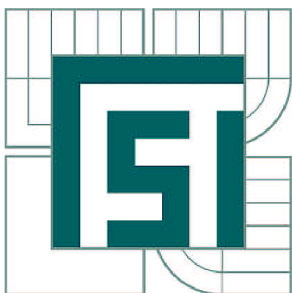


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## IDENTIFIKACE SILOVÝCH ÚČINKŮ PŘI PŘEPRAVĚ KAPALIN

IDENTIFICATION OF FORCES IN THE TRANSPORT OF LIQUIDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN ŠTURSA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN KUBÍN

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Martin Štursa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Identifikace silových účinků při přepravě kapalin**

v anglickém jazyce:

### **Identification of forces in the transport of liquids**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se studii možných silových účinků při přepravě kapalin.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je identifikovat nejvýznamější silové účinky na vozidlo nákladní silniční dopravy přepravující kapalinu. Kapalina je přepravována v cisterně nebo nádržce.

Seznam odborné literatury:

- [1] PTÁČEK, P., KAPLÁNEK, A.: Přeprava nákladu v silniční dopravě, CERN, Brno, 2002, ISBN 80-7204-257-2  
[2] Zákon č. 56/2001 Sb., o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích, Ministerstvo dopravy a spojů, 10. leden 2001

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Kubín

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 17.11.2010



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá přepravou kapalin na pozemních komunikacích. V první části jsou rozděleny nádrže dle konstrukce, dále je zde zpracována problematika přepravy kapalin podle *Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí* (ADR). V druhé části jsou definovány a spočítány mezní stavy (MS) pro vozidlo přepravující kapalinu při průjezdu zatáčkou. Tyto jsou dále aplikovány ve vzorovém příkladu z praxe.

## KLÍČOVÁ SLOVA

přepava kapalin, nádrž, cisterna, ADR, převrácení, smyk, průjezd zatáčkou, peřejníky, vlnolamy

## ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with transport of liquids on the roads. In the first part of the thesis, tanks are divided by construction, then the problem of transporting of liquids by *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road* (ADR) is analysed. In the second part of the thesis, maximal speeds for a vehicle transporting a liquid during cornering are defined and calculated. These calculations are then applied in the solution of a real-life example.

## KEYWORDS

transport of liquids, tank, ADR, rollover, skid, cornering, surge plates, wave-breaks

---



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTURSA, M. *Identifikace silových účinků při přepravě kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s., XII s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Kubín.

---



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Kubína a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 16. května 2011

  
.....

Martin Štursa

---



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Kubínovi za cenné rady. Zvláštní poděkování patří panu Radomíru Jahelkovi ze SPS-VKP s.r.o. za prohlídku výrobního úseku a praktické rady. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mě během studia podporovali. Děkuji.

---





## OBSAH

Úvod.....	11
1 Rozdělení nádrží .....	13
1.1 Tlakové nádrže .....	13
1.2 Netlakové nádrže.....	14
1.3 Nádrže pro přepravu nebezpečných látek .....	15
2 Přeprava kapalin podle ADR .....	17
2.1 Peřejníky .....	17
2.2 Množství přepravované kapaliny.....	18
2.2.1 Dynamické účinky kapaliny .....	18
2.2.2 Teplotní objemová roztažnost .....	19
2.3 Upevnění nádrže na vozidle .....	20
3 Průjezd zatáčkou.....	23
3.1 Mezní stav smyku .....	24
3.2 Mezní stav převrácení .....	25
3.2.1 Válcová nádrž.....	26
3.2.2 Kvádrová nádrž.....	30
4 Příklad .....	35
Závěr.....	37
Seznam použitých zdrojů .....	39
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	41
Seznam příloh .....	43

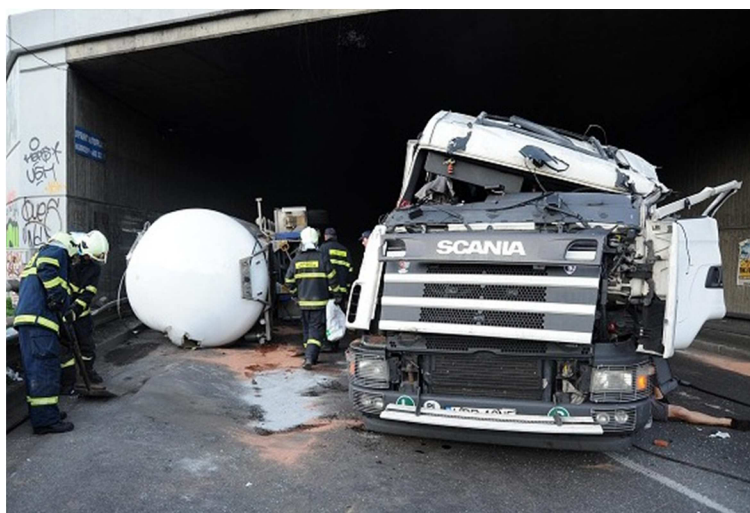




## Úvod

Přeprava kapalin je ve srovnání s přepravou jiných nákladů velmi specifická, především díky tomu, že kapalina nezaujímá v prostoru stálý tvar, ale přizpůsobuje svůj tvar okolí. Z tohoto důvodu jsou kapaliny přepravovány ve speciálních obalech, tj. v nádržích (cisternách), případně v barelech, kanystrech, lahvích atp. Pokud není nádrž zcela zaplněna kapalinou, vzniká na rozhraní kapaliny a vzduchu volná hladina. Volná hladina se může vlnit a různě naklánět, současně se pohybuje i těžiště kapaliny, to vyvolává nestabilitu celého vozidla. Tato nestabilita může vyústit až v dopravní nehodu.

Příkladem může být nehoda polského kamionu v tzv. myší díře v Praze u Barrandovského mostu. Řidič nepřizpůsobil rychlost vozidla poloměru zatáčky a charakteru nákladu a vozidlo s návěsem převrátil. Přepravovaným nákladem bylo v tomto případě 40 tun roztoku glukózy. Na obr. 1 jsou k vidění odklízeční práce po této nehodě, tahač je již na kolech. [10][19]



*Obr. 1 Převrácený návěs s nákladem roztoku glukózy [10]*

Cílem této práce je popsat mezní stavy (MS), které mohou nastat při jízdě vozidla přepravujícího kapalinu, a vypočítat, jakou měrou se přepravovaná kapalina podílí na daném MS. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce nelze popsat všechny možné situace, např. brzdění, průjezd klopenou zatáčkou, brzdění či zrychlování v zatáčce atp. V této práci se tedy budu zabývat pouze průjezdem zatáčkou a MS, které mohou pro tento případ nastat.





# 1 ROZDĚLENÍ NÁDRŽÍ

Podle konstrukce lze rozdělit nádrže pro přepravu kapalin do tří skupin, na nádrže tlakové, netlakové a pro přepravu nebezpečných látek.

## 1.1 TLAKOVÉ NÁDRŽE

Do této kategorie lze zařadit všechny nádrže vystavené podtlaku při plnění nebo přetlaku při vypouštění přepravované kapaliny.

Tlakové nádrže jsou používány k přepravě kapalných látek, ale také práškovitých a zrnitých látek, které není možné nasávat čerpadlem. S výhodou je zde využito podtlaku vzduchu k nasávání přepravované látky. Jmenovitě se jedná o fekálie, znečištěnou vodu, mléko nebo čokoládu, z práškovitých látek např. mouka, šrot, cement atp.

Příklad tlakové nádrže se nachází na obr. 2, jde o fekální nástavbu PFA-12.0H od firmy SPS-VKP s.r.o. na voze Volvo.



Obr. 2 Volvo FM64R 6x4 s nástavbou PFA-12.0H [13]

Sání a výtlak u tlakových nádrží je zajišťován vývěvou nebo kompresorem. Během plnění je odsáván vzduch z nádrže, vzniká podtlak. Kapalina je vlivem rozdílu tlaků nasávána do nádrže. Velikost podtlaku závisí na konstrukci vývěvy a pevnosti nádrže, může však dosáhnout až 0,9 bar. Právě podtlak při sání je zvláště nebezpečný, protože může vyvolat zborcení stěn nádrže. Na obr. 3 je zachycen fekální vůz se zborcenou nádrží. Toto zborcení bylo vyvoláno podtlakem při nasávání splaškové vody, velkou měrou přispěla k havárii zkorodovaná stěna nádrže (byla zanedbána údržba vozidla).

