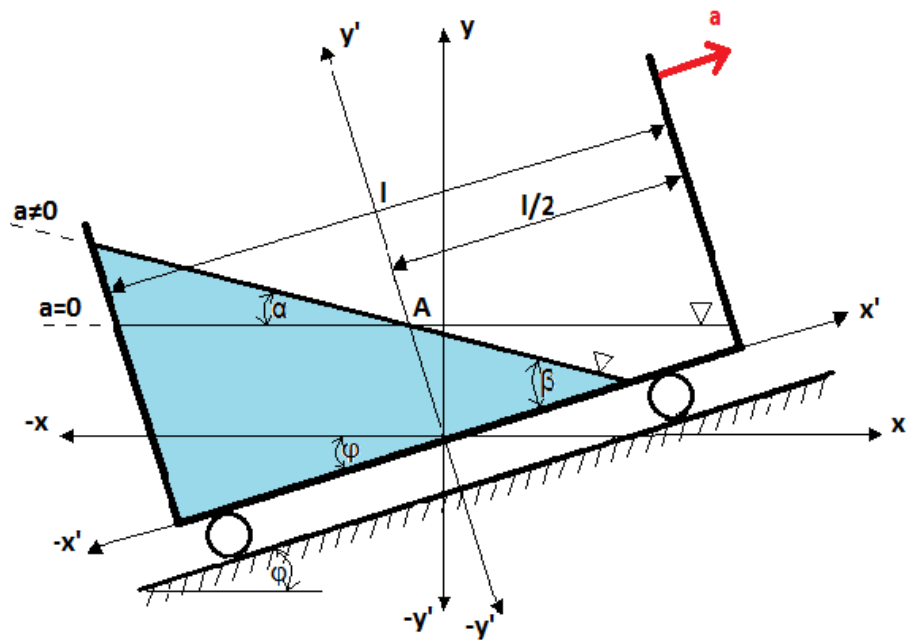
Sklon hladinových ploch:

- v souřadném systému  $y$ - $x$ :

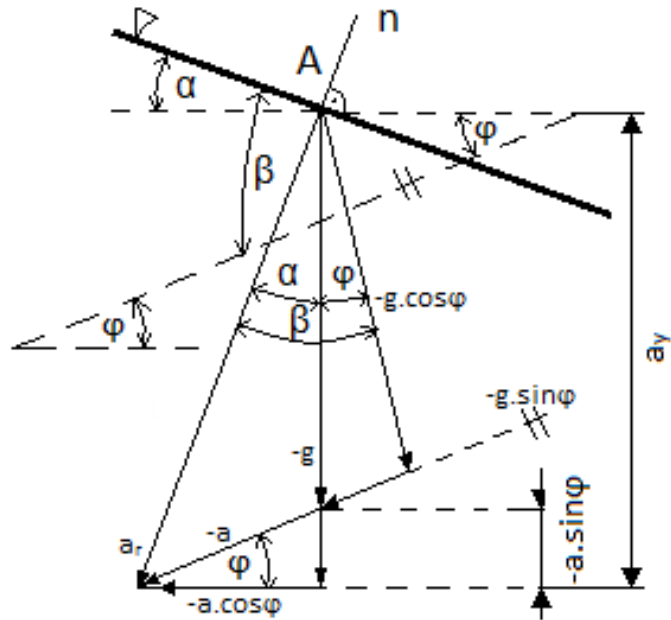
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_x}{a_y} = \frac{a \cdot \cos \varphi}{g + a \cdot \sin \varphi} \text{ [1]} \quad (19)$$

- v souřadném systému  $y'$ - $x'$  (ve směru pohybu):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a_{x'}}{a_{y'}} = \frac{a + g \cdot \sin \varphi}{g \cdot \cos \varphi} \text{ [1]} \quad (20)$$



Obr. 12 Schéma nádoby pohybující se rovnoměrným přímočarým zrychleným pohybem na nakloněné rovině



Obr. 13 Silový obrazec vycházející z bodu A

Úhly v silovém obrazci (viz obr. 13):

$\varphi$  – je úhel nakloněné roviny od vodorovné roviny

$\alpha$  – je sklon hladiny kapaliny v nádrži za pohybu od vodorovné hladiny

$\beta$  – je sklon hladiny za pohybu od nakloněné roviny, platí  $\beta = \alpha + \varphi$

Složky zrychlení:

$$a_x = -a \cdot \cos\varphi \quad a_y = -g - a \cdot \sin\varphi$$

$$a_{x'} = -a - g \cdot \sin\varphi \quad a_{y'} = -g \cdot \cos\varphi$$

Tlak v kapalině:

$$p = \rho \cdot g' \cdot h = \rho \cdot (g + a \cdot \sin\varphi) \cdot h \text{ [Pa]} \quad (21)$$

kde:  $h$  – je tlaková výška obecného bodu v kapalině  $A \in (x; y)$

$$h = H_0 - y - \frac{a \cdot \sin\varphi}{g} \cdot x \text{ [m]} \quad (22)$$

$g'$  – je tíhové zrychlení korigované o složku vnějšího zrychlení do směru svislého  $y$ :

$$a_y = -(g + a \cdot \sin\alpha) \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (23)$$

## 4 Síly působící na stěny cisterny a přepážky

Uvažujeme-li, že cisterna naplněná kapalinou je v klidu, pak na stěny a přepážky cisterny působí hydrostatický tlak, který se s rostoucí výškou hladiny kapaliny zvyšuje. Tlak na hladině je roven atmosférickému tlaku a tlak na dně cisterny je nevyšší. Velikost tlakové síly působící na stěny určíme z hydrostatického tlaku působící v těžišti plochy stěny. [3] [4]

### 4.1 Síla působící na stěnu cisterny

Pokud je cisterna zcela naplněná kapalinou, tak na stěnu cisterny působí tlaková síla v těžišti plochy a pak:

$$F = S \cdot p_T \text{ [N]} \quad (24)$$

kde:  $S$  – je smáčená plocha stěny [ $\text{m}^2$ ]

$p_T$  – je hydrostatický tlak působící v těžišti plochy [Pa]

Pak po dosazení za  $p_T$  dostanu:

$$p_T = \rho \cdot g \cdot h_T \text{ [Pa]} \quad (25)$$

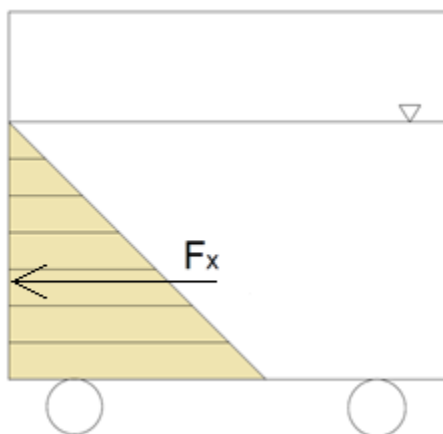
kde:  $\rho$  – je hustota kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$g$  – je gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

$h_T$  – je hloubka těžiště smáčené plochy od hladiny [m]

Po dosazení  $p_T$  do rovnice (24) dostanu:

$$F_x = S \cdot \rho \cdot g \cdot h_T \text{ [N]} \quad (26)$$



Obr. 14 Zatěžující obrazec působící na stěnu cisterny za klidu



## 4.2 Síla působící na boční stěnu cisterny

Působí síla působící na boční stěnu cisterny kruhového průřezu budeme uvažovat těžiště boku cisterny. Stanovení výsledné tlakové síly  $F$  určíme pomocí složkové metody, kdy sílu  $F$  rozdělíme do složek  $F_x$  a  $F_y$ . [3]

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ [N]} \quad (27)$$

Složková síly  $F_x$ :

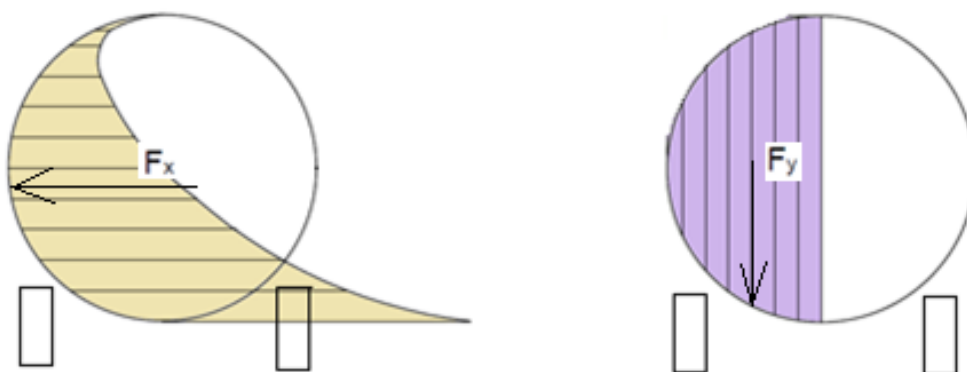
$$F_x = \rho \cdot g \cdot h_T \cdot S_x \text{ [N]} \quad (28)$$

kde:  $S_x$  – je průmět křivé plochy do svislé roviny [ $\text{m}^2$ ]

Složková síla  $F_y$ :

$$F_y = \rho \cdot g \cdot V_y \text{ [N]} \quad (29)$$

kde:  $V_y$  – je objem zatěžujícího obrazce v ose  $y$  [ $\text{m}^3$ ]



Obr. 15 Zatěžující obrazec cisterny v klidu zcela naplněna kapalinou vlevo v ose  $x$  a vpravo v ose  $y$

## 5 Výpočet chování kapaliny při vybraných jízdách na zvoleném vozidle

Pro výpočet chování přepravované kapaliny jsou zvoleny základní varianty jízdových situací:

1. brzdění na vodorovné rovině,
2. brzdění z kopce,
3. brzdění do kopce,
4. průjezd zatáčkou.

### Parametry zvoleného vozidla SCANIA:

#### Hmotnosti vozidla:

Hmotnosti vozidla uváděné výrobcem jsou v Tab. 1. Hmotnost cisterny s příslušenstvím je 3000 kg a hmotnost za různých naplnění cisterny kapalinou o hustotě  $\rho$  je  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  jsou uvedeny v Tab. 2. Hmotnost cisterny je závislá na druhu přepravované kapaliny, které mají odlišné hustoty. Vybrané hustoty často přepravovaných kapaliny za teploty  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  jsou uvedeny v Tab. 3.

Hmotnost	[kg]
Hmotnost nezatíženého vozidla	11625
Hmotnost plně zatíženého vozidla	26625

Tab. 1 Hmotnosti vozidla

Hmotnost	[kg]
Hmotnost nezatíženého vozidla	11625
Hmotnost zatíženého vozidla z 25%	15375
Hmotnost zatíženého vozidla z 50%	19125
Hmotnost zatíženého vozidla z 75%	22875
Hmotnost plně zatíženého vozidla	26625

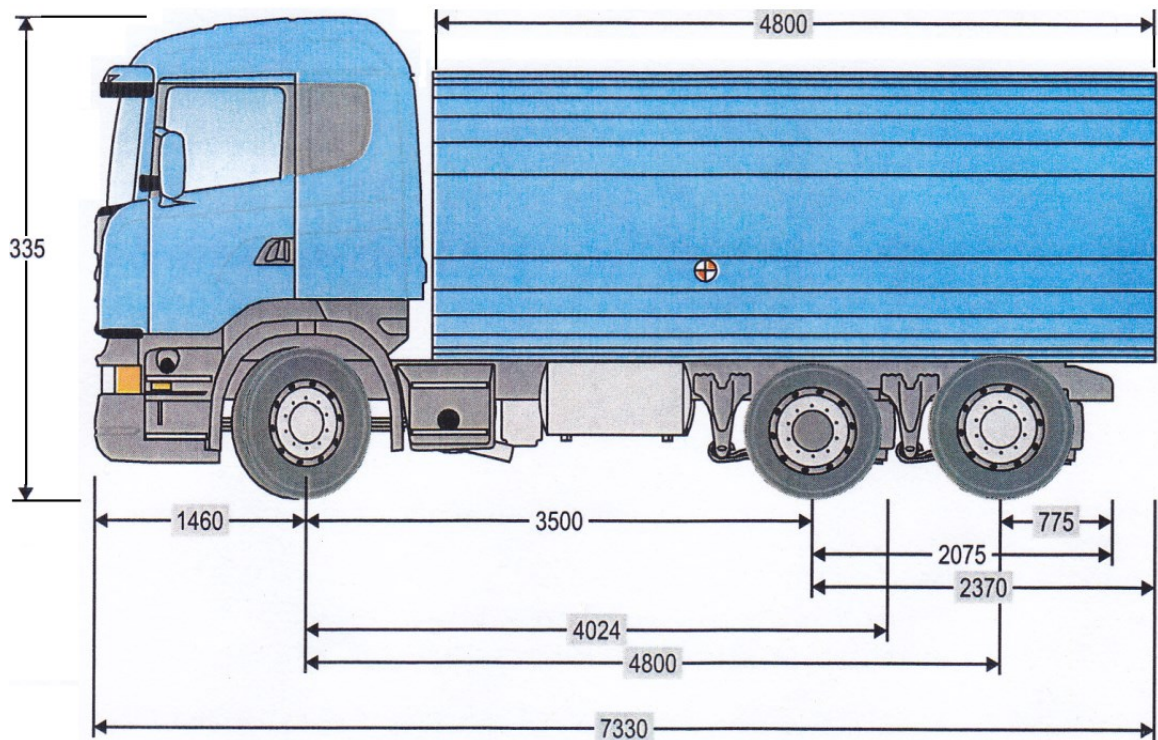
Tab. 2 Hmotnosti vozidla při různých naplnění cisterny kapalinou o hustotě  $\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Hustota	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
benzín	700-750
nafta	800-880
mléko	1027-1032
voda	998
potravinářské oleje	910-923

Tab. 3 Hustoty kapalin za teploty 20°C [10] [11] [12]

### Rozměry vozidla:

Rozchod kol vnějších stran pneumatik: 2500 mm



Obr. 16 Rozměry cisternového vozidla (rozměry v mm)

### Parametry cisterny:

Cisterna má tvar válce o objemu 15000 l vnitřního průměr 2 m a vnitřní délka cisterny je 4,7746 m.