V naprosté většině případů má tlaková nádrž válcový tvar s klenutými čely. Toto uspořádání nejlépe odolává podtlaku. Často se lze setkat s prstencovými výztuhami na



vnější nebo vnitřní straně válcové části nádrže, které rovněž zvyšují tuhost nádrže a brání zborcení stěn. K výrobě tlakových nádrží je používáno ocelových plechů, tloušťku plechu je nutno volit s přihlédnutím k možnosti prorezivění. Často se lze setkat s plastovými nádržemi, jsou lehčí a odpadá problém s korozí. Pro transport potravinářských produktů jsou používány plechy z nerezavějících ocelí.



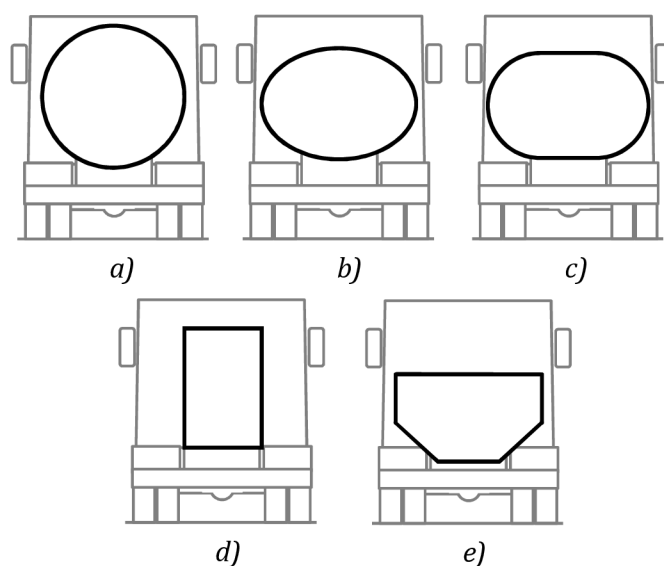
Obr. 3 Fekální vůz se zborcenou nádrží [12]

## 1.2 NETLAKOVÉ NÁDRŽE

Do této kategorie lze zařadit všechny nádrže, které nejsou během plnění nebo vypouštění vystaveny podtlaku nebo přetlaku. Plnění nádrže je zajištěno samospádem, čerpadlem nebo tlakem kapaliny, např. z hydrantu.

Netlakové nádrže jsou nejčastěji používány na kropicích a hasičských vozech, tedy k přepravě užitkové vody. Velmi často je v tomto typu nádrží přepravována i pitná voda, např. do oblastí, kde není v důsledku nějaké havárie nebo katastrofy dostupná pitná voda z vodovodu.

Čela netlakových nádrží bývají plochá, nehrozí zde zborcení stěn vlivem podtlaku, vyskytují se však i klenutá čela. Tvary těchto nádrží jsou různé a závisí na použití, ke kterému jsou konstruovány. Např. hasičská zásahová vozidla jsou vybavena nádrží ve tvaru kvádru, viz obr. 4d. Okolo nádrže zbývá místo na další hasičské vybavení, avšak za cenu vysoko umístěného těžiště. Hasičská cisternová vozidla mohou být vybavena nádrží zobrazenou na obr. 4e, zkosené hrany na spodní části nádrže umožňují umístit širokou nádrž co nejnižší, dojde ke snížení těžiště při zachování velkého objemu kapaliny.



Obr. 4 Tvary nádrží při pohledu na vozidlo zezadu

Příklad netlakové nádrže se nachází na obr. 5, jde o kropicí nástavbu VSA-7.0H od firmy SPS-VKP s.r.o. na voze Tatra.



Obr. 5 TATRA T815 R45 4x4.2 s nástavbou VSA-7.0H [20]

### 1.3 NÁDRŽE PRO PŘEPRUVU NEBEZPEČNÝCH LÁTEK

Nádrže pro přepravu nebezpečných látek jsou téměř shodné s tlakovými nebo netlakovými nádržemi, avšak splňují podmínky pro přepravu nebezpečných látek, tak jak je stanovuje *Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (Articles Dangereux de Route – ADR)*.



Příklad takovéto nádrže se nachází na obr. 6, jde o nástavbu PCA-5.0H ADR pro přepravu nafty od firmy SPS-VKP s.r.o. na voze MAN.



Obr. 6 MAN TGL 10.180 4x2 BB s nástavbou PCA-5.0H ADR [13]

V těchto nádržích jsou přepravovány hořlavé, toxické, žíravé a jinak nebezpečné látky. Vzhledem k nebezpečnosti přepravovaného nákladu musí být vozidlo řádně označeno, vybaveno hasicími přístroji, případně dýchacími maskami pro každého člena posádky, jak ADR stanoví. [6]

Na nádržích jsou povinně použity peřejníky, vnitřní a vnější prstencové výztuhy a další konstrukční řešení, které ADR předepisuje. Materiály, ze kterých je nádrž vyrobena, musí splňovat řadu kritérií, např. musí být odolné vůči křehkému lomu a trhlinkové korozi pod napětím v rozsahu teplot (-20 až 50) °C, nesmí reagovat s přepravovanou látkou atp. [6]

#### **PŘÍKLAD OZNAČENÍ VOZIDLA NA obr. 6**

**Bezpečnostní značka:** Třída 3 (hořlavá kapalina) – nebezpečí ohně, nebezpečí výbuchu, obsah může při zahřátí vybuchnout [6][16]

**Kemlerův kód:** 30 – hořlavá kapalina [6]

**UN kód:** 1202 – palivo pro vznětové motory, motorová nafta [6][9]





## 2 PŘEPRAVA KAPALIN PODLE ADR

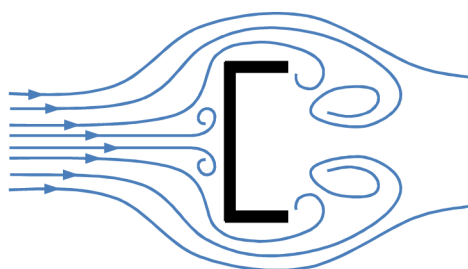
*Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí* je mezinárodní dohoda uzavřená 30. září 1957 v Ženevě za účelem zvýšit bezpečnost dopravy na území Evropy. Československá socialistická republika přistoupila k této dohodě v roce 1987. Dosud platí vyhláška ministra zahraničních věcí č. 64/1987 Sb. o Evropské dohodě o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí, která určuje vztah českého práva k ADR. [7][18]

Nejnovější platné znění je ADR 2011, tato verze platí od 1. ledna 2011, prozatím je dostupná pouze v anglickém originále. Posledním českým překladem je ADR 2009, zveřejněná 24. března 2009. [18]

Pozn.: Celá 2. kapitola se týká nádrží podléhajících ADR, výrobci nádrží však velmi často tato pravidla aplikují i na nádrže tlakové a netlakové, především konstrukci, umístění peřejníků a upevnění nádrže na vozidle.

### 2.1 PEŘEJNÍKY

Peřejníky, také zvané vlnolamy, jsou profily umístěné v nádrži, jejich hlavní funkcí je zabránit volnému přelévání přepravované kapaliny a jejímu následnému nárazu do čela nádrže. Při protékání kapaliny okolo peřejníků dochází ke změně proudění z laminárního na turbulentní (viz obr. 7), tj. za peřejníky vznikají víry (peřeje), ve kterých je část kinetické energie disipována na teplo. Dochází tak k utlumení energie, kterou kapalina předá vozidlu.



Obr. 7 Proudění v okolí peřejníku

Další důležitou funkcí peřejníků je zvýšení tuhosti nádrže.