### Součinitelé soudržnosti:

Součinitelé soudržnosti neboli součinitel adheze mezi různými povrchy a pneumatikou nákladního vozidla (viz Tab. 4), udává maximální hodnotu součinitele obvodové síly, která určuje maximální obvodovou hnací či brzdovou sílu, kterou je schopno kolo vozidla přenést.[1]

Součinitel adheze	$\mu$ [1]
Suchý beton	0,9
Suchý asfalt	0,8
Suchá dlažba	0,7
Mokrý beton	0,6
Mokrý asfalt	0,5
Mokrá dlažba	0,4
zablácený beton, asfalt	0,3
uježděný sníh	0,2
led	0,1

Tab. 4 součinitel adheze pro různé typy povrchů [1]

## 5.1 Výpočet síly působící na stěnu cisterny při brzdění

Výstupem tohoto výpočtu chci zjistit hodnoty síly působící na stěnu cisterny při různých zpomaleních. Nejprve je potřeba zjistit velikost zpomalení, které je cisternové vozidlo schopné dosáhnout při rovnoměrném brzdění za zvolené konstantní brzdě síly.

### 5.1.1 Brzdění na vodorovné rovině

Pro výpočet brzdění uvažuju pohyb rovnoměrně zrychlený, dále budu vycházet ze zákona o zachování energie, kde  $E_k$  je kinetická energie cisternového vozidla a  $W$  je práce brzdě síly na brzdě dráze:

$$W = E_k \quad (30)$$

Práce vykonaná při brzdění:

$$W = F_B \cdot s \text{ [J]} \quad (31)$$

Kde:  $F_B$  – brzdě síla [N],  $s$  – brzdě dráha [m]

Kinetická energie cisternového vozidla:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \text{ [J]} \quad (32)$$

Kde:  $m$  – je hmotnost vozidla [kg],  $v_0$  – je rychlost vozidla na začátku brzdění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Po dosazení (31) a (32) do rovnice (30) dostanu:

$$F_B \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \quad (33)$$

a z této rovnice si vyjádřím dráhu  $s$ :

$$s = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot F_B} \text{ [m]} \quad (34)$$

Dále vím, že dráha pro rovnoměrně zrychlený pohyb je:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \text{ [m]} \quad (35)$$

kde:  $a$  – je zrychlení při brzdění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  $t$  – je čas do zastavení [s]

čas  $t$  pro rovnoměrně zrychlený pohyb je:

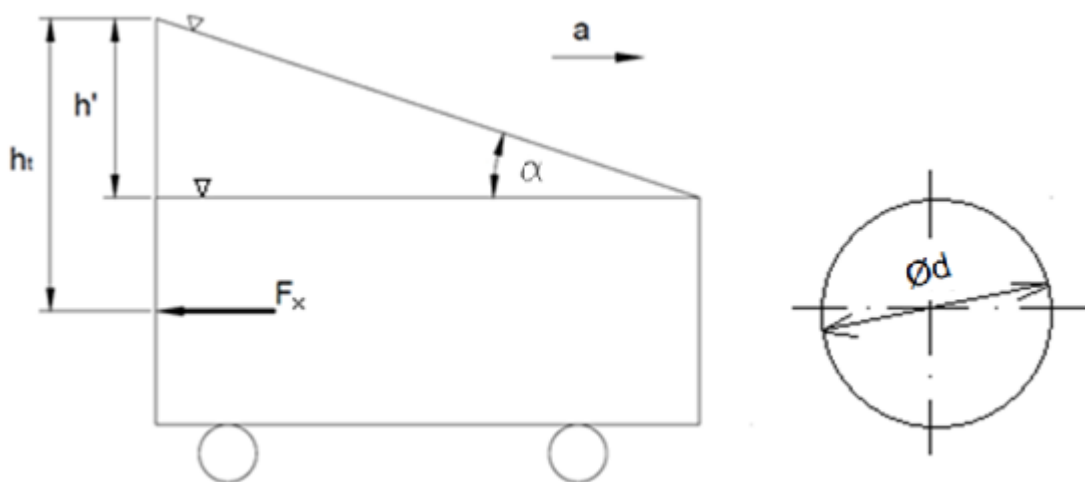
$$t = \frac{v_0}{a} \text{ [s]} \quad (36)$$

dosazením rovnice (36) do rovnice (35) a následným vyjádřením zrychlení  $a$  získám rovnici pro rovnoměrně zrychlený pohyb při brzdění:

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot s} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (37)$$

Nyní když znám s jakým zpomalením je cisternové vozidlo schopno zpomalovat, můžu určit naklonění hladinové plochy  $\alpha$  vůči hladinové ploše v cisterně za klidu nebo za rovnoměrně přímočarého pohybu tedy  $a=0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ :

$$\text{tg} \alpha = \frac{a}{g} \text{ [1]} \quad (38)$$



Obr. 17 Zcela naplněná cisterna při brzdění na vodorovné rovině

Síla  $F_x$ , která působí na stěnu, vypočtu pomocí vztahu:

$$F_x = \rho \cdot g \cdot h_T \cdot S \text{ [N]} \quad (39)$$

výšku těžiště  $h_T$  od hladinové plochy v nejvyšším bodě určím podle vztahu:

$$h_T = h' + \frac{d}{2} \text{ [m]} \quad (40)$$

Dále potřebuji znát výšku  $h'$ :

$$h' = l \cdot \text{tg} \alpha \text{ [m]} \quad (41)$$

a nakonec potřebuji znát plochu  $S$ , na kterou působí síla  $F_x$ :

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^2] \quad (42)$$

### 5.1.2 Brzdění na nakloněné rovině

Řešení tohoto případu je obdobné jak brzdění na vodorovné rovině s tím, že se k působící brzdě síle  $F_B$  buď odečte, nebo přičte odpor proti stoupání  $O_S$ . Při brzdění z kopce se od brzdě síly odečte odpor proti stoupání a při brzdění do kopce se odpor proti stoupání přičte.

Postup řešení tedy bude vypadat takto:

$$W = E_k \quad (43)$$

Práce vykonaná při brzdění:

$$W = (F_B \pm O_S) \cdot s [J] \quad (44)$$

Kinetická energie cisternového vozidla:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 [J] \quad (45)$$

Po dosazení rovnice (44) a (45) do rovnice (43) dostanu:

$$(F_B \pm O_S) \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \quad (46)$$

a z této rovnice si vyjádřím dráhu  $s$ :

$$s = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot (F_B \pm O_S)} [m] \quad (47)$$

Dále vím, že dráha pro rovnoměrně zrychlený pohyb je:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 [m] \quad (48)$$

a čas  $t$  pro rovnoměrně zrychlený pohyb je:

$$t = \frac{v_0}{a} [s] \quad (49)$$

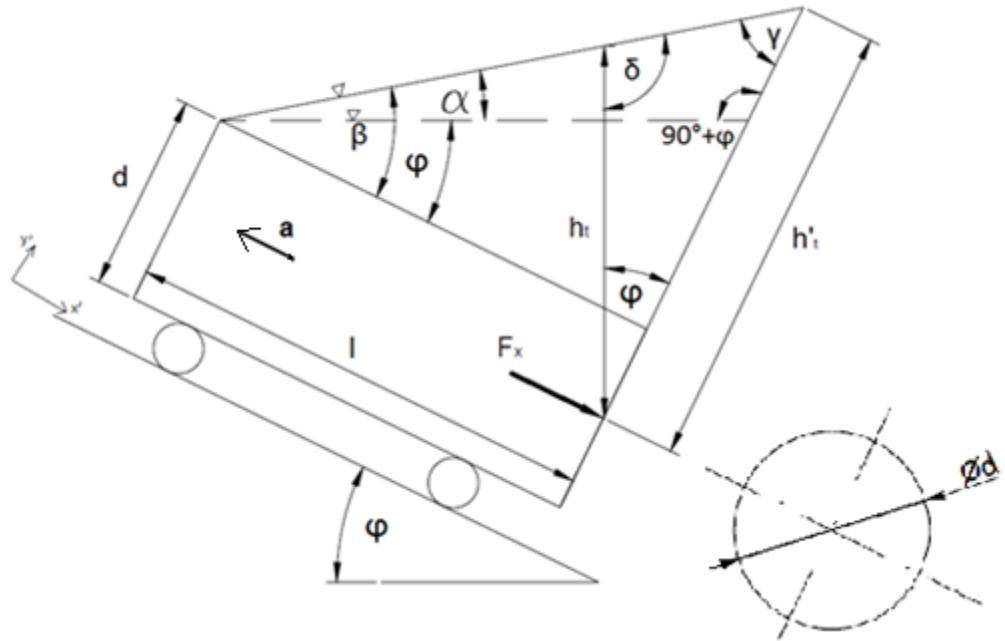
dosazením rovnice (49) do rovnice (48) a následným vyjádřením zrychlení  $a$  získám rovnici pro rovnoměrně zrychlený pohyb při brzdění

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot s} [m \cdot s^{-2}] \quad (50)$$

Sílu  $F_x$  při brzdění z kopce počítám do směru pohybu podle vztahu:

$$F_x = \rho \cdot (g + a \cdot \sin\varphi) \cdot h_T \cdot S [N] \quad (51)$$

kde:  $h_T$  – je výška těžiště od hladinové plochy [m]



Obr. 18 Zcela naplněná cisterna při brzdění z kopce

Sklon hladiny vůči souřadnému systému  $y' - x'$  (viz obr. 18):

$$tg\beta = \frac{a + g \cdot \sin\varphi}{g \cdot \cos\varphi} \quad [1] \quad (52)$$

Výšku těžiště  $h_T$  od hladinové plochy určím:

$$h_T = \frac{h'_T \cdot \sin\gamma}{\sin\delta} \quad [m] \quad (53)$$

kde úhel  $\gamma$  a  $\delta$  (viz obr. 18) dopočítám:

$$\gamma = 180 - (\varphi + 90) - \alpha \quad (54)$$

$$\delta = 180 - \gamma - \varphi \quad (55)$$

a  $h'_T$  vypočtu podle:

$$h'_T = \frac{d}{2} + l \cdot tg\beta \quad [m] \quad (56)$$

sílu  $F_x$  při brzdění do kopce ve směru pohybu vypočtu:

$$F_x = \rho \cdot (g - a \cdot \sin\varphi) \cdot h_T \cdot S \quad [N] \quad (57)$$

Sklon hladiny vůči souřadnému systému  $y - x$  (viz obr. 19):

$$tg\alpha = \frac{a \cdot \cos\varphi}{g - a \cdot \sin\varphi} \quad [1] \quad (58)$$

Výšku těžiště  $h_T$  od hladinové plochy určím:

$$h_T = \frac{(h' + \frac{d}{2}) \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{\sin\lambda} \quad [m] \quad (59)$$

a  $h'$  vypočtu podle:

$$h' = \frac{l' \cdot \sin \alpha}{\sin \delta} [m] \quad (60)$$

Délku  $l'$  vypočtu podle:

$$l' = \frac{l}{\cos \varphi} [m] \quad (61)$$

kde úhel  $\gamma$ ,  $\delta$  a  $\lambda$  (viz obr. 19) dopočítám:

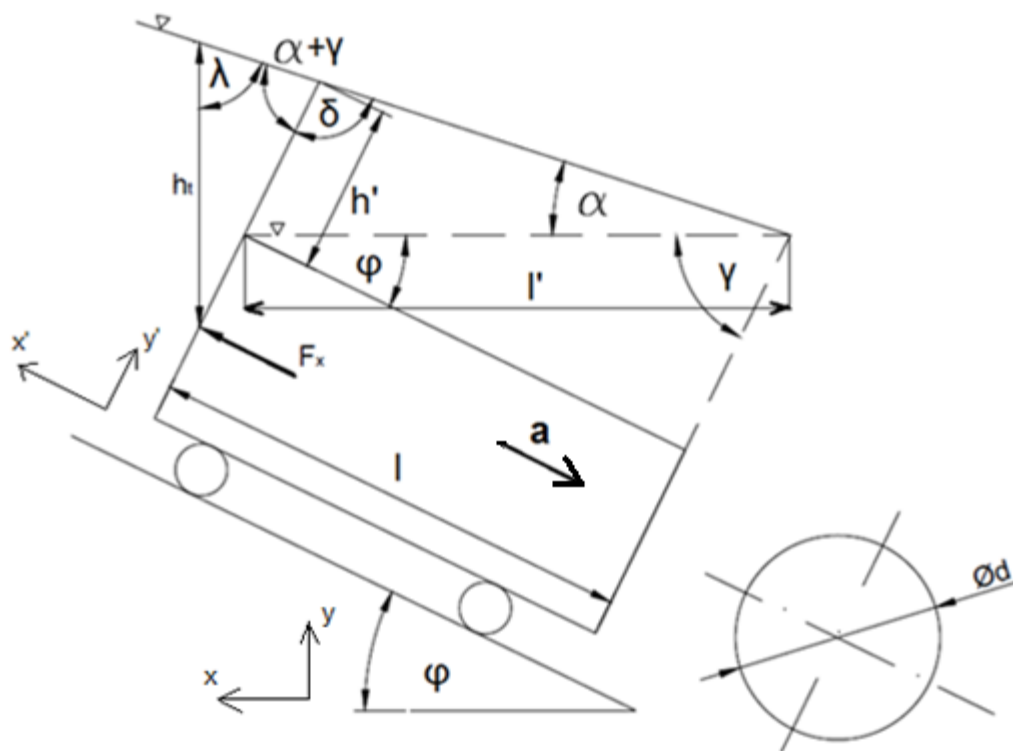
$$\gamma = 180 - \varphi - 90 \quad (62)$$

$$\delta = 180 - \alpha - \gamma \quad (63)$$

$$\lambda = 180 - (\alpha + \gamma) - \varphi \quad (64)$$

Polochu  $S$  vypočtu podle:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^2] \quad (65)$$



Obr. 19 Zcela naplněná cisterna při brzdění do kopce

## 5.2 Výpočet síly působící na bok stěny cisterny při průjezdu zatáčkou

Výstupem tohoto výpočtu chcí zjistit hodnoty síly působící na bok stěny cisterny při různých odstředivých zrychlení. Nejprve potřebuji zjistit velikost odstředivého zrychlení, které je cisternové vozidlo schopné dosáhnout při průjezdu zatáček o různých poloměrech a za různých rychlostí.



### a) Mezní stav smyku vozidla

Odstředivá síla

$$F_o = \frac{m \cdot v^2}{R} [N] \quad (66)$$

kde:  $m$  – je hmotnost vozidla [kg],  $v$  – je rychlost vozidla [ $m \cdot s^{-1}$ ],  $R$  – je poloměr zatáčky [m].

Součinitel boční soudržnosti

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} [1] \quad (67)$$

kde:  $F_y$  – je třecí síla [N],  $F_z$  – je reakční síla [N]

Podmínka bočního smyku

$$F_o \leq \mu_y \cdot G [N] \quad (68)$$

po dosazení za  $F_o$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \leq \mu_y \cdot m \cdot g \quad (69)$$

Dostanu maximální rychlost, kterou může cisternové vozidlo projet zatáčkou o poloměru  $R$ , aniž by se vůz dostal do smyku.

$$v_{max} = \sqrt{\mu_y \cdot g \cdot R} [m \cdot s^{-1}] \quad (70)$$

### b) Mezní stav převrácení vozidla

Aby nedošlo k převrácení vozidla, musí být splněna podmínka:

$$F_o \cdot h_T \leq G \cdot l_z \quad (71)$$

kde:  $h_T$  – je výška těžiště od vozovky [m],  $l_z$  – je příčná vzdálenost těžiště od bodu překlopení  $P$  [m]

po dosazení za  $F_o$ :

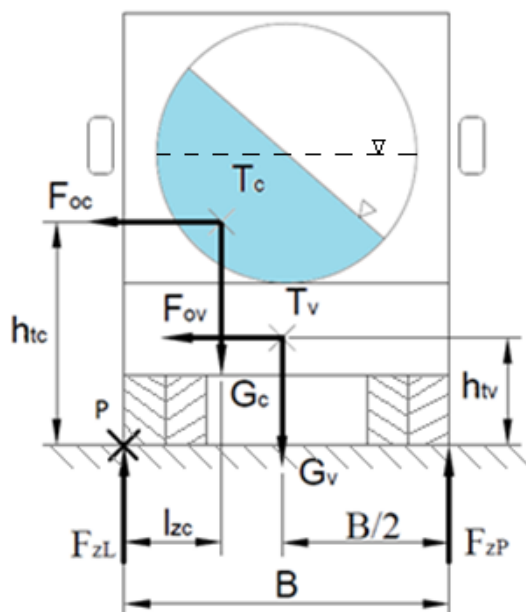
$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot h_T \leq m \cdot g \cdot l_z \quad (72)$$

získám:

$$\frac{v^2}{g \cdot R} \leq \frac{l_z}{h_T} \quad (73)$$

$$v_{max} \leq \sqrt{\frac{l_z \cdot g \cdot R}{h_T}} [m \cdot s^{-1}] \quad (74)$$

Získal jsem maximální rychlost cisternového vozidla, kterou může projet zatáčku o poloměru  $R$ , aniž by se vůz překlopil.



Obr. 20 posunutí celkového těžiště částečně naplněného cisternového vozidla při průjezdu zatáčkou

Nebo vyjádřením poloměru  $R$  zjistím maximální poloměr zatáčky, kterou může cisternové vozidlo projet za zvolené rychlosti

$$R_{max} \geq \frac{v^2 \cdot h_T}{l_z \cdot g} [m] \quad (75)$$

Odstředivé zrychlení cisternového vozidla při průjezdu zatáčkou zjistím podle vztahu:

$$a = \frac{v^2}{R} [m \cdot s^{-2}] \quad (76)$$

Souřadnice těžiště pro různá zrychlení zjistím z náklonu hladinové plochy. Zvolením libovolného poloměru zatáčky pro mnou zvolenou rychlost dosazením do rovnice (76) a odtud vypočtu odstředivé zrychlení. Dopočítám úhel náklonu hladinové plochy dosazením do rovnice:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g} [1] \quad (77)$$

Dále potřebuji znát vzdálenost těžiště kruhové úseče průřezu cisterny od jejího těžiště pro mnou zvolené naplnění cisterny kapalinou. Zjištění této vzdálenosti jsem řešil graficky pomocí programu AutoCAD.

příčnou vzdálenost těžiště  $l_z$  od bodu překlopení vypočtu pomocí vztahu:

$$l_z = \frac{B}{2} - r_t \cdot \sin \alpha [m] \quad (78)$$

a výšku těžiště od vozovky vypočtu podle:

$$h_T = H - r_t \cdot \cos \alpha [m] \quad (79)$$

Když už jsou známy souřadnice těžiště v kapalině při průjezdu zatáčkou při různých odstředivých zrychleních, vyjádřím z momentové rovnice rovnováhy cisternového vozidla k bodu překlopení  $P$  (viz obr. 20) poloměr zatáčky  $R$ :

$$F_{Oc} \cdot h_{Tc} + F_{Ov} \cdot h_{Tv} \leq G_c \cdot l_{zc} + G_v \cdot \frac{B}{2} \quad (80)$$

Dosazením za odstředivé síly  $F_O$  a tíhu  $G$  dostanu:

$$\frac{m_c \cdot v^2}{R} \cdot h_{Tc} + \frac{m_v \cdot v^2}{R} \cdot h_{Tv} \leq m_c \cdot g \cdot l_{zc} + m_v \cdot g \cdot \frac{B}{2} \quad (81)$$

Kde:  $m_c$  – je hmotnost naplnění cisterny [kg],  $m_v$  – je hmotnost vozidla [kg],  $h_{Tc}$  – je výška těžiště kapaliny v cisterně od vozovky [m],  $h_{Tv}$  – je výška těžiště vozidla od vozovky [m],  $l_{zc}$  – je příčná vzdálenost těžiště naplnění cisterny od bodu překlopení  $P$  [m],  $B$  – je rozchod kol od vnějších stran pneumatik [m],  $l_{zv}$  – příčná vzdálenost těžiště vozidla  $B/2$  [m].

Vyjádřením  $R$  získáme maximální poloměr zatáčky, kterou může cisternové vozidlo projet, aniž by se převrátilo:

$$R = \frac{v^2(m_c \cdot h_{Tc} + m_v \cdot h_{Tv})}{m_c \cdot g \cdot l_{zc} + m_v \cdot g \cdot l_{zv}} [m] \quad (82)$$

Síla  $F_x$ , která působí na bok cisterny, vypočtu pomocí vztahu:

$$F_x = \rho \cdot g \cdot h_T \cdot S_x [N] \quad (83)$$

A výšku těžiště  $h_T$  od hladinové plochy v nejvyšším bodě (viz obr. 21) vypočtu podle vztahu:

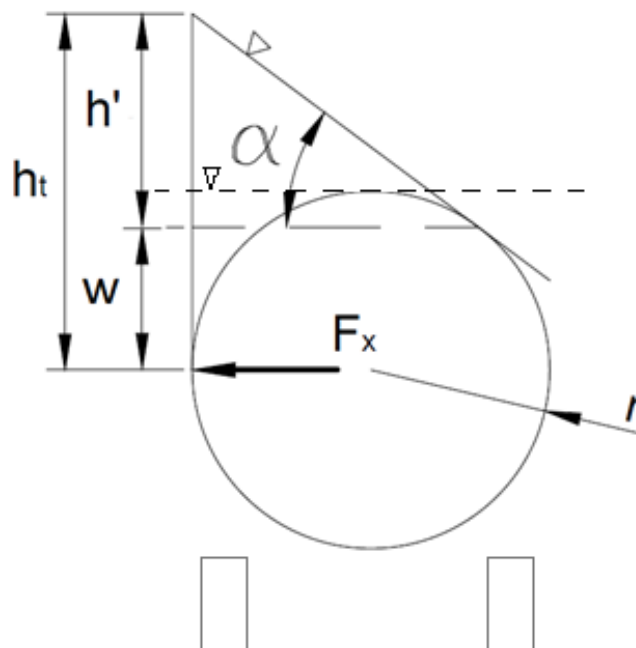
$$h_T = h' + w = tg\alpha \cdot (r + r \cdot \sin\alpha) + \cos\alpha \cdot r [m] \quad (84)$$

Kde:  $r$  – je poloměr cisterny [m]

a nakonec potřebuji znát plochu  $S_x$ , která je průmět křivé plochy do svislé roviny na kterou působí síla  $F_x$ :

$$S_x = l \cdot d [m^2] \quad (85)$$

Kde:  $l$  – je délka cisterny (komory mezi přepážkami) [m],  $d$  – je průměr válcové cisterny [m].



Obr. 21 síla působící na bok cisterny při průjezdu zatáčkou

## 5.3 Aplikace výpočtu na mnou zvoleném cisternovém vozidle a cisterny

V této části použiji zvolené parametry cisternového vozidla a cisterny pro výpočet síly kapaliny působící na stěny cisterny při zvolených základních jízdních situacích. Výpočty byly provedeny v rozsahu rychlostí (5 – 90) km·hod<sup>-1</sup> z důvodu omezovače rychlosti, který zabraňuje překročení maximální rychlosti povolené pro nákladní vozidla.

### 5.3.1 Brzdění

Při brzdění budu uvažovat pohyb rovnoměrně zrychlený a konstantní brzdou sílu  $F_B$ , která je 91233 N, je to maximální brzdná síla prázdného vozidla, kterou může cisternový vůz brzdít, aniž by došlo ke smyku kol. V brzdě síle neuvažuji válivý odpor pneumatik, odpor vzduchu a odpor setrvačnosti rotujících hmot. Vozidlo má maximální hmotnost a povrch vozovky je suchý asfalt. Počáteční rychlost při brzdění volím 50 km·hod<sup>-1</sup>.