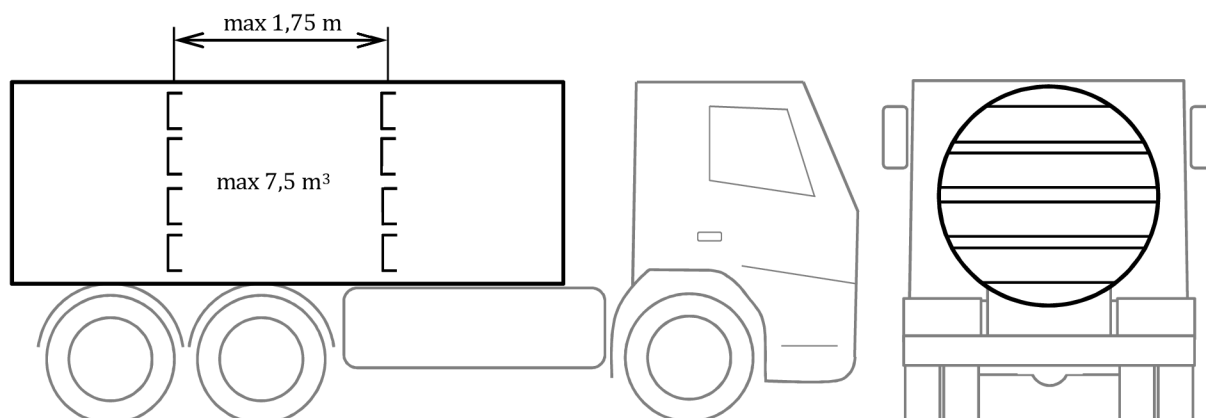
Peřejníky jsou v naprosté většině případů uspořádány ve vozidle napříč vzhledem ke směru jízdy, viz obr. 8. Ve zvláštních případech, tj. když je nádrž širší než 2 metry, např. hasičská cisterna, bývají do nádrže umístěny i peřejníky podélné, toto řešení snižuje riziko převrácení vozidla v zatáčce nebo při prudkém vyhýbacím manévru.



ADR stanovuje:

- maximální vzdálenost mezi sousedními peřejníky na 1,75 m nebo
- maximální objem uzavřený mezi peřejníky na 7,5 m<sup>3</sup>.

V praxi se zpravidla používá objem menší, okolo 4 m<sup>3</sup>. Účinná plocha peřejníků by měla být alespoň 75 % z plochy čela nádrže. [6]



Obr. 8 Rozmístění peřejníků v nádrži

Každá komora musí být přístupná k čištění a údržbě, z tohoto důvodu se zpravidla spodní polovina peřejníků konstruuje jako odnímatelná. V praxi se lze setkat s nebezpečnou situací, kdy je vozidlo provozováno bez těchto peřejníků. Obsluha si zjednodušuje práci na úkor bezpečnosti provozu. [6]

## 2.2 MNOŽSTVÍ PŘEPRÁVOVANÉ KAPALINY

Velký význam pro chování vozidla má množství přepravované kapaliny. Když uvážíme, že hmotnost přepravované kapaliny se vyrovná, ale často i překročí pohotovostní hmotnost vozidla, pak je zřejmé, že množství přepravované kapaliny má významný vliv na chování vozidla. ADR proto v bodě 4.3.2.2 řeší množství přepravované kapaliny.

### 2.2.1 DYNAMICKÉ ÚČINKY KAPALINY

Pokud není nádrž vozidla vybavena peřejníky, platí pro provoz takovéto cisterny podmínka, že nelze vyjet s poloprázdnou nádrží. Dynamické působení kapaliny na vozidlo je největší, když je nádrž z poloviny naplněna. Dalo by se říci, že v nádrži je velké množství kapaliny, které má nad hladinou spoustu prostoru k velkým vlnám.

ADR v bodě 4.3.2.2.4 uvádí: „Nádrže určené pro přepravu látek v kapalném stavu nebo hluboce zchlazených zkapalněných plynů, které nejsou rozděleny přepážkami nebo



peřejníky do komor s vnitřním objemem nejvýše 7500 litrů, musí být plněny nejméně na 80 % nebo nejvýše do 20 % jejich objemu.“ [6]

## 2.2.2 TEPLTNÍ OBJEMOVÁ ROZTAŽNOST

Při přepravě kapalin nastávají situace, kdy dochází ke změně teploty okolí, cisterny a následně i přepravované kapaliny. Nejčastěji jsou tyto výkyvy teplot způsobeny změnou počasí. Např. během letní noci se teploty mohou pohybovat okolo 10 °C, přes den způsobí slunce zahřátí nádrže i na teplotu okolo 50 °C. Tato změna teploty vyvolá změnu objemu kapaliny. Z tohoto důvodu není žádoucí plnit nádrž do plna, mohlo by dojít k jejímu poškození a následnému úniku kapaliny.

V ADR je proto uveden výpočet stupně plnění, tj. procentuální podíl maximálního přípustného objemu kapaliny k objemu nádrže. Stupeň plnění se spočítá ze vzorce

$$\text{stupeň plnění} = \frac{100}{1 + a(50 - t_F)} \% \text{ vnitřního objemu, [6]} \quad (1)$$

kde  $a$  [1] střední koeficient objemové roztažnosti kapaliny mezi 15 °C a 50 °C,  
 $t_F$  [°C] střední teplota kapaliny při plnění.

Střední koeficient objemové roztažnosti kapaliny mezi 15 °C a 50 °C lze spočítat dle vzorce

$$a = \frac{d_{15} - d_{50}}{35d_{50}}, [6] \quad (2)$$

kde  $d_{15}$  [1] relativní hustota kapaliny při 15 °C,  
 $d_{50}$  [1] relativní hustota kapaliny při 50 °C.

Relativní hustotu kapaliny vztahujeme k hustotě vody při 3,98 °C, výpočet se provede dle vztahu

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}}, \quad (3)$$

kde  $\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>] hustota přepravované kapaliny při dané teplotě,  
 $\rho_{\text{ref}}$  [kg·m<sup>-3</sup>] hustota referenční látky (voda při 3,98 °C, tedy 1 000 kg·m<sup>-3</sup>).

Výpočet stupně plnění lze ilustrovat např. na vodě. Nejprve je nutno spočítat relativní hustoty  $d_{15} = 0,999$  a  $d_{50} = 0,988$ , pak střední koeficient objemové roztažnosti vody mezi 15 °C a 50 °C  $a = 3,18 \cdot 10^{-4}$ . Probíhá-li plnění při teplotě 20 °C, pak stupeň plnění pro vodu je 99,1 %.



Hustoty kapalin pro teploty 15 °C a 50 °C lze zjistit experimentálně, s těmito lze dále počítat. V praxi jsou však pro řidiče připraveny tabulky se stupněm plnění pro danou látku.

Vztah pro stupeň plnění, jak je uveden v rovnici (1), platí pro hořlavé látky bez dalších nebezpečných vlastností. Pro látky s vyšší mírou nebezpečnosti je čítec zlomku zmenšován ze 100 až na 95, viz ADR bod 4.3.2.2.1. Dochází tak ke snížení objemu přepravované kapaliny a tím ke snížení rizika úniku nebezpečných látek. [6]

### 2.3 UPEVNĚNÍ NÁDRŽE NA VOZIDLE

Při konstrukci nástavby na vozidlo je mimo jiné zapotřebí spočítat, jakou silou působí nástavba s nádrží a kapalinou na vozidlo. Aby se předešlo chybám, případným nebezpečným situacím a nehodám, ADR v článku 6.8.2.1.2 popisuje maximální silové účinky, kterým musí nástavba s cisternou odolat.

Pro cisternové nástavby, které jsou součástí vozidla a nejsou jednoduše odnímatelné, viz obr. 2, obr. 6 a obr. 9, je platná následující pasáž ADR.