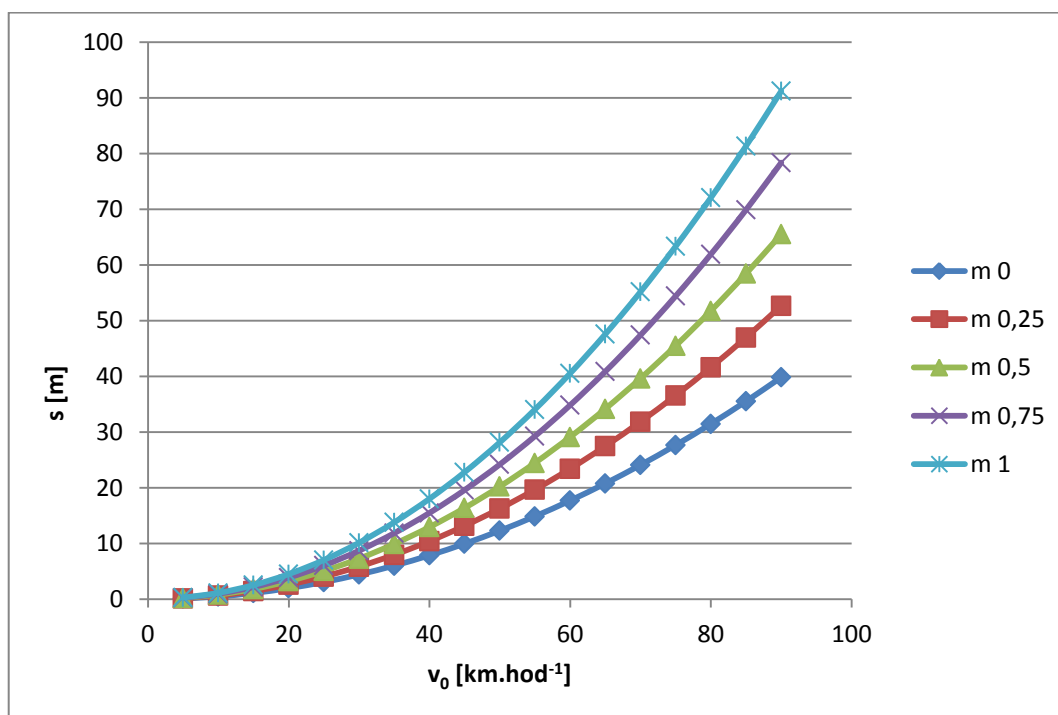
#### Výpočet brzdění na vodorovné vozovce:

Výpočet brzdné dráhy:

$$s = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot F_B} = \frac{26625 \cdot 13,89^2}{2 \cdot 91233} = 28,15 \text{ m}$$

Výpočet zpomalení:

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot s} = \frac{13,89^2}{2 \cdot 30,21} = 3,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



Obr. 22 Závislost brzděné dráhy na počáteční rychlosti na vodorovné rovině při různých naplnění cisterny

Z obr. 22 je patrné, že s rostoucí počáteční rychlostí roste brzděná dráha cisternového vozidla a to za předpokladu, že se jedná o suchou vozovku z asfaltu. Jelikož brzděná dráha závisí na hmotnosti vozidla, viz rovnice (34) je z obr. 22 zřejmé, že s plnější cisternou lze zastavit na delší dráze než s prázdnou. V legendě na daném obrázku je znázorněna hmotnost jako  $m_0=11625$  kg tedy prázdná cisterna,  $m_{0,5}=19125$  kg je poloviční naplnění cisterny a  $m_1=26625$  kg je plná cisterna.

### Výpočet brzdění z kopce:

Velikost stoupání je 7%, to odpovídá úhlu sklonu vozovky  $3,15^\circ$

Výpočet odporu proti stoupání (viz vzorec 2):

$$O_s = G \cdot \sin\varphi = (m \cdot g) \cdot \sin\varphi = (26625 \cdot 9,81) \cdot \sin 3,15$$

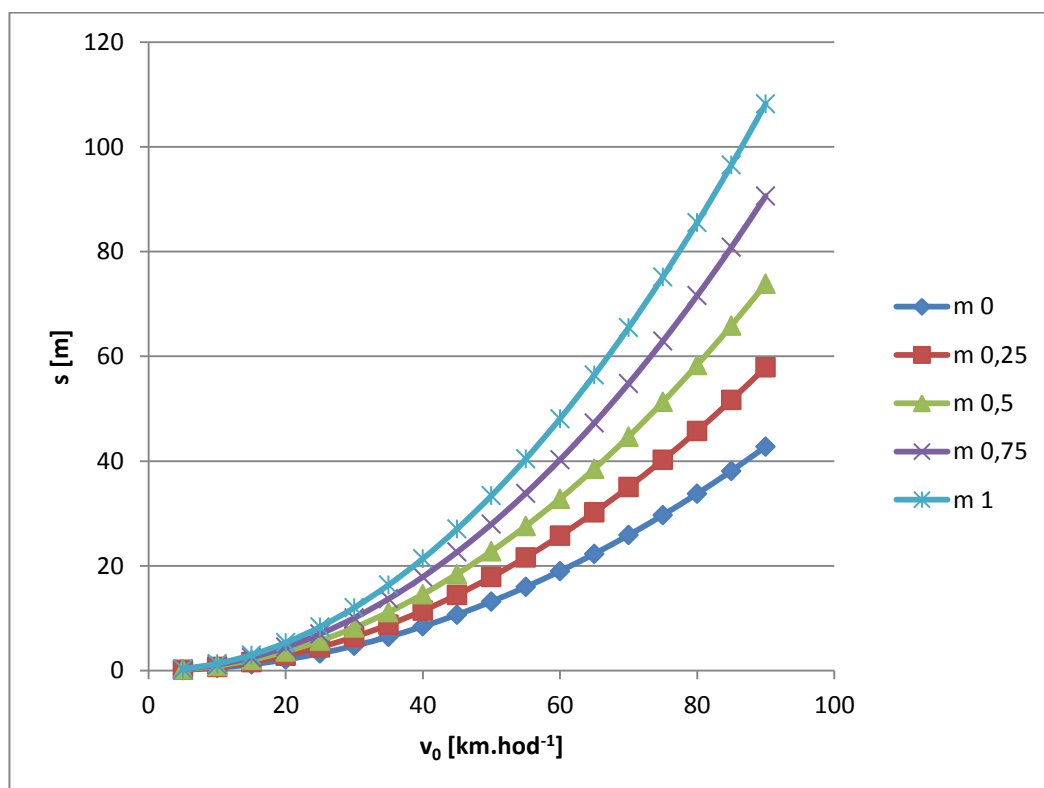
$$O_s = 14352,51 \text{ N}$$

Výpočet brzděné dráhy:

$$s = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot (F_B - O_s)} = \frac{26625 \cdot 13,89^2}{2 \cdot (91233 - 14352,51)} = 33,41 \text{ m}$$

Výpočet zpomalení:

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot s} = \frac{13,89^2}{2 \cdot 33,41} = 2,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



Obr. 23 Závislost brzdné dráhy na počáteční rychlosti při brzdění do kopce při různých naplnění cisterny

Na obr. 23 lze opět vidět, že s rostoucí počáteční rychlostí cisternového vozidla roste brzdná dráha na stejném povrchu a to suchém asfaltu jak u případu na obr. 22 s tím rozdílem, že vozidlo se nepohybuje na vodorovné rovině. V tomto případě vozidlo brzdí z počáteční rychlosti na nakloněné rovině směrem do kopce. Brzdná dráha je v tomto případě kratší, než u brzdění na vodorovné rovině i za stejné brzdné síly  $F_B$  a při stejných hmotnostech naplnění cisterny. Toto zkrácení brzdné dráhy je zapříčiněno přičtením odporu proti stoupání  $O_s$  k brzdné síle  $F_B$ .

### Výpočet brzdění do kopce:

Velikost stoupání je stejná jak při výpočtu brzdění z kopce, tak při výpočtu brzdění do kopce z důvodu porovnání výsledku za stejného náklonu vozovky.

Výpočet odporu proti stoupání (viz vzorec 2):

$$O_s = G \cdot \sin\varphi = (m \cdot g) \cdot \sin\varphi = (26625 \cdot 9,81) \cdot \sin 3,15$$

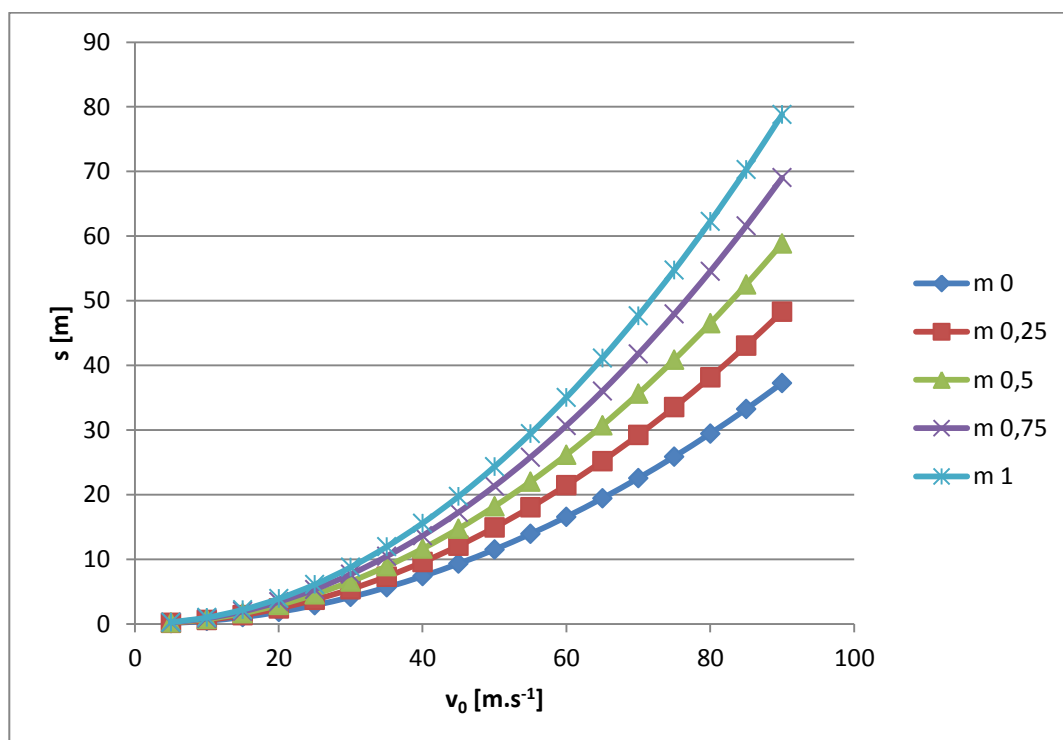
$$O_s = 14352,51 \text{ N}$$

Výpočet brzdné dráhy:

$$s = \frac{m \cdot v_0^2}{2 \cdot (F_B + O_s)} = \frac{26625 \cdot 13,89^2}{2 \cdot (91233 + 14352,51)}$$
$$s = 24,33 \text{ m}$$

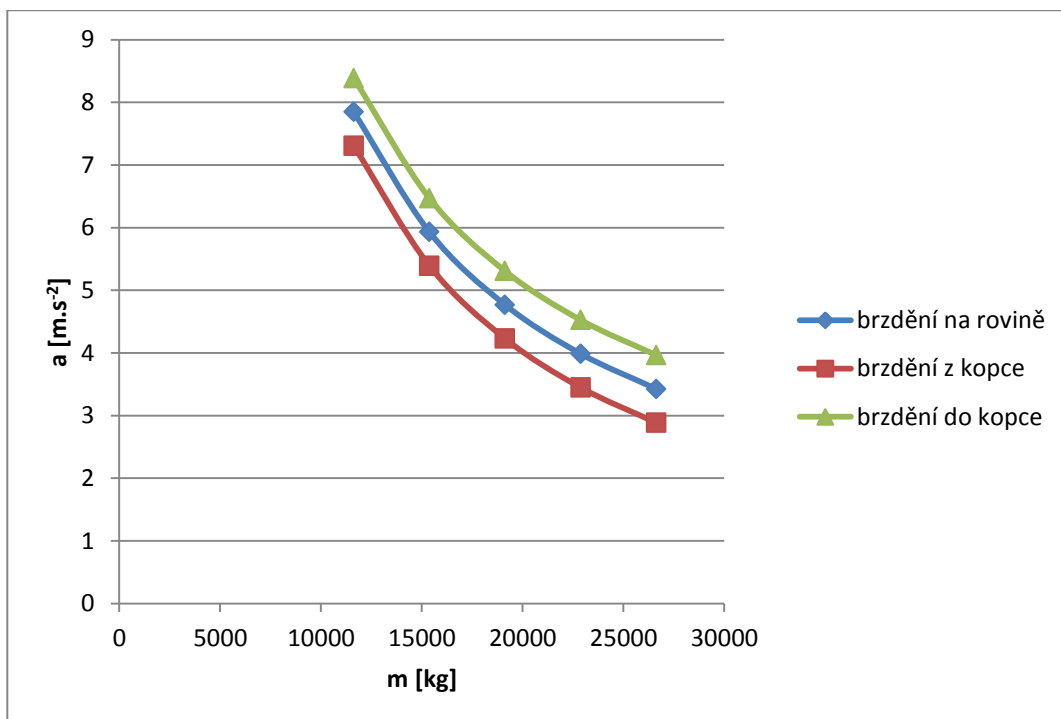
Výpočet zpomalení:

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot s} = \frac{13,89^2}{2 \cdot 24,33} = 3,96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$



Obr. 24 Závislost brzdné dráhy na počáteční rychlosti při brzdění z kopce při různých naplnění cisterny

Z obr. 24 je vidět, že s rostoucí počáteční rychlostí roste brzdná dráha vozidla a to za předpokladu, že se jedná o suchý asfalt. V tomto případě vozidlo brzdí na nakloněné rovině směrem z kopce. Brzdná dráha vozidla je při brzdění z kopce delší, než v porovnání s brzdou dráhou při brzdění vozidla na vodorovné vozovce. Toto prodloužení brzdné dráhy je zapříčiněno odečtením odporu proti stoupání  $O_s$  od brzdné síly  $F_B$  viz rovnice (47).



Obr. 25 Závislost zpomalení na hmotnosti cisternového vozidla při různých naklonění vozovky

Na obr. 25 je patrné, že s rostoucí hmotností cisternového vozidla klesá jeho zpomalení. Na daném obrázku jsou porovnávány situace, kdy se vozidlo pohybuje na různých sklonech vozovky. Pro brzdění z kopce nebo do kopce je zvoleno stejné stoupání pod úhlem  $\varphi=3,15^\circ$  a stejná brzdná síla  $F_B$  pro všechny situace.

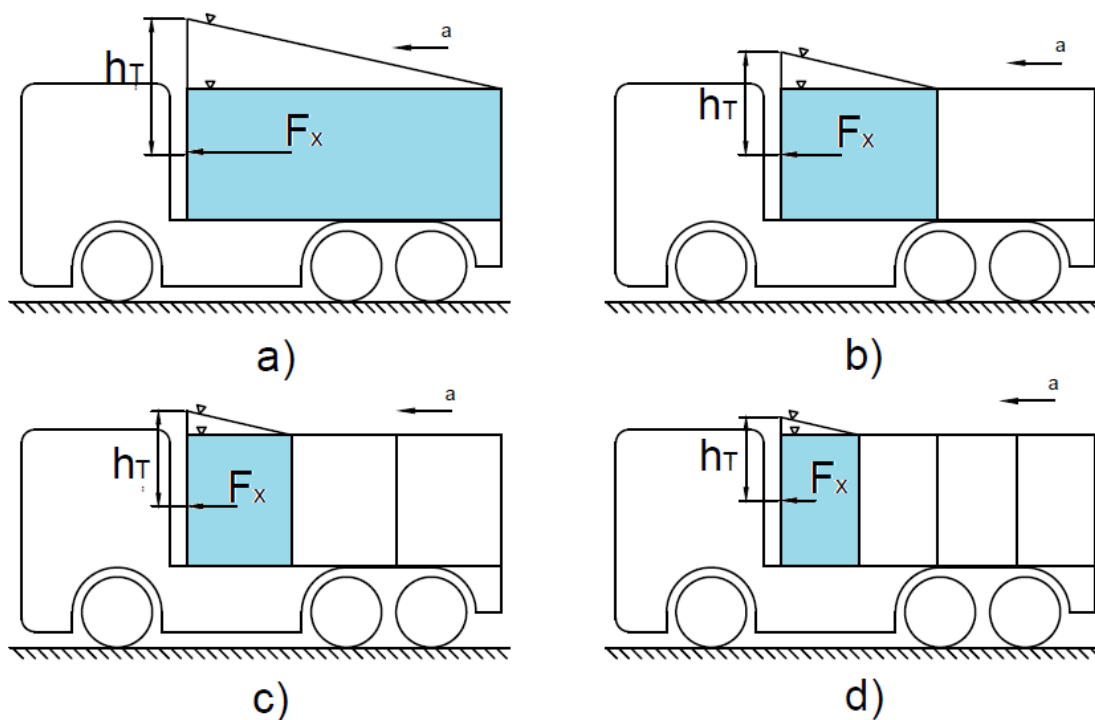
#### **Výpočet působící síly na stěnu cisterny při brzdění na vodorovné rovině:**

Výpočet je proveden pro zrychlení  $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  a cisterna je zcela naplněna kapalinou. Další hodnoty jsou uvedeny v příloze F.

#### **Varianta cisterny s přepážkami:**

Pro snížení síly působící na stěnu cisterny při zpomalení lze použít přepážky, které zapříčiní zkrácení délky prostoru vyplněnou kapalinou a výšky působíště těžiště  $h_T$  od hladinové plochy, což má za příčinu pokles síly  $F_x$  působící na stěnu cisterny.





Obr. 26 Cisterna s použitím přepážek: a) cisterna bez přepážek, b) cisterna s jednou přepážkou, c) cisterna s dvěma přepážkami, d) cisterna s třemi přepážkami

Výpočet sklonu hladinové plochy:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{a}{g} = \operatorname{arctg} \frac{3,5}{9,81} = 19,64^\circ$$

Výpočet výšky  $h'$  (viz obr. 17):

$$h' = l \cdot \operatorname{tg} \alpha = 4,7746 \cdot \operatorname{tg} 19,64$$

$$h' = 1,704 \text{ m}$$

Výpočet výšky působíště těžiště od hladinové plochy  $h_T$ :

$$h_T = h' + \frac{d}{2} = 1,704 + \frac{2}{2}$$

$$h_T = 2,704 \text{ m}$$

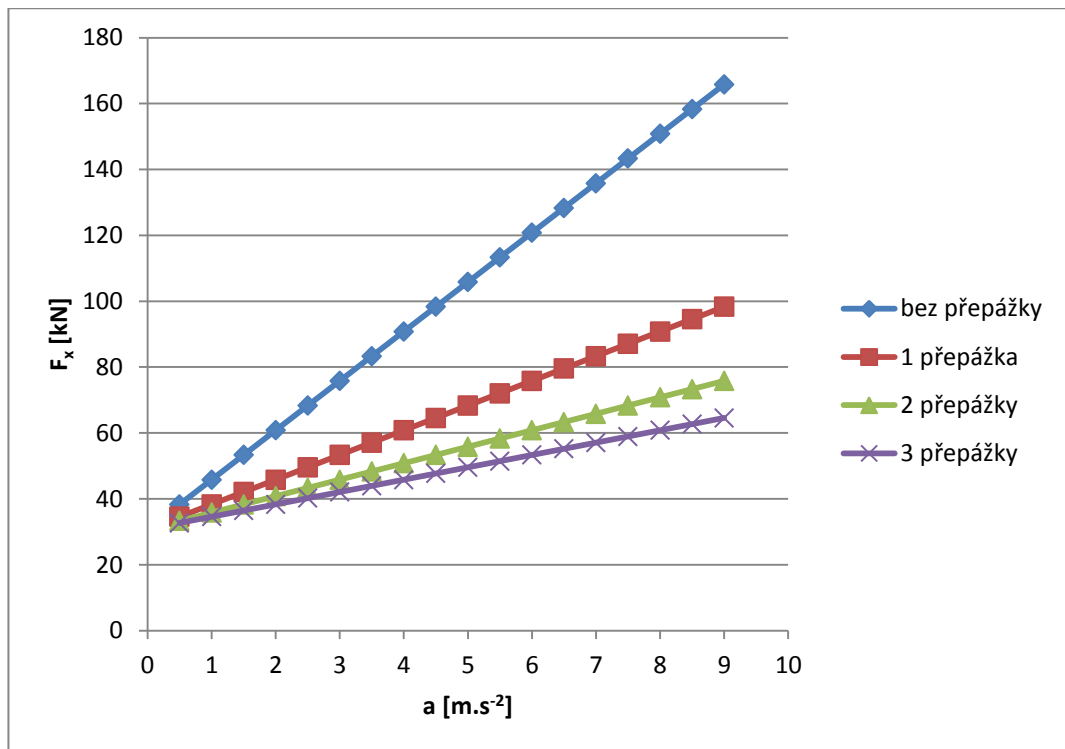
Výpočet plochy stěny cisterny:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,142 \text{ m}^2$$

Výpočet síly působící na stěnu cisterny:

$$F_x = \rho \cdot g \cdot h_T \cdot S = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,704 \cdot 3,142$$

$$F_x = 83345,4 \text{ N}$$



Obr. 27 Maximální síla působící na stěnu cisterny v závislosti na zpomalení na vodorovné rovině

Z obr. 27 je patrné, že s rostoucím brzdným zrychlením roste síla  $F_x$  působící na stěnu cisterny a to za předpokladu, že cisterna je zcela naplněná kapalinou o hustotě  $\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Na daném obrázku jsou řešeny varianty za použití přepážek, které jsou rozmístěny v cisterně rovnoměrně po celé délce cisterny, aby každá komora zaujímal stejný objem (viz obr. 26). Na obr. 27 je zřejmé, že s počtem přibývajících přepážek klesá síla působící na stěnu cisterny.

### Výpočet působící síly na stěnu cisterny při brzdění do kopce:

Výpočet úhlu  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  a  $\lambda$  (viz obr. 19):

$$\alpha = \arctg \frac{a \cdot \cos\varphi}{g - a \cdot \sin\varphi} = \arctg \frac{3,5 \cdot \cos 3,15}{9,81 - 3,5 \cdot \sin 3,15}$$

$$\alpha = 19,97^\circ$$

$$\gamma = 180 - \varphi - 90 = 180 - 3,15 - 90$$

$$\gamma = 86,85^\circ$$

$$\delta = 180 - \alpha - \gamma = 180 - 19,97 - 86,85$$

$$\delta = 73,18^\circ$$

$$\lambda = 180 - (\alpha + \gamma) - \varphi = 180 - (19,97 + 86,85) - 3,15$$

$$\lambda = 70,03^\circ$$

Výpočet délky  $l'$  (viz obr. 19):

$$l' = \frac{l}{\cos\varphi} = \frac{4,7746}{\cos 3,15} = 4,7818 \text{ m}$$

Výpočet výšky  $h'$  (viz obr. 19):

$$h' = \frac{l' \cdot \sin\alpha}{\sin\delta} = \frac{4,7818 \cdot \sin 19,97}{\sin 73,18} = 1,7061 \text{ m}$$

Výpočet výšky těžiště  $h_T$  od hladinové plochy:

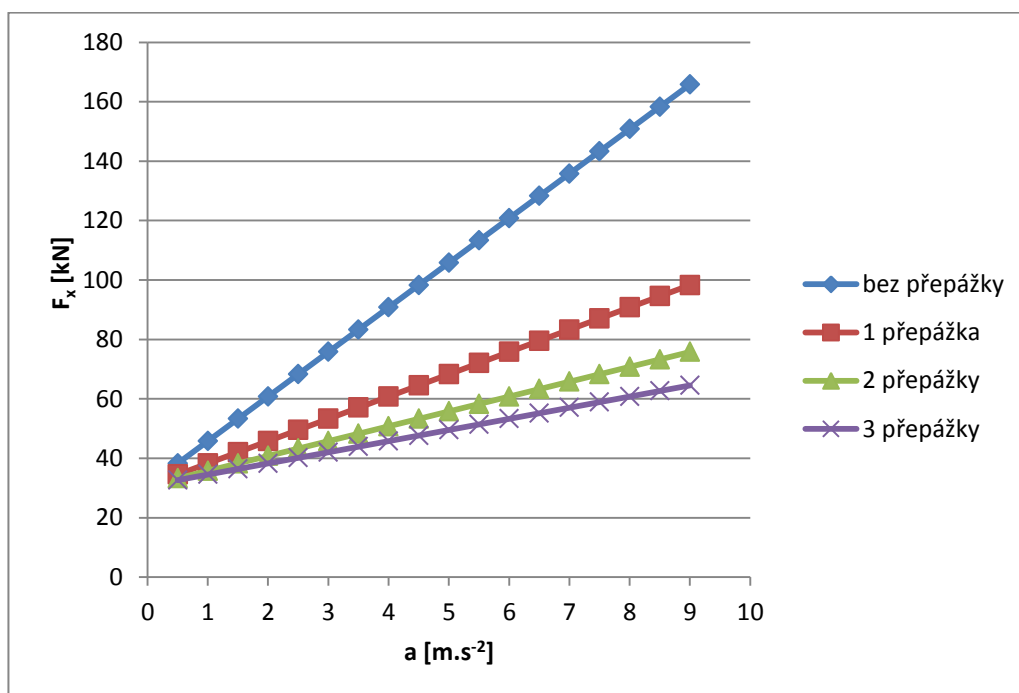
$$h_T = \frac{(h' + \frac{d}{2}) \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{\sin\lambda} = \frac{(1,7061 + \frac{2}{2}) \cdot \sin(19,97 + 86,85)}{\sin 70,03}$$

$$h_T = 2,756 \text{ m}$$

Výpočet síly působící na stěnu cisterny:

$$F_x = \rho \cdot (g - a \cdot \sin\varphi) \cdot h_T \cdot S = 1000 \cdot (9,81 - 3,5 \cdot \sin 3,15) \cdot 2,756 \cdot 3,142$$

$$F_x = 83282 \text{ N}$$



Obr. 28 Maximální síla působící na stěnu cisterny v závislosti na zpomalení při brzdění do kopce

Z obr. 28 je patrné, že s rostoucím brzdícím zrychlením roste síla  $F_x$  působící na stěnu cisterny a to za předpokladu, že cisterna je zcela naplněná kapalinou o hustotě  $\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . V tomto případě cisternový vůz brzdí rovnoměrně zrychleným pohybem směrem do kopce se stoupáním vozovky pod úhlem  $\varphi=3,15^\circ$ . Opět je tento případ řešen s přepážkami rovnoměrně rozmístěnými po celé délce cisterny (viz obr. 26), kde můžeme vidět, že síly působící na stěnu cisterny s počtem přepážek klesá.