„Cisterny a jejich upevňovací prvky musí být při největší povolené hmotnosti náplně způsobilé odolat následujícím silám rovnajícím se silám vyvolaným působením

- ve směru jízdy: dvojnásobku celkové hmotnosti,
- v příčném směru kolmo ke směru jízdy: celkové hmotnosti,
- ve svislém směru zdola nahoru: celkové hmotnosti,
- ve svislém směru shora dolů: dvojnásobku celkové hmotnosti.“ [6]



Obr. 9 MAN 6x4 s pevnou nástavbou PFA-12+2H ADR [15]



Kontejnerové cisternové nástavby lze pomocí mechanismu jednoduše skládat a nakládat, viz obr. 10. Je zde tedy zřejmý požadavek na bezpečné upevnění kontejnerové nástavby na vozidle, aby za žádných běžných okolností nedošlo k uvolnění nástavby a škodám na majetku nebo na zdraví, proto ADR stanovuje toto:

„Cisternové kontejnery a jejich upevňovací prvky musí být při největší povolené hmotnosti náplně způsobilé odolat následujícím silám rovnajícím se silám vyvolaným působením

- ve směru jízdy: dvojnásobku celkové hmotnosti,
- v příčném směru kolmo ke směru jízdy: celkové hmotnosti (není-li směr jízdy jasně určen, platí dvojnásobek celkové hmotnosti ve všech směrech),
- ve svislém směru zdola nahoru: celkové hmotnosti,
- ve svislém směru shora dolů: dvojnásobku celkové hmotnosti.“ [6]



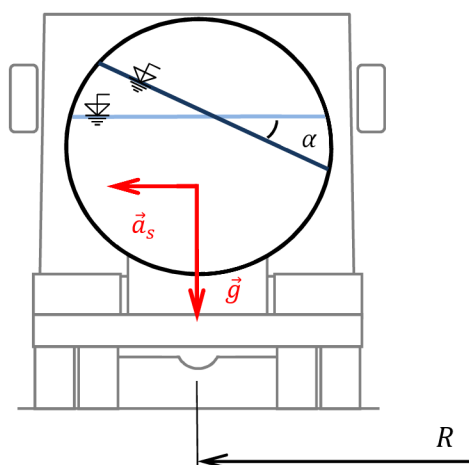
Obr. 10 Kontejnerová cisternová nástavba od firmy AgroStar Bohemia [11]





### 3 PRŮJEZD ZATÁČKOU

Při nájezdu vozidla do zatáčky dochází k narůstání příčného zrychlení z nuly na maximum, při výjezdu ze zatáčky se toto zrychlení zmenšuje zpět na nulu. Pokud dojde k této změně rychle, kapalina se začne v nádrži přelévat, proudit a narážet do stěn, na vozidlo tak působí silnými dynamickými rázy. To je úloha z hydrodynamiky, kterou je možné nasimulovat pomocí CFD, avšak popsat tuto situaci analyticky je velmi komplikované, ne-li nemožné. V případě, že bude průjezd zatáčkou plynulý, lze tento dynamický efekt zanedbat a považovat úlohu za hydrostatickou, s tímto předpokladem bude dále uvažováno. V následujícím modelu také nebude uvažováno odpružení vozidla, ani deformace pneumatik.



Obr. 11 Zrychlení působící na vozidlo v zatáčce

Při jízdě vozidla konstantní rychlostí v přímém směru působí na vozidlo pouze tíhové zrychlení  $g$ . Toto zrychlení udržuje hladinu kapaliny v horizontální poloze.

Během průjezdu zatáčkou je kapalina vychylována z rovnovážné polohy setrvačným zrychlením  $a_s$ , které je stejně velké, ale opačně orientované než zrychlení dostředivé  $a_d$ . Lze tedy zapsat vztah pro setrvačné zrychlení ve tvaru

$$a_s = \frac{v^2}{R}, \quad (4)$$

kde  $v$  [m·s<sup>-1</sup>] rychlost vozidla,  
 $R$  [m] poloměr zatáčky.

Úhel  $\alpha$ , o který je hladina kapaliny vychýlena od horizontální roviny, zjistíme ze vztahu

$$\alpha = \arctan \frac{a_s}{g}, \quad (5)$$

kde  $g$  [m·s<sup>-2</sup>] tíhové zrychlení.



Tento vztah je odvozen z poznatku, že pokud je kapalina v relativním klidu, její hladina je kolmá ke směru výslednice zrychlení, které na ni působí. [3]

Setrvačné zrychlení v zatáčce není po šířce ani délce vozidla konstantní. Hladina kapaliny tedy nemá tvar roviny, ale rotačního paraboloidu, který se za běžných podmínek blíží rovině. Rotační paraboloid je tím výraznější, čím je poloměr zatáčky menší. Na silnicích první a druhé třídy je minimální poloměr zatáčky 12 m a na silnicích třetí třídy je minimální poloměr 7 m. Lze spočítat, že rozdíl úhlů vychýlení  $\alpha$  na vnitřní a vnější straně nádrže široké 1,8 m je v běžném provozu maximálně  $4^\circ$  respektive  $7^\circ$ . Můžeme uvažovat, že hladina má tvar roviny. [3][5]

Síly působící na vozidlo lze vyjádřit pomocí druhého Newtonova zákona, pak můžeme pro tíhovou sílu psát

$$F_g = mg, \quad (6)$$

kde  $m$  [kg] součet hmotností vozidla a kapaliny.

Pro setrvačnou (odstředivou) sílu pak platí

$$F_s = \frac{v^2 m}{R}. \quad (7)$$

Pokud je nájezdová rychlost vozidla do zatáčky příliš velká, může nastat jeden ze dvou MS, konkrétně MS smyku nebo MS převrácení.

### 3.1 MEZNÍ STAV SMYKU

MS smyku je nežádoucí jev, který nastane při průjezdu zatáčkou, pokud pneumatiky nedokáží přenést boční síly mezi vozidlem a vozovkou. Pokud se tak stane, vozidlo je vyneseno ven ze zatáčky setrvačnou silou.

Pro výpočet rovnováhy při MS smyku zapíšeme

$$F_s = F_t, \quad (8)$$

kde  $F_t$  [N] třecí síla mezi pneumatikou a vozovkou.

Třecí sílu lze vyjádřit pomocí vztahu pro Coulombovo tření

$$F_t = f F_n, \quad (9)$$

kde  $f$  [1] součinitel smykového tření,  
 $F_n$  [N] normálová síla mezi pneumatikou a vozovkou.





Po dosažení tíhové síly za normálovou sílu získáme vztah

$$\frac{v^2 m}{R} = fmg. \quad (10)$$

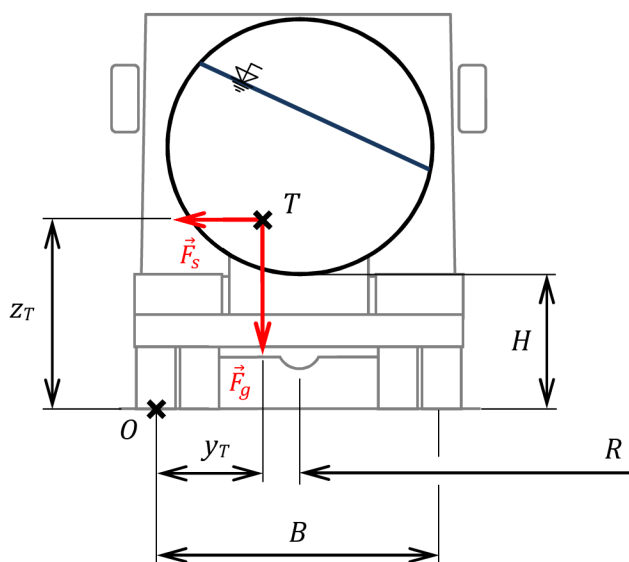
Po vykrácení rovnice hmotností a převedení na jednu stranu získáme vztah pro maximální nájezdovou rychlost vzhledem k MS smyku.

$$v_{MSs} = \pm \sqrt{fgR}. \quad (11)$$

Rychlost na mezi smyku je tedy závislá na součiniteli tření mezi vozovkou a pneumatikami, na tíhovém zrychlení a na poloměru zatáčky. Záporné řešení lze chápat jako průjezd vozidla zatáčkou v opačném směru. V úvahu připadá i couvání vozidla, avšak s MS smyku při takovéto situaci se lze setkat v podstatě jen na velmi kluzkých površích, jako jsou led a uježděný sníh.

### 3.2 MEZNÍ STAV PŘEVRÁCENÍ

MS převrácení je nežádoucí jev, který nastane při průjezdu zatáčkou, pokud moment setrvačné síly k bodu  $O$  je větší než moment tíhové síly k bodu  $O$  a zároveň pneumatiky mají dostatečnou adhezi, aby nenastal MS smyku. Pak dojde k převrácení vozidla okolo bodu  $O$ , tedy přes pneumatiky na vnější straně zatáčky.



Obr. 12 silové působení při MS převrácení

Pro výpočet rovnováhy při MS převrácení zapíšeme

$$F_s z_T = F_g y_T, \quad (12)$$



kde  $z_T$  [m] výška těžiště soustavy *vozidlo-přepravovaná kapalina*,  
 $y_T$  [m] vodorovná vzdálenost těžiště soustavy a pneumatik na vnějšku zatáčky.

Setrvačná síla, poloha těžiště soustavy  $y_T$  a  $z_T$  jsou proměnné závislé na setrvačném zrychlení, a tedy i na rychlosti vozidla v zatáčce. Vzhledem k nemožnosti vyjádřit  $y_T$  a  $z_T$  analyticky (viz dále), nelze nyní přímo vyjádřit rychlost. Avšak z rovnice (12) lze vyjádřit vztah pro rychlost, který bude závislý na  $y_T$  a  $z_T$  a následně spočítatelný iteračně.

$$v_{MSP} = \pm \sqrt{\frac{y_T}{z_T} gR} \quad (13)$$

K vyřešení této rovnice potřebujeme znát polohu těžiště soustavy, tu lze spočítat pomocí vztahu.

$$z_T = \frac{\sum_{i=1}^n z_{Ti} m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad [1] \quad (14)$$

kde  $z_{Ti}$  [m] souřadnice jednotlivých částí soustavy (vozidlo, náklad atp.),  
 $m_i$  [kg] hmotnosti jednotlivých částí soustavy.

Obdobně lze vyjádřit i  $y_T$ .

Hmotnost vozidla  $m_v$  a polohu těžiště vozidla  $y_{Tv}$  a  $z_{Tv}$  lze zjistit z dokumentace k vozidlu. Hmotnost nákladu, v našem případě hmotnost kapaliny  $m_k$ , spočítáme jako

$$m_k = V\rho, \quad (15)$$

kde  $V$  [m<sup>3</sup>] objem kapaliny.

Zbývá tedy spočítat polohu těžiště kapaliny  $y_{Tk}$  a  $z_{Tk}$ , to provedeme pro válcovou a kvádřovou nádrž samostatně.

### 3.2.1 VÁLCOVÁ NÁDRŽ

Při průjezdu zatáčkou je pohyb těžiště kapaliny v podélném směru zanedbatelný, kapalina má také ve všech místech stejnou hustotu, pak lze použít vztah

$$z_T = \frac{\int_{\Omega} z dS}{\int_{\Omega} dS}, \quad [1] \quad (16)$$

kde  $dS$  [m<sup>2</sup>] plocha infinitezimálního prvku,  
 $z$  [m] vzdálenost infinitezimálního prvku od počátku ve směru osy  $z$ ,  
 $\Omega$  oblast, přes kterou integrujeme.



Úlohu rozdělíme na tři části,  $0 < h < r$ ,  $h = r$  a  $r < h < d$ ,

kde  $h$  [m] výška hladiny ode dna nádrže pro stojící vozidlo,  
 $r$  [m] poloměr nádrže,  
 $d$  [m] průměr nádrže.

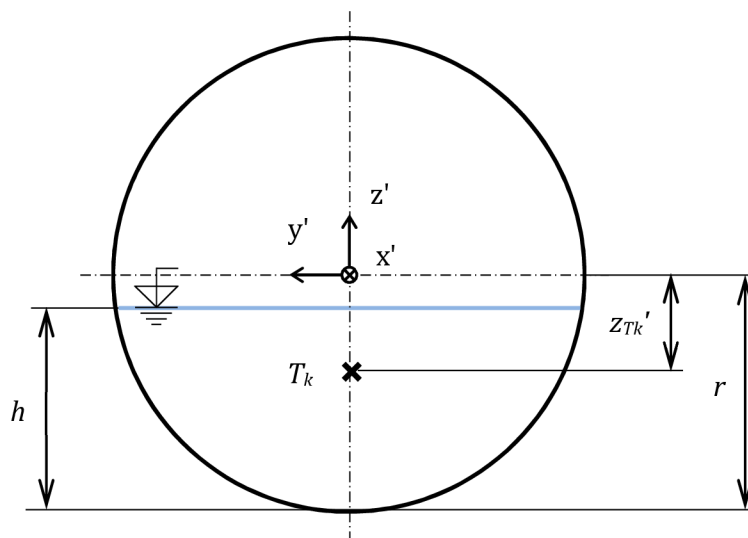
Důvodem rozdělení úlohy je nutnost integrovat v rozdílných mezích a nemožnost aplikovat jeden univerzální vzorec na všechny výše zmíněné případy.

### VÝŠKA HLADINY $0 < h < r$

Zvolíme souřadný systém, viz obr. 13 a spočítáme objem kapaliny

$$V = l \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} dy dz, \quad (17)$$

kde  $l$  [m] délka nádrže,  
 $dy$  [m] délka infinitezimálního prvku ve směru osy  $y$ ,  
 $dz$  [m] délka infinitezimálního prvku ve směru osy  $z$ ,  
 $y$  [m] vzdálenost infinitezimálního prvku od počátku ve směru osy  $y$ .



Obr. 13 Válcová nádrž s čárkovaným souřadným systémem

První integrál integrujeme ve směru osy  $z$  ode dna nádrže k hladině kapaliny a druhý integrál integrujeme ve směru osy  $y$  od jednoho styku hladiny s nádrží ke druhému. Tento výraz nemá analytické řešení, úlohu je možné řešit pouze numericky. Vzhledem k tomu, že se tento typ integrálu vyskytuje i ve výpočtu polohy těžiště, nelze vyjádřit vztah pro analytické řešení rychlosti při MS převrácení.



Nyní vyjádříme polohu těžiště kapaliny ve vztahu ke středu nádrže  $z_{Tk}'$ , tedy v čárkovaném souřadném systému,

$$z_{Tk}' = \frac{\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} z \, dy \, dz}{\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} dy \, dz}. \quad (18)$$

### VÝŠKA HLADINY $h = r$

Objem kapaliny je v tomto případě

$$V = \frac{\pi r^2 l}{2}, \quad (19)$$

tedy objem poloviny válce. Poloha těžiště v čárkovaném souřadném systému je

$$z_{Tk}' = -\frac{4R}{3\pi}. \quad (20)$$

Zde je vidět, že  $z_{Tk}'$  vyjde záporně, těžiště je tedy pod středem nádrže. Toto platí i pro případy  $0 < h < r$  a  $r < h < d$ . Pro zcela plnou nádrž ( $h = d$ ), je poloha těžiště zřejmá, tedy ve středu nádrže. Plnou nádrž lze počítat jako normální nepohyblivý náklad, např. podle [2].

### VÝŠKA HLADINY $r < h < d$

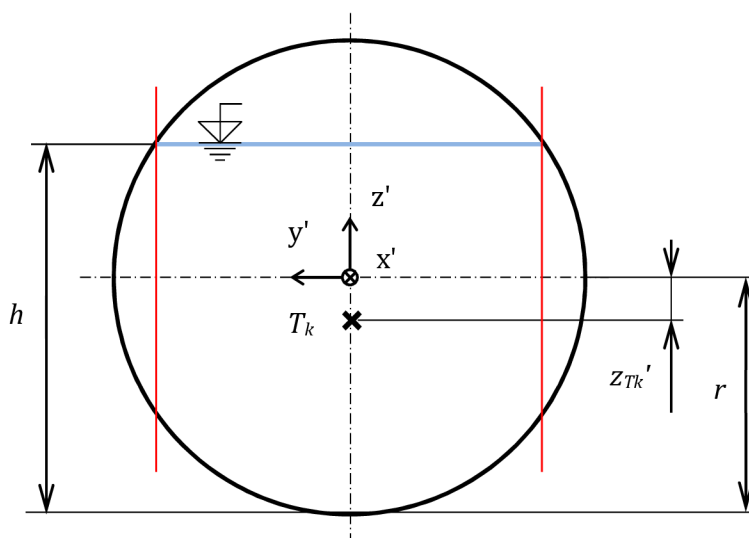
Objem kapaliny je v tomto případě

$$V = l \left( \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{-r}^{-\sqrt{2hr-h^2}} dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{\sqrt{2hr-h^2}}^r dy \, dz \right). \quad (21)$$

Poloha těžiště kapaliny v čárkovaném souřadném systému je

$$z_T = \frac{\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{-r}^{-\sqrt{2hr-h^2}} z \, dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} z \, dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{\sqrt{2hr-h^2}}^r z \, dy \, dz}{\int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{-r}^{-\sqrt{2hr-h^2}} dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{-r+h} \int_{-\sqrt{2hr-h^2}}^{\sqrt{2hr-h^2}} dy \, dz + \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} \int_{\sqrt{2hr-h^2}}^r dy \, dz}. \quad (22)$$

Meze integrálů ve směru osy  $y$  jsou naznačeny svislými červenými čarami na obr. 14, ve směru osy  $z$  integrujeme ode dna nádrže k hladině, případně ode dna ke klenutí nádrže.