### Výpočet působící síly na stěnu cisterny při brzdění z kopce:

Výpočet výšky  $h'_T$  (viz obr. 18), rovnice (56):

$$h'_T = \frac{d}{2} + l \cdot \left( \frac{a + g \cdot \sin\varphi}{g \cdot \cos\varphi} \right) = \frac{2}{2} + 4,7746 \cdot \left( \frac{3,5 + 9,81 \cdot \sin 3,15}{9,81 \cdot \cos 3,15} \right)$$
$$h'_T = 2,969 \text{ m}$$

Výpočet úhlu  $\alpha, \gamma$  a  $\delta$  (viz obr. 18):

$$\alpha = \arctg \frac{a \cdot \cos\varphi}{g + a \cdot \sin\varphi} = \arctg \frac{3,5 \cdot \cos 3,15}{9,81 + 3,5 \cdot \sin 3,15}$$

$$\alpha = 19,26^\circ$$

$$\gamma = 180 - (\varphi + 90) - \alpha = 180 - (3,15 + 90) - 19,26$$

$$\gamma = 67,59^\circ$$

$$\delta = 180 - \gamma - \varphi = 180 - 67,21 - 3,15$$

$$\delta = 109,26^\circ$$

Výpočet výšky působišť těžiště od hladinové plochy  $h_T$ :

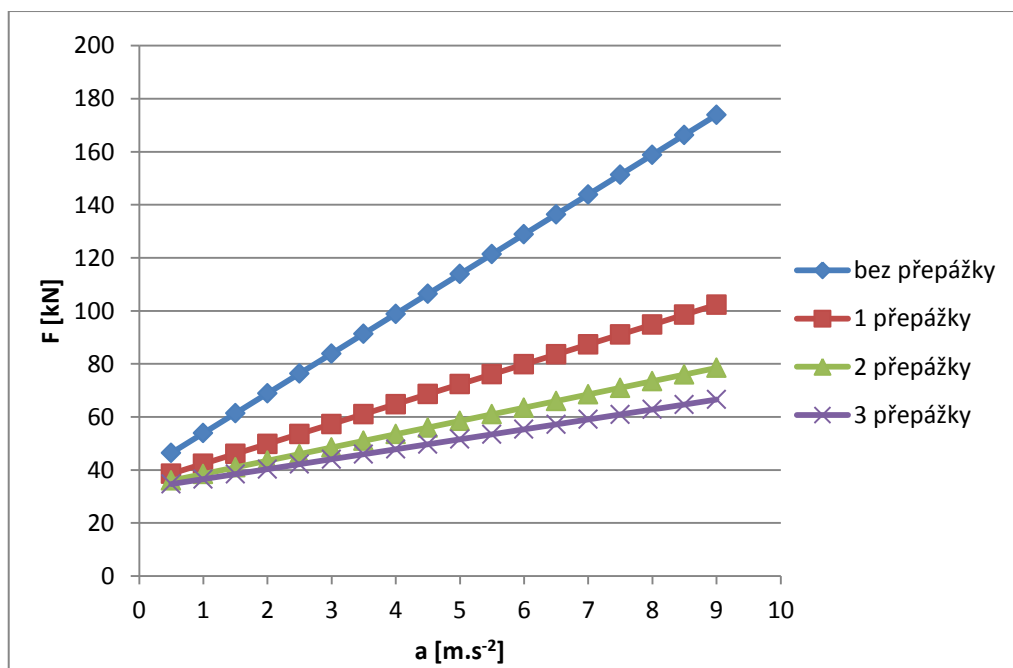
$$h_T = \frac{h'_T \cdot \sin\gamma}{\sin\delta} = \frac{2,969 \cdot \sin 67,21}{\sin 109,64}$$

$$h_T = 2,906 \text{ m}$$

Výpočet síly působící na stěnu cisterny:

$$F_x = \rho \cdot (g + a \cdot \sin\varphi) \cdot h_T \cdot S = 1000 \cdot (9,81 + 3,5 \cdot \sin 3,15) \cdot 2,906 \cdot 3,142$$

$$F_x = 91327 \text{ N}$$



Obr. 29 Maximální síla působící na stěnu cisterny v závislosti na zpoždění při brzdění z kopce

Na obr. 29 lze vidět, že s rostoucím brzdícím zrychlením klesá síla  $F_x$  působící na stěnu cisterny a to za předpokladu, že cisterna je zcela naplněná kapalinou o hustotě  $\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . U tohoto případu cisternový vůz brzdí rovnoměrně zrychleným pohybem z kopce s klesáním vozovky pod úhlem  $\varphi=3,15^\circ$ . A opět lze vidět, že s rostoucím počtem použitých přepážek rovnoměrně rozmístěných po celé délce cisterny (viz obr. 26) klesá síla  $F_x$  působící na stěnu cisterny. S porovnáním situace, kdy vozidlo brzdí na vodorovné rovině obr. 27 nebo vozidlo brzdící do kopce obr. 28, je tato situace nejkritičtější kde u daného obrázku dosahuje nejvyšších hodnot.

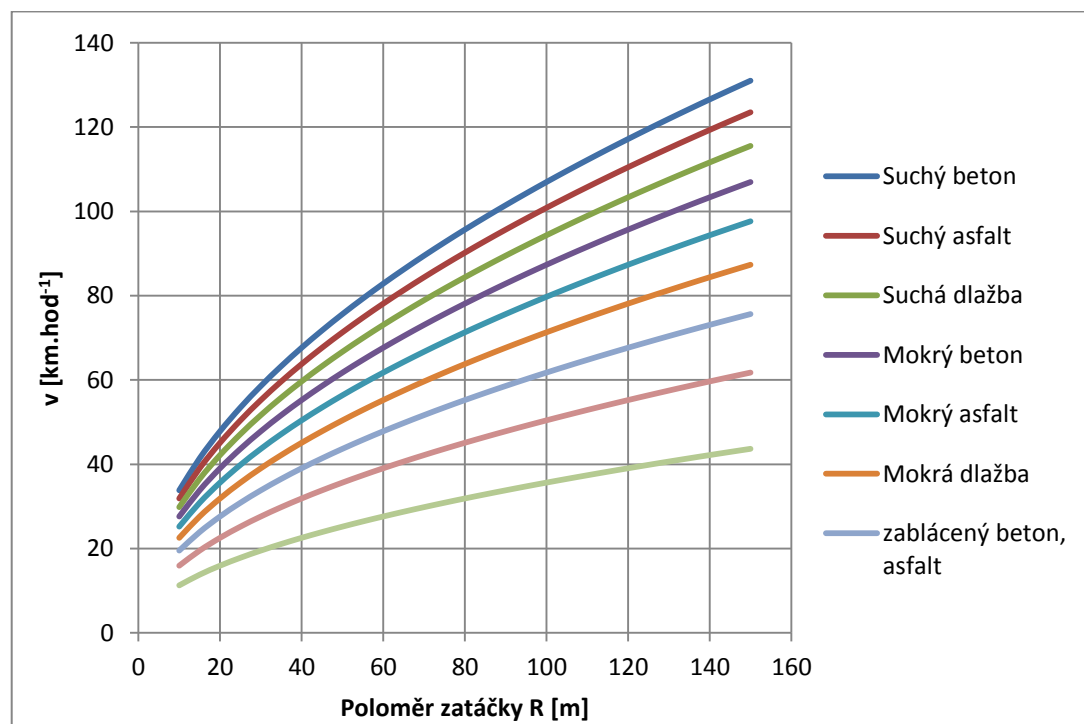
### 5.3.2 Průjezd zatáčkou

Pro výpočet mezního stavu smyku budu počítat s poloměry zatáček, kterými cisternové vozidlo projíždí v rozmezí (10 – 150) m za rozdílných součinitelů adheze (viz tab. 4). Pro mezní stav překlopení počítám s rychlostmi v rozmezí (5 – 90)  $\text{km}\cdot\text{hod}^{-1}$  a pro zjištění polohy těžiště s konstantním poloměrem zatáčky. Dále znám rozchod kol, výšku středu těžiště cisterny od vozovky a vzdálenost těžiště kapaliny od středu cisterny při různých naplněních.

#### Výpočet mezního stavu smyku:

Výpočet mezního stavu smyku při průjezdu zatáčkou o poloměru 50 m na suchém asfaltu:

$$v_{max} = \sqrt{\mu_y \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,8 \cdot 9,81 \cdot 50} = 19,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 71,31 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$$



Obr. 30 Závislost maximální rychlosti na poloměru zatáčky při různých součinitelích adheze

Z obr. 30 je patrné, že pro každý poloměr zatáčky se musí přizpůsobit rychlost vozidla v závislosti na povrchu vozovky, po kterém se vozidlo v dané situaci pohybuje. Podle rovnice (70) lze vidět, že nezávisí na hmotnosti vozidla. Prostor pod křivkou jsou hodnoty, kdy vozidlo projede zatáčkou, aniž by se dostalo do smyku.

### **Výpočet mezního stavu překlpení:**

Pro tento případ volím výpočet pro cisternové vozidlo naplněné z 50%.

Výpočet odstředivého zrychlení cisternového vozidla při průjezdu zatáčkou o poloměru 50 m a rychlosti  $50 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1} (13,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{13,89^2}{50} = 3,86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Výpočet úhlu naklonění hladinové plochy vůči vozovce:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{g} = \arctg \frac{3,86}{9,81} = 21,47^\circ$$

Výpočet příčné vzdálenosti těžiště  $l_z$  (viz obr. 20) kde rozchod kol z vnějších stran pneumatik  $B$  je 2,5 m a dále vím, že vzdálenost těžiště kapaliny od středu cisterny  $r_t$  je 0,4244 m:

$$l_{zc} = \frac{B}{2} - r_t \cdot \sin \alpha = \frac{2,5}{2} - 0,4244 \cdot \sin 21,47 = 1,0947 \text{ m}$$

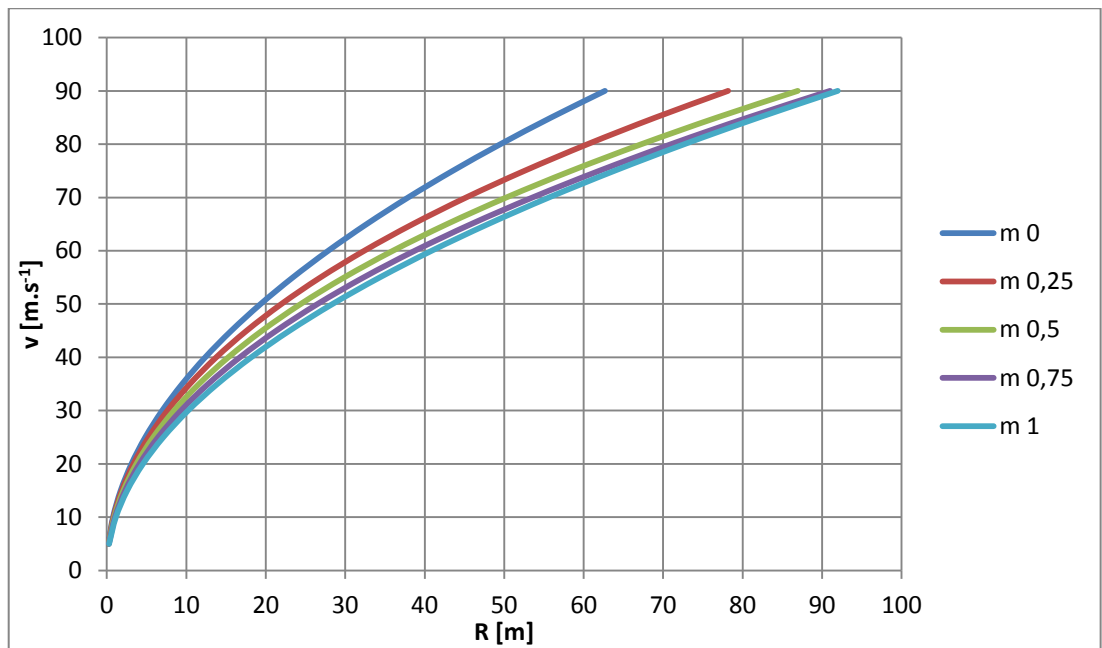
Výpočet výšky těžiště od vozovky  $h_T$  (viz obr. 20) kde výška středu těžiště cisterny od vozovky  $H$  je 2,25 m.

$$h_{Tc} = H - r_t \cdot \cos \alpha = 2,25 - 0,4244 \cdot \cos 21,47 = 1,855 \text{ m}$$

Výpočet maximálního poloměru zatáčky, kterou může cisternové vozidlo projet, aniž by se překlátilo při rychlosti  $50 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ :

$$R = \frac{v^2(m_c \cdot h_{Tc} + m_v \cdot h_{Tv})}{m_c \cdot g \cdot l_{zc} + m_v \cdot g \cdot l_{zv}} = \frac{13,89^2(7500 \cdot 1,855 + 11625 \cdot 1,2298)}{7500 \cdot 9,81 \cdot 1,0947 + 11625 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{2,5}{2}\right)}$$

$$R = 24,4 \text{ m}$$



Obr. 31 Závislost maximální rychlosti na poloměru zatáčky proti překlopení cisternového vozidla

Z obr. 31 je patrné, že s rostoucím poloměrem zatáčky roste nájezdová rychlost. Cisternové vozidlo musí přizpůsobit rychlost vozidla do dané zatáčky tak, aby se hodnoty rychlosti nepohybovali nad hraniční křivkou překlopení. Hodnoty pod křivkami jsou hodnoty, při kterých se vozidlo nepřeklopí.