Obr. 14 Válcová nádrž s čárkovaným souřadným systémem a mezemi integrálů

Nyní známe polohu těžiště kapaliny v nádrži stojícího vozidla vzhledem k čárkovanému souřadnému systému, tedy ke středu nádrže. V následujícím kroku dojde k natočení kapaliny kolmo na výslednici zrychlení při průjezdu vozidla zatáčkou. Získáme tak polohu těžiště vzhledem k pneumatikám na vnější straně zatáčky (nečárkovaný souřadný systém),

$$y_{Tk} = \frac{B}{2} + z'_{Tk} \sin \alpha, \quad (23)$$

$$z_{Tk} = (H + r) + z'_{Tk} \cos \alpha, \quad (24)$$

kde  $B$  [m] rozchod nápravy,  
 $H$  [m] vzdálenost dna nádrže od vozovky.

Dosazením do vztahu (14) získáme

$$y_T = \frac{y_{Tv} m_v + y_{Tk} m_k}{m_v + m_k}, \quad (25)$$

$$z_T = \frac{z_{Tv} m_v + z_{Tk} m_k}{m_v + m_k}, \quad (26)$$

Nyní lze dosadit do vztahu (13), získáme iterativní vztah pro výpočet maximální nájezdové rychlosti vzhledem k MS převrácení.

$$v_{MSp\ n+1} = \pm \sqrt{\frac{y_T(v_{MSp\ n})}{z_T(v_{MSp\ n})} gR}. \quad (27)$$



Pro nultou iteraci je vhodné použít setrvačné zrychlení při MS převrácení prázdného vozidla v daných podmínkách, pak tento vztah konverguje k hledané hodnotě kritické rychlosti při MS převrácení po dvou až třech průbězích programu s přesností na setinu kilometru za hodinu.

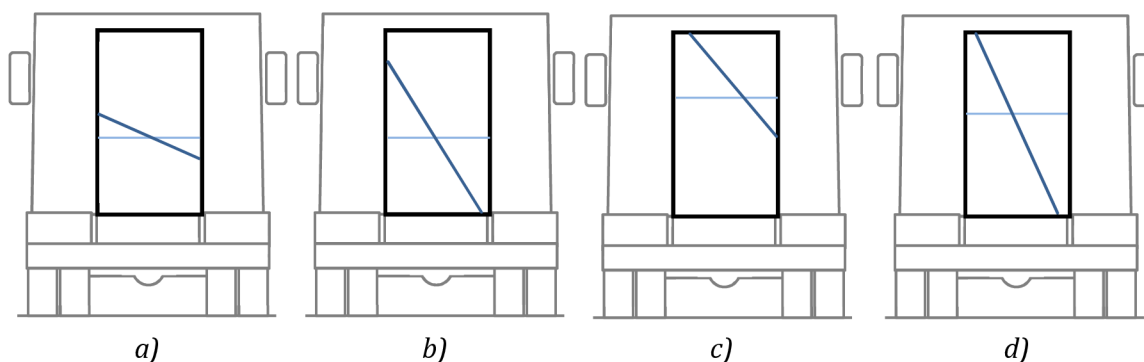
Rychlost na mezi převrácení je tedy závislá na tíhovém zrychlení, na poloměru zatáčky a na poloze těžiště soustavy *vozidlo-náklad*. Záporné řešení lze chápat jako průjezd vozidla zatáčkou v opačném směru.

### 3.2.2 KVÁDROVÁ NÁDRŽ

Objem kapaliny přepravovaný v nádrži tvaru kvádru je

$$V = bhl, \quad (28)$$

kde  $b$  [m] šířka nádrže,  
 $h$  [m] výška hladiny ode dna nádrže pro stojící vozidlo,  
 $l$  [m] délka nádrže.



Obr. 15 Kapalina v kvádrové nádrži v různých situacích

Při náklonu kapaliny mohou nastat čtyři případy, které jsou znázorněny na obr. 15. Tyto stavy se především liší tvarem, který kapalina zaujímá. Ten je dán objemem přepravované kapaliny a úhlem naklonění kapaliny v závislosti na proporcích nádrže. Pokud je nádrž zcela naplněna kapalinou, lze chování vozidla počítat podle [2].

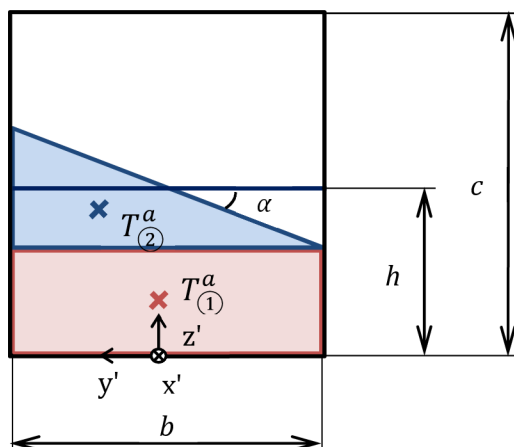
Při použití následujících výpočtů je nutné ověřit správnost volby daného stavu. Např. zda součet dílčích objemů se rovná celému objemu kapaliny, zda některý z rozměrů dílčích částí není větší než příslušný rozměr nádrže atp.



### PŘÍPAD a

Délka nádrže  $l$  se nemění a pohyb těžiště kapaliny v podélném směru je zanedbatelný, můžeme tedy k výpočtu použít geometrii nádrže a kapaliny v rovině čela nádrže. Z tohoto důvodu bude také těžiště uváděno ve tvaru  $T = [y'_{Tk}; z'_{Tk}]$ .

Kapalinu rozdělíme na dvě části, obdélník ① a trojúhelník ②.



Obr. 16 Kvádrová nádrž s vyobrazením případu a

Objem a poloha těžiště části ① jsou

$$V_{\textcircled{1}}^a = lb \left( h - \frac{b}{2} \tan \alpha \right), \quad (29)$$

$$T_{\textcircled{1}}^a = \left[ 0; \frac{h - \frac{b}{2} \tan \alpha}{2} \right]. \quad (30)$$

Objem a poloha těžiště části ② jsou

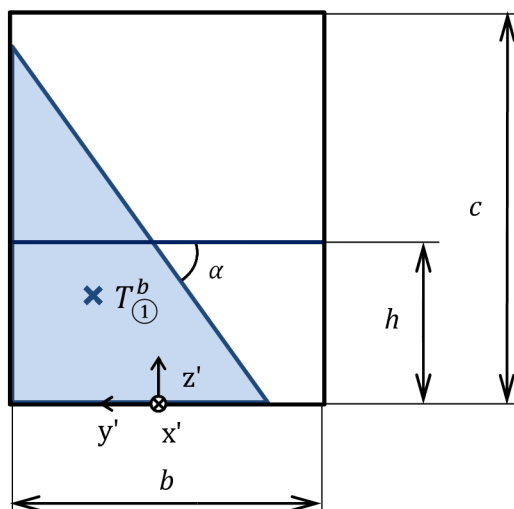
$$V_{\textcircled{2}}^a = l \frac{b}{2} \tan \alpha, \quad (31)$$

$$T_{\textcircled{2}}^a = \left[ \frac{b}{6}; h - \frac{b}{6} \tan \alpha \right]. \quad (32)$$

S použitím vztahu (14) získáme polohu těžiště kapaliny vzhledem k čárkovanému souřadnému systému.



## PŘÍPAD b



Obr. 17 Kvádrová nádrž s vyobrazením případu b

Poloha těžiště je v tomto případě

$$T^b = \left[ \frac{b}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2V}{l \tan \alpha}}; \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2V \tan \alpha}{l}} \right]. \quad (33)$$

## PŘÍPAD c

Kapalinu rozdělíme na tři části, obdélník ① a ② a trojúhelník ③.

Objem a poloha těžiště části ① jsou

$$V_{(1)}^c = lb \left( c - \sqrt{2b(c-h) \tan \alpha} \right), \quad (34)$$

$$T_{(1)}^c = \left[ 0; \frac{c - \sqrt{2b(c-h) \tan \alpha}}{2} \right], \quad (35)$$

kde  $c$  [m] výška nádrže.

Objem a poloha těžiště části ② jsou

$$V_{(2)}^c = l \left( b - \sqrt{\frac{2b(c-h)}{\tan \alpha}} \right) \sqrt{2b(c-h) \tan \alpha}, \quad (36)$$



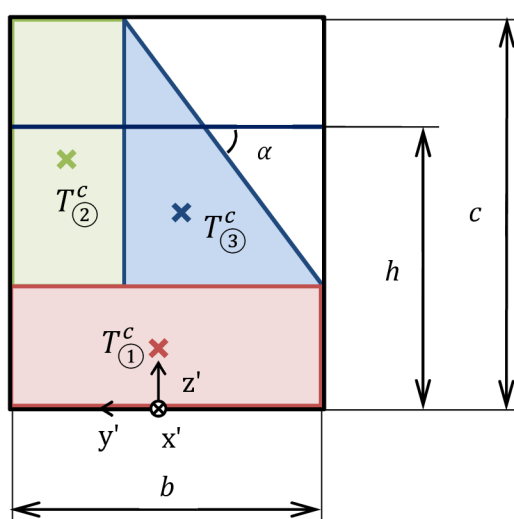


$$T_{\textcircled{2}}^c = \left[ -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2b(c-h)}{\tan \alpha}}; c - \frac{\sqrt{2b(c-h) \tan \alpha}}{2} \right]. \quad (37)$$

Objem a poloha těžiště části ③ jsou

$$V_{\textcircled{3}}^c = lb(c-h), \quad (38)$$

$$T_{\textcircled{3}}^c = \left[ -\frac{b}{2} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2b(c-h)}{\tan \alpha}}; c - \frac{2}{3} \sqrt{2b(c-h) \tan \alpha} \right]. \quad (39)$$



Obr. 18 Kvádřová nádrž s vyobrazením případu c

S použitím vztahu (14) získáme polohu těžiště kapaliny vzhledem k čárkovanému souřadnému systému.

#### PŘÍPAD d

Kapalinu rozdělíme na dvě části, obdélník ① a trojúhelník ②.

Objem a poloha těžiště části ① jsou

$$V_{\textcircled{1}}^d = l \left( bh - \frac{c^2}{2 \tan \alpha} \right), \quad (40)$$

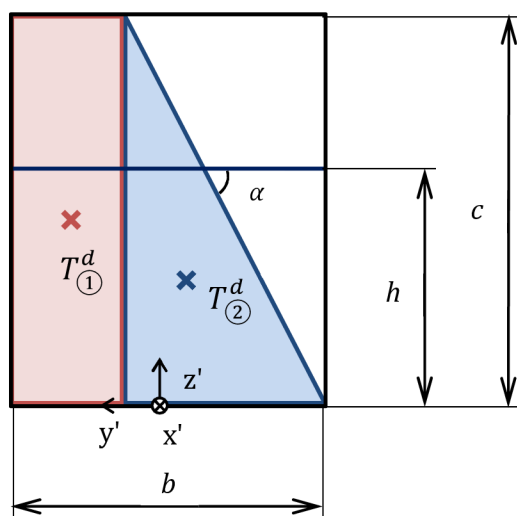
$$T_{\textcircled{1}}^d = \left[ \frac{b}{2} - \frac{bh - \frac{c^2}{2 \tan \alpha}}{2c}; \frac{c}{2} \right]. \quad (41)$$



Objem a poloha těžiště části ② jsou

$$V_{\text{②}}^d = l \frac{c^2}{2 \tan \alpha}, \quad (42)$$

$$T_{\text{②}}^d = \left[ \frac{b}{2} - \frac{bh - \frac{c^2}{2 \tan \alpha}}{c} - \frac{1}{3} \frac{c}{\tan \alpha}; \frac{c}{3} \right]. \quad (43)$$



Obr. 19 Kvádrová nádrž s vyobrazením případu *d*

S použitím vztahu (14) získáme polohu těžiště kapaliny vzhledem k čárkovanému souřadnému systému.

Nyní je třeba přepočítat polohu těžiště kapaliny vzhledem k pneumatikám na vnější straně zatáčky, získáme

$$y_{Tk} = \frac{B}{2} - |y'_{Tk}|, \quad (44)$$

$$z_{Tk} = H + z'_{Tk}. \quad (45)$$

S využitím vztahů (25) a (26) získáme souřadnice těžiště soustavy *vozidlo-náklad*.

Nyní lze dosadit do vztahu (13), získáme vztah pro výpočet maximální nájezdové rychlosti vzhledem k MS převrácení pro vozidlo s kvádrovou nádrží.



## 4 PŘÍKLAD

Zákazník přivezl nákladní vozidlo a dvouosý přívěs s točnou. Rozchod náprav je pro vozidlo i přívěs stejný a činí 2,1 m. Výška podvozku vozidla je 1,1 m, avšak nevhodně vybraný přívěs má podvozek o 0,3 m vyšší. Zákazník si přeje na vozidlo i přívěs namontovat nástavbu s válcovou nádrží o objemu 12 m<sup>3</sup> a průměru 1,8 m.

Pohotovostní hmotnost vozidla po montáži nástavby je 13 000 kg, přívěsu 7 000 kg. Výška těžiště vozidla je 0,8 m, přívěsu 1,1 m. Nejčastěji přepravovanou kapalinou v této soupravě bude znečištěná voda a fekálie, budeme tedy uvažovat hustotu přepravované kapaliny 1 000 kg·m<sup>-3</sup>.

### JAK SE BUDE CHOVAT SOUPRAVA V ZATÁČCE O POLOMĚRU 50 m?

Z přílohy V je patrné, že rychlost přívěsu na mezi převrácení je při stejném naplnění o (10 až 15) km·h<sup>-1</sup> nižší než rychlost nákladního vozidla, je tedy zřejmé, že souprava bude při průjezdu zatáčkou limitována rychlostí přívěsu. Pokud bude v nádrži přívěsu přepravováno do 1,3 m<sup>3</sup> vody, nastane MS smyku při rychlosti přibližně 71 km·h<sup>-1</sup>, pro větší objem přepravované vody nastane MS převrácení při rychlosti, již lze odečíst na křivce „MS převrácení (přívěs)“.

V případě mokrého asfaltu, jak je vidět v příloze VI, již MS převrácení nenastane. Vlivem snížené adheze již nejsou pneumatiky schopny přenést setrvačnou sílu a při rychlosti okolo 56 km·h<sup>-1</sup> nastane MS smyku.

### CO S PŘÍVĚSEM, ABY SE NEPŘEVRACEL?

Z konstrukčního hlediska je nejjednodušší a nejbezpečnější zvolit jiný přívěs, s podvozkem stejně vysokým nebo nižším než na nákladním vozidle. Při použití přívěsu s výškou podvozku 1,1 m místo 1,4 m, dojde ke zvýšení rychlosti na mezi převrácení téměř o 5 km·h<sup>-1</sup>, viz příloha VII. Tato hodnota je stále nižší, než u nákladního vozidla, avšak rozdíl již není tak výrazný. Důvodem, proč je rychlost na mezi převrácení pro přívěs nižší než pro vozidlo, je hmotnost nástavby. Nástavba je umístěna poměrně vysoko a posunuje polohu těžiště nahoru. U přívěsu je tento jev ještě výraznější, protože nástavba tvoří přibližně 2/3 pohotovostní hmotnosti přívěsu.





## ZÁVĚR

Rozdíl rychlostí na mezi převrácení mezi prázdným a naplněným vozidlem může činit (15 až 30) %, v závislosti na konstrukci vozidla a nástavby, viz příloha V. Takto výrazné snížení rychlosti na mezi převrácení při průjezdu zatáčkou je vyvoláno hmotností nákladu, který je umístěn vysoko a jeho hmotnost je řádově srovnatelná s hmotností vozidla.