### **Výpočet síly působící na bok cisterny při průjezdu zatáčkou:**

Pro výpočet volím rozsah odstředivého zrychlení v rozmezí  $(0,5 - 9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Toto rozmezí je zvoleno na základě výsledku z vypočtených hodnot meze smyku a meze převrácení vozidla.

Příklad výpočtu je proveden při naplnění cisterny z 50%.

Výpočet sklonu hladiny vůči vozovce při odstředivém zrychlení  $a$  je  $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ :

$$\alpha = \arctg \frac{a}{g} = \arctg \frac{3,5}{9,81} = 19,64^\circ$$

Výpočet výšky těžiště  $h_T$  od hladinové plochy (viz obr. 21):

$$\begin{aligned} h_T &= h' + w = tg\alpha \cdot (r + r \cdot \sin\alpha) + \cos\alpha \cdot r \\ h_T &= tg19,64 \cdot (1 + 1 \cdot \sin19,64) + \cos19,64 \cdot 1 \\ h_T &= 1,419 \text{ m} \end{aligned}$$

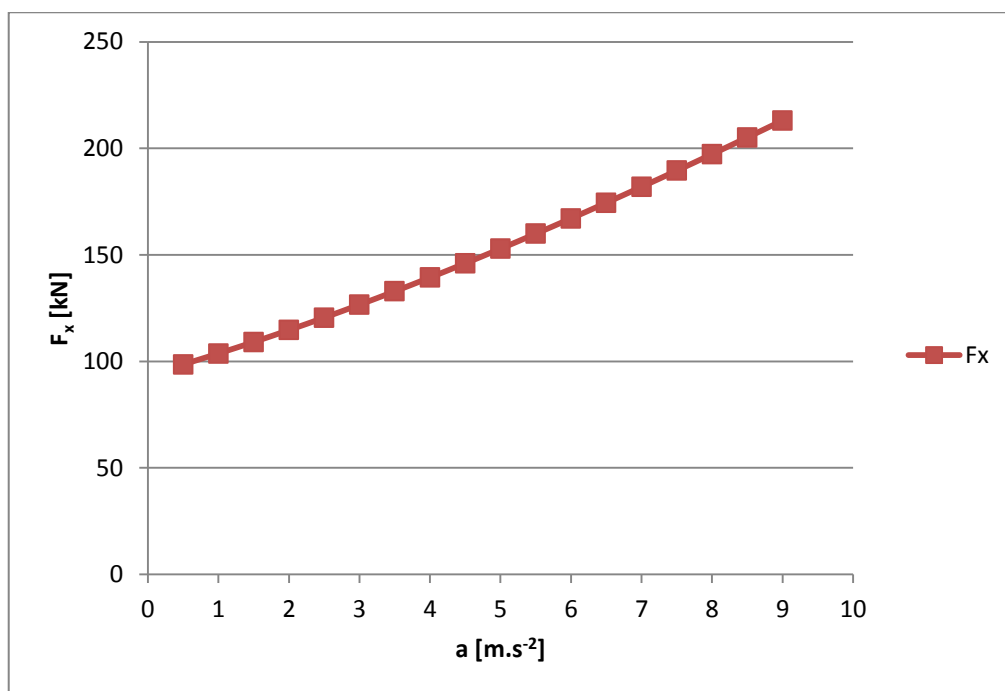
Výpočet plochy  $S_x$ , která je průmětem boku cisterny do svislé roviny:

$$S_x = l \cdot d = 4,7746 \cdot 2 = 9,5492 \text{ m}^2$$

Výpočet síly  $F_x$  působící na bok cisterny:

$$F_x = \rho \cdot g \cdot h_T \cdot S_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,419 \cdot 9,5492$$

$$F_x = 132928,59 \text{ N}$$



Obr. 32 Maximální síly působící na bok zcela naplněné cisterny v závislosti na odstředivém zrychlení

Na obr. 32 je vidět, že s rostoucím odstředivým zrychlením  $a$  roste síla  $F_x$  působící na bok cisterny a to za podmínek, že je cisterna zcela naplněná kapalinou o hustotě  $\rho=1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



## Závěr

V této práci jsem zpracoval dynamiku pohybu cisternového vozidla a sílové účinky působící na vozidlo při základních jízdních situacích. Dále jsem vypracoval metodiku relativního klidu kapaliny v cisterně při zvolených jízdních situacích, jako je brzdění na vodorovné rovině, brzdění z kopce, brzdění do kopce a průjezd zatáčkou.

Po zpracování výpočtu zmíněných jízdních situací jsem zjistil, že s větším naplněním cisterny, tedy i s rostoucí hmotností se prodlužuje brzdná dráha vozidla. U zcela naplněného cisternového vozidla je brzdná dráha nejdelší. Pro výpočet cisternového vozidla projíždějící zatáčkou jsem řešil situace, kdy se vozidlo dostane do smyku nebo se převrátí. Určení mezního stavu smyku bylo řešeno pro různé povrchy vozovky, kde jsem vypočetl, že s klesajícím součinitelem soudržnosti klesá přilnavost pneumatik s vozovkou. Na základě zjištění mezního stavu smyku vozidla lze říct, že se vozidlo může dostat do smyku při stejné rychlosti a při stejném poloměru zatáčky za různých součinitelů adheze (viz obr. 30). Určení mezního stavu překlopení bylo řešeno pro různá naplnění cisterny, kde při různých vypočtených odstředivých zrychlení se mění poloha těžiště kapaliny v cisterně, která negativně napomáhá k převrácení cisternového vozidla. Pro mnou zvolený rozsah rychlostí, kterým se může cisternový vůz pohybovat, se převrátí spíše plný vůz, než vůz za různých naplnění cisterny (viz obr. 31). Pokud bych teoreticky počítal s rychlostmi většími, než je cisternový vůz schopný jet, tak by se vozidlo mohlo překloupat dříve z části naplněné než úplně plné.

Na základě zpracování jízdních situací jsem zvolil zpomalení a odstředivé zrychlení v rozsahu, které vozidlo dosahovalo při brzdění a při průjezdu zatáčkou, aniž by se dostalo do mezního stavu smyku nebo překlopení. Pro tato brzdná a odstředivá zrychlení jsem zpracoval výpočty pro síly působící na stěnu a bok cisterny, která byla zcela naplněná. S rostoucím brzdným zrychlením rostla síla působící na stěnu cisterny. Aby se síla působící na stěnu cisterny snížila, tak jsem počítal varianty cisterny i s přepážkami (viz obr. 26), které snížily tuto působící sílu. Pro situaci cisternového vozidla projíždějící zatáčkou jsem také počítal sílu působící na bok zcela naplněné cisterny, kde s rostoucím odstředivým zrychlením roste síla působící na bok cisterny (viz obr. 32).

## Použitá literatura

- [1] MATĚJKA, R. *Vozidla silniční dopravy I*. 2. vydání. Bratislava: Alfa, 1990. 224 s. ISBN 80-05-00392-7.
- [2] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vydání. Brno: VLK, 2003. 432 s. ISBN 80-293-0024-2.
- [3] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4 [vid. 15.12.2013]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>
- [4] ŠOB, F. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2037-5
- [5] Schwarzmüller s.r.o. Cisternové vozidlo pro přepravu pohonných hmot [fotografie]. *Moderní design a dokonalá funkčnost vozidla* [online]. Dostupnost z: <http://www.schwarzmueller.com/cs/nova-vozidla/cisternova-vozidla/cisternove-nastavby-pro-prepravu-pohonných-hmot/hlinikova-cisternova-nastavba-na-2-napravovy-podvozek-s-bocni-pristrojovou-skrini-12500-1.html>. Formát: 1050×700
- [6] Schwarzmüller s.r.o. Cisternové návěs pro přepravu pohonných hmot [fotografie]. *Moderní design a dokonalá funkčnost vozidla* [online]. Dostupnost z: <http://www.schwarzmueller.com/cs/nova-vozidla/cisternova-vozidla/cisternove-navesy-pro-prepravu-pohonných-hmot/3-napravovy-hlinikovy-cisternovy-naves-38000-1.html>. Formát: 445×280
- [7] Schwarzmüller s.r.o. Cisternové přívěs pro přepravu pohonných hmot [fotografie]. *2-Nápravový hliníkový cisternový přívěs bez měřicího zařízení* [online]. Dostupnost z: <http://www.schwarzmueller.com/cs/nova-vozidla/cisternova-vozidla/cisternove-privesy-pro-prepravu-pohonných-hmot/2-napravovy-hlinikovy-cisternovy-prives-bez-mericiho-zarizeni.html>. Formát: 445×280
- [8] PODSTAWKA, V. Ostře sledované cisterny. In: *Nebezpečný náklad* [online]. Václav Podstawka, 2007 [vid. 15.12.2013]. Dostupné z: <http://www.nebezpecnynaklad.cz/inc/clanky/cisterny.pdf>
- [9] Sdělení 8/2013 Sb.m.s. Ministerstva zahraničí o Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR). 2012 [vid. 16.12.2013]. Dostupné z: [http://www.mdcz.cz/cs/Silnicni\\_doprava/Nakladni\\_doprava/adr/ADR+2013+-+ke+sta%C5%BEen%C3%AD/ADR+2013.htm](http://www.mdcz.cz/cs/Silnicni_doprava/Nakladni_doprava/adr/ADR+2013+-+ke+sta%C5%BEen%C3%AD/ADR+2013.htm)
- [10] MILAN, Čmelík, ŠÍMA Z. a MACHONSKÝ L. *Fyzikální tabulky*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-553-2.

- [11] MIKULČÁK, Jiří, KLIMEŠ B., ŠIROKÝ K., ŠŮLA V. a ZEMÁNEK F. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, 1988. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [12] SNÁŠELOVÁ J., MOTYČKOVÁ M., ZIKÁN V. (2009): Hustota mléka a smetany v závislosti na teplotě a obsahu tuk. *Mlékařské listy*, 114, s. 18-21.

## Seznam příloh

- Příloha A – Numerické stanovení brzdné dráhy v závislosti na počáteční rychlosti pro různá naplnění cisterny
- Příloha B – Numerické stanovení síly působící na stěnu cisterny v závislosti na zpomalení
- Příloha C – Numerické stanovení maximální rychlosti v závislosti na poloměru zatáčky proti smyku vozidla pro různé součinitele adheze
- Příloha D – Numerické stanovení maximálního poloměru zatáčky v závislosti na rychlosti vozidla proti překlopení
- Příloha E – Numerické stanovení síly působící na bok cisterny v závislosti na zpomalení
- Příloha F – CD příloha

## Příloha A

$v_0$ [km.hod <sup>-1</sup> ]	$v_0$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$s_{min}$ [m]	$a_{min}$ [m.s <sup>-2</sup> ]	$s_{0,25}$ [m]	$a_{0,25}$ [m.s <sup>-2</sup> ]	$s_{0,5}$ [m]	$a_{0,5}$ [m.s <sup>-2</sup> ]	$s_{0,75}$ [m]	$a_{0,75}$ [m.s <sup>-2</sup> ]	$s_{max}$ [m]	$a_{max}$ [m.s <sup>-2</sup> ]
5	1,39	0,12	7,85	0,16	5,93	0,20	4,77	0,24	3,99	0,28	3,43
10	2,78	0,49	7,85	0,65	5,93	0,81	4,77	0,97	3,99	1,13	3,43
15	4,17	1,11	7,85	1,46	5,93	1,82	4,77	2,18	3,99	2,53	3,43
20	5,56	1,97	7,85	2,60	5,93	3,24	4,77	3,87	3,99	4,50	3,43
25	6,94	3,07	7,85	4,06	5,93	5,05	4,77	6,05	3,99	7,04	3,43
30	8,33	4,42	7,85	5,85	5,93	7,28	4,77	8,71	3,99	10,13	3,43
35	9,72	6,02	7,85	7,96	5,93	9,91	4,77	11,85	3,99	13,79	3,43
40	11,11	7,87	7,85	10,40	5,93	12,94	4,77	15,48	3,99	18,01	3,43
45	12,50	9,95	7,85	13,17	5,93	16,38	4,77	19,59	3,99	22,80	3,43
50	13,89	12,29	7,85	16,25	5,93	20,22	4,77	24,18	3,99	28,15	3,43
55	15,28	14,87	7,85	19,67	5,93	24,46	4,77	29,26	3,99	34,06	3,43
60	16,67	17,70	7,85	23,41	5,93	29,12	4,77	34,82	3,99	40,53	3,43
65	18,06	20,77	7,85	27,47	5,93	34,17	4,77	40,87	3,99	47,57	3,43
70	19,44	24,09	7,85	31,86	5,93	39,63	4,77	47,40	3,99	55,17	3,43
75	20,83	27,65	7,85	36,57	5,93	45,49	4,77	54,41	3,99	63,33	3,43
80	22,22	31,46	7,85	41,61	5,93	51,76	4,77	61,91	3,99	72,06	3,43
85	23,61	35,52	7,85	46,97	5,93	58,43	4,77	69,89	3,99	81,35	3,43
90	25,00	39,82	7,85	52,66	5,93	65,51	4,77	78,35	3,99	91,20	3,43

Tabulka vypočtených hodnot brzdné dráhy v závislosti na počáteční rychlosti při různých naplnění cisterny při brzdění na vodorovné rovině.

Hodnoty vypočteny pro brzdění z kopce a do kopce jsou přiloženy v příloze F.

## Příloha B

		bez přepážky			1 přepážky			2 přepážky			3 přepážky		
a	$\alpha$	h'	h <sub>T</sub>	F <sub>x</sub>	h'	h <sub>T</sub>	F <sub>x</sub>	h'	h <sub>T</sub>	F <sub>x</sub>	h'	h <sub>T</sub>	F <sub>x</sub>
[m.s <sup>-2</sup> ]	[°]	[m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[N]	[m]	[m]	[N]
0,5	2,92	0,24	1,24	38318,95	0,12	1,12	34568,99	0,08	1,08	33319	0,06	1,06	32694
1	5,82	0,49	1,49	45818,87	0,24	1,24	38318,95	0,16	1,16	35818,97	0,12	1,12	34568,99
1,5	8,69	0,73	1,73	53318,8	0,37	1,37	42068,91	0,24	1,24	38318,95	0,18	1,18	36443,97
2	11,52	0,97	1,97	60818,72	0,49	1,49	45818,87	0,32	1,32	40818,92	0,24	1,24	38318,95
2,5	14,30	1,22	2,22	68318,64	0,61	1,61	49568,83	0,41	1,41	43318,9	0,30	1,30	40193,93
3	17,00	1,46	2,46	75818,57	0,73	1,73	53318,8	0,49	1,49	45818,87	0,37	1,37	42068,91
3,5	19,64	1,70	2,70	83318,49	0,85	1,85	57068,76	0,57	1,57	48318,85	0,43	1,43	43943,89
4	22,18	1,95	2,95	90818,42	0,97	1,97	60818,72	0,65	1,65	50818,82	0,49	1,49	45818,87
4,5	24,64	2,19	3,19	98318,34	1,10	2,10	64568,68	0,73	1,73	53318,8	0,55	1,55	47693,85
5	27,01	2,43	3,43	105818,3	1,22	2,22	68318,64	0,81	1,81	55818,77	0,61	1,61	49568,83
5,5	29,28	2,68	3,68	113318,2	1,34	2,34	72068,61	0,89	1,89	58318,75	0,67	1,67	51443,82
6	31,45	2,92	3,92	120818,1	1,46	2,46	75818,57	0,97	1,97	60818,72	0,73	1,73	53318,8
6,5	33,53	3,16	4,16	128318	1,58	2,58	79568,53	1,05	2,05	63318,7	0,79	1,79	55193,78
7	35,51	3,41	4,41	135818	1,70	2,70	83318,49	1,14	2,14	65818,67	0,85	1,85	57068,76
7,5	37,40	3,65	4,65	143317,9	1,83	2,83	87068,45	1,22	2,22	68318,64	0,91	1,91	58943,74
8	39,20	3,89	4,89	150817,8	1,95	2,95	90818,42	1,30	2,30	70818,62	0,97	1,97	60818,72
8,5	40,91	4,14	5,14	158317,7	2,07	3,07	94568,38	1,38	2,38	73318,59	1,03	2,03	62693,7
9	42,53	4,38	5,38	165817,7	2,19	3,19	98318,34	1,46	2,46	75818,57	1,10	2,10	64568,68

Tabulka vypočtených hodnot sil působících na stěnu cisterny pro různá zpomalení při brzdění na vodorovné rovině. Hodnoty vypočteny při brzdění z kopce a do kopce jsou přiloženy v příloze F.

## Příloha C

R	$V_{\max 0,9}$	$V_{\max 0,8}$	$V_{\max 0,7}$	$V_{\max 0,6}$	$V_{\max 0,5}$	$V_{\max 0,4}$	$V_{\max 0,3}$	$V_{\max 0,2}$	$V_{\max 0,1}$
[m]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]	[km.hod-1]
10	33,83	31,89	29,83	27,62	25,21	22,55	19,53	15,95	11,28
15	41,43	39,06	36,54	33,83	30,88	27,62	23,92	19,53	13,81
20	47,84	45,10	42,19	39,06	35,66	31,89	27,62	22,55	15,95
25	53,48	50,43	47,17	43,67	39,87	35,66	30,88	25,21	17,83
30	58,59	55,24	51,67	47,84	43,67	39,06	33,83	27,62	19,53
35	63,28	59,66	55,81	51,67	47,17	42,19	36,54	29,83	21,09
40	67,65	63,78	59,66	55,24	50,43	45,10	39,06	31,89	22,55
45	71,76	67,65	63,28	58,59	53,48	47,84	41,43	33,83	23,92
50	75,64	71,31	66,71	61,76	56,38	50,43	43,67	35,66	25,21
55	79,33	74,79	69,96	64,77	59,13	52,89	45,80	37,40	26,44
60	82,86	78,12	73,07	67,65	61,76	55,24	47,84	39,06	27,62
65	86,24	81,31	76,06	70,42	64,28	57,49	49,79	40,65	28,75
70	89,50	84,38	78,93	73,07	66,71	59,66	51,67	42,19	29,83
75	92,64	87,34	81,70	75,64	69,05	61,76	53,48	43,67	30,88
80	95,68	90,20	84,38	78,12	71,31	63,78	55,24	45,10	31,89
85	98,62	92,98	86,98	80,52	73,51	65,75	56,94	46,49	32,87
90	101,48	95,68	89,50	82,86	75,64	67,65	58,59	47,84	33,83
95	104,26	98,30	91,95	85,13	77,71	69,51	60,19	49,15	34,75
100	106,97	100,85	94,34	87,34	79,73	71,31	61,76	50,43	35,66
105	109,61	103,34	96,67	89,50	81,70	73,07	63,28	51,67	36,54
110	112,19	105,77	98,94	91,60	83,62	74,79	64,77	52,89	37,40
115	114,71	108,15	101,17	93,66	85,50	76,47	66,23	54,08	38,24
120	117,18	110,48	103,34	95,68	87,34	78,12	67,65	55,24	39,06
125	119,60	112,76	105,47	97,65	89,14	79,73	69,05	56,38	39,87
130	121,96	114,99	107,56	99,58	90,91	81,31	70,42	57,49	40,65
135	124,29	117,18	109,61	101,48	92,64	82,86	71,76	58,59	41,43
140	126,57	119,33	111,62	103,34	94,34	84,38	73,07	59,66	42,19
145	128,81	121,44	113,60	105,17	96,01	85,87	74,37	60,72	42,94
150	131,01	123,52	115,54	106,97	97,65	87,34	75,64	61,76	43,67

Tabulka vypočtených hodnot maximální rychlosti průjezdu zatáčkou pro různé součinitele adheze.

## Příloha D

NI

v	v	a	$\alpha$	$l_{z\ min}$	$l_{z\ 0,25}$	$l_{z\ 0,5}$	$l_{z\ 0,75}$	$l_{z\ max}$	$h_{t\ min}$	$h_{t\ 0,25}$	$h_{t\ 0,5}$	$h_{t\ 0,75}$	$h_{t\ max}$	$R_{\ min}$	$R_{\ 0,25}$	$R_{\ 0,5}$	$R_{\ 0,75}$	$R_{\ max}$
[km.hod-1]	[m.s-1]	[m.s-2]	[°]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
5	1,39	0,04	0,23	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	0	1,60	1,83	2,03	2,25	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
10	2,78	0,15	0,90	1,25	1,24	1,24	1,25	1,25	0	1,60	1,83	2,03	2,25	0,77	0,83	0,92	1,02	1,14
15	4,17	0,35	2,03	1,25	1,23	1,23	1,24	1,25	0	1,60	1,83	2,03	2,25	1,74	1,88	2,08	2,31	2,55
20	5,56	0,62	3,60	1,25	1,21	1,22	1,24	1,25	0	1,60	1,83	2,03	2,25	3,10	3,35	3,72	4,11	4,54
25	6,94	0,96	5,62	1,25	1,19	1,21	1,23	1,25	0	1,60	1,83	2,03	2,25	4,84	5,26	5,83	6,45	7,10
30	8,33	1,39	8,06	1,25	1,16	1,19	1,22	1,25	0	1,61	1,83	2,04	2,25	6,96	7,62	8,45	9,32	10,22
35	9,72	1,89	10,91	1,25	1,13	1,17	1,21	1,25	0	1,61	1,83	2,04	2,25	9,48	10,45	11,60	12,75	13,91
40	11,11	2,47	14,13	1,25	1,09	1,15	1,20	1,25	0	1,62	1,84	2,04	2,25	12,38	13,77	15,28	16,74	18,17
45	12,50	3,13	17,67	1,25	1,05	1,12	1,18	1,25	0	1,63	1,85	2,04	2,25	15,67	17,59	19,54	21,32	22,99
50	13,89	3,86	21,47	1,25	1,01	1,09	1,17	1,25	0	1,65	1,86	2,05	2,25	19,35	21,96	24,39	26,51	28,39
55	15,28	4,67	25,45	1,25	0,97	1,07	1,16	1,25	0	1,66	1,87	2,05	2,25	23,41	26,89	29,87	32,31	34,35
60	16,67	5,56	29,52	1,25	0,93	1,04	1,14	1,25	0	1,68	1,88	2,06	2,25	27,86	32,39	36,00	38,75	40,88
65	18,06	6,52	33,61	1,25	0,89	1,02	1,13	1,25	0	1,71	1,90	2,07	2,25	32,69	38,50	42,80	45,84	47,97
70	19,44	7,56	37,63	1,25	0,85	0,99	1,12	1,25	0	1,74	1,91	2,08	2,25	37,92	45,22	50,28	53,57	55,64
75	20,83	8,68	41,50	1,25	0,82	0,97	1,11	1,25	0	1,76	1,93	2,09	2,25	43,53	52,55	58,43	61,96	63,87
80	22,22	9,88	45,19	1,25	0,79	0,95	1,10	1,25	0	1,79	1,95	2,10	2,25	49,53	60,49	67,27	71,00	72,67
85	23,61	11,15	48,66	1,25	0,76	0,93	1,09	1,25	0	1,82	1,97	2,11	2,25	55,91	69,03	76,77	80,68	82,04
90	25,00	12,50	51,88	1,25	0,74	0,92	1,08	1,25	0	1,85	1,99	2,12	2,25	62,68	78,17	86,94	91,00	91,98

Tabulka vypočtených hodnot maximálních poloměrů zatáčky v závislosti na rychlosti pro různá naplnění cisterny.



## Příloha E

a [m.s-2]	$\alpha$ [°]	h' [m]	w [m]	hT [m]	Fx [N]
0,5	2,92	0,05	1,00	1,05	98573,85
1	5,82	0,11	0,99	1,11	103712,3
1,5	8,69	0,18	0,99	1,16	109090,2
2	11,52	0,24	0,98	1,22	114703,1
2,5	14,30	0,32	0,97	1,29	120544,7
3	17,00	0,40	0,96	1,35	126607,7
3,5	19,64	0,48	0,94	1,42	132883,5
4	22,18	0,56	0,93	1,49	139362,5
4,5	24,64	0,65	0,91	1,56	146034,7
5	27,01	0,74	0,89	1,63	152889,6
5,5	29,28	0,83	0,87	1,71	159916,7
6	31,45	0,93	0,85	1,78	167105,2
6,5	33,53	1,03	0,83	1,86	174444,9
7	35,51	1,13	0,81	1,94	181925,6
7,5	37,40	1,23	0,79	2,02	189537,5
8	39,20	1,33	0,77	2,11	197271,6
8,5	40,91	1,43	0,76	2,19	205118,9
9	42,53	1,54	0,74	2,27	213071,3

Tabulka vypočtených hodnot sil působících na bok cisterny v závislosti na odstředivém zrychlení při průjezdu zatáčkou.