Srovnáme-li vozidla naložená kapalinou a práškovitou látkou, např. benzinem a mouku, zjistíme, že rozdíl rychlostí na mezi převrácení při stejném naplnění může činit (5 až 10) %, v závislosti na konstrukci vozidla a nástavby, viz příloha IX. Obě látky mají přibližně stejnou hustotu, avšak mouka se nebude v nádrži pohybovat. Tento rozdíl je tedy způsoben pouze pohybem kapaliny. Výše zmíněná hodnota zahrnuje pouze změnu polohy těžiště vlivem působení setrvačného zrychlení, nebere v úvahu dynamický ráz vyvolaný nárazem kapaliny do stěny nádrže. Naměřená hodnota by tedy byla ještě vyšší. Je vidět, že kapalina pohybující se v nádrži má nezanedbatelný vliv na chování vozidla.

Čím vyšší je hustota přepravované kapaliny, tím výraznější vliv na chování vozidla v zatáčce tato kapalina má, viz příloha VIII.

Pro posouzení MS vždy záleží na konstrukci daného vozidla, avšak obecně lze konstatovat: MS smyku nastane pravděpodobněji u nenaloženého vozidla za snížených adhezních podmínek. MS převrácení nastane pravděpodobněji u naloženého vozidla při dobrých adhezních podmínkách, viz přílohy III, IV, V a VI.





## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FLORIAN, Z.; ONDRÁČEK, E.; PŘIKRYL, K. *Mechanika těles: statika*. 7. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 182 s. ISBN 978-802-1434-400.
- [2] PTÁČEK, P.; KAPLÁNEK, A. *Přeprava nákladu v silniční nákladní dopravě*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 111 s. ISBN 80-7204-257-2.
- [3] ŠOB, F. *Hydromechanika: studijní materiál pro I. stupeň magisterského studia, 2. a 3. ročník*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 238 s. ISBN 80-214-2037-5.
- [4] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vydání. Brno, 2003. 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [5] ČSN 73 6102. *Projektování křižovatek na pozemních komunikacích: Český normalizační institut*, listopad 2007. 180 s.
- [6] *Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí*. New York; Geneva: United Nations, 2008. XXII, 646 s.
- [7] Československo. Vyhláška ministra zahraničních věcí ze dne 26. května 1987 o Evropské dohodě o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR). *64/1987 Sb.*
- [8] *ADR - přeprava nebezpečných věcí* [online]. [cit. 2011-03-06]. URL: <<http://www.doprava.vpraxi.cz/adr.html>>.
- [9] *Databáze názvů nebezpečných látek* [online]. [cit. 2011-03-19]. URL: <<http://www.usmd.cz/adrun/>>.
- [10] *dopravní nehoda ...* [online]. [cit. 2011-04-16]. URL: <<http://www.hzspraha.cz/galerie/p090714/index.htm>>.
- [11] *Kontejnerové nástavby* [online]. [cit. 2011-04-25]. URL: <<http://www.agrostarbohemia.cz/cz/?section=products&page=stranka&id=16>>.
- [12] *Kdo koho vycucnul* [online]. [cit. 2011-03-01]. URL: <[http://archiv.roumen.cz/archive/kdo\\_koho\\_vycucnul\\_1.jpg](http://archiv.roumen.cz/archive/kdo_koho_vycucnul_1.jpg)>.
- [13] *Pevná cisternová automobilová nástavba* [online]. [cit. 2011-02-27]. URL: <<http://www.sps-thz.cz/produkty/komunalni-technika/phm/pevna-cisternova-automobilova-nastavba-2.html>>.
- [14] *Pevná fekální nástavba* [online]. [cit. 2011-02-26]. URL: <<http://www.sps-thz.cz/produkty/komunalni-technika/odpadova-fekalni/pevna-fekalni-nastavba-3.html>>.



- [15] *Pevná fekální nastavba v úpravě ADR* [online]. [cit. 2011-04-30].  
URL: <<http://www.sps-thz.cz/produkty/komunalni-technika/odpadova-adr/pevna-fekalni-nastavba-v-uprave-adr-1.html>>.
- [16] *Písemné pokyny* [online]. [cit. 2011-03-19].  
URL: <<http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/86239DA1-7867-4C76-B3F8-18BD253F9C99/0/PÍSEMNÉPOKYNY.doc>>.
- [17] *Pneuservis v Rokytnici* [online]. [cit. 2011-04-17]. Užitečné informace.  
URL: <<http://www.pneu-asistent.cz/Uzitecne-informace.html>>.
- [18] *Přeprava nebezpečných věcí (ADR)* [online]. [cit. 2011-02-25].  
URL: <[http://www.mdcz.cz/cs/Silnicni\\_doprava/Nakladni\\_doprava/adr/Preprava\\_nebezpecnych\\_veci.htm](http://www.mdcz.cz/cs/Silnicni_doprava/Nakladni_doprava/adr/Preprava_nebezpecnych_veci.htm)>.
- [19] *Převrácená cisterna u Barrandovského mostu blokovala dopravu přes 20 hodin* [online]. [cit. 2011-04-16]. URL: <[http://zpravy.idnes.cz/prevracena-cisterna-u-barrandovskeho-mostu-blokovala-dopravu-pres-20-hodin-1ud-domaci.asp?c=A090715\\_073219\\_praha\\_cen](http://zpravy.idnes.cz/prevracena-cisterna-u-barrandovskeho-mostu-blokovala-dopravu-pres-20-hodin-1ud-domaci.asp?c=A090715_073219_praha_cen)>.
- [20] *Výměnná splachovací automobilová nastavba* [online]. [cit. 2011-02-25].  
URL: <<http://www.sps-thz.cz/produkty/komunalni-technika/kropici-proplachovaci/vymenna-splachovaci-automobilova-nastavba-2.html>>.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a$	[1]	střední koeficient objemové roztažnosti kapaliny
$a_d$	[m·s <sup>-2</sup> ]	dostředivé zrychlení
$a_s$	[m·s <sup>-2</sup> ]	setrvačné zrychlení
$b$	[m]	šířka kvádrové nádrže
$B$	[m]	rozchod nápravy
$c$	[m]	výška kvádrové nádrže
$d$	[m]	průměr válcové nádrže
$d_{15}$	[1]	relativní hustota kapaliny při 15 °C
$f$	[1]	součinitel smykového tření
$F_g$	[N]	tíhová síla
$F_n$	[N]	normálová síla
$F_s$	[N]	setrvačná (odstředivá) síla
$F_t$	[N]	třecí síla
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
$h$	[m]	výška hladiny ode dna nádrže
$H$	[m]	vzdálenost dna nádrže od vozovky
$l$	[m]	délka nádrže
$m$	[kg]	součet hmotností vozidla a nákladu
$m_k$	[kg]	hmotnost kapaliny
$m_v$	[kg]	hmotnost vozidla
$r$	[m]	poloměr válcové nádrže
$R$	[m]	poloměr zatáčky
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost vozidla
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem přepravované kapaliny
$V_{\textcircled{1}}^a$	[m <sup>3</sup> ]	část ① objemu kapaliny v případě a
$v_{MSp}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	maximální nájezdová rychlost vzhledem k MS převrácení
$v_{MSs}$	[m·s <sup>-1</sup> ]	maximální nájezdová rychlost vzhledem k MS smyku
$y_T$	[m]	poloha těžiště soustavy vozidlo-náklad ve směru osy y
$y_{Tk}$	[m]	poloha těžiště kapaliny ve směru osy y
$y_{Tv}$	[m]	poloha těžiště vozidla ve směru osy y
$z_T$	[m]	poloha těžiště soustavy vozidlo-náklad ve směru osy z
$z_{Tk}$	[m]	poloha těžiště kapaliny ve směru osy z
$z_{Tk}'$	[m]	poloha těžiště kapaliny ve směru osy z
$z_{Tv}$	[m]	poloha těžiště vozidla ve směru osy z' (vztaženo ke středu nádrže)
$\alpha$	[°]	úhel vychýlení hladiny kapaliny od horizontální roviny
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota přepravované kapaliny



---

ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
atp.	a tak podobně
CFD	Computational Fluid Dynamics
č.	číslo
MS	mezní stav, mezní stavy
např.	například
obr.	obrázek
pozn.	poznámka
Sb.	sbírky
tzv.	takzvaný, takzvaně
tj.	to je
vs.	versus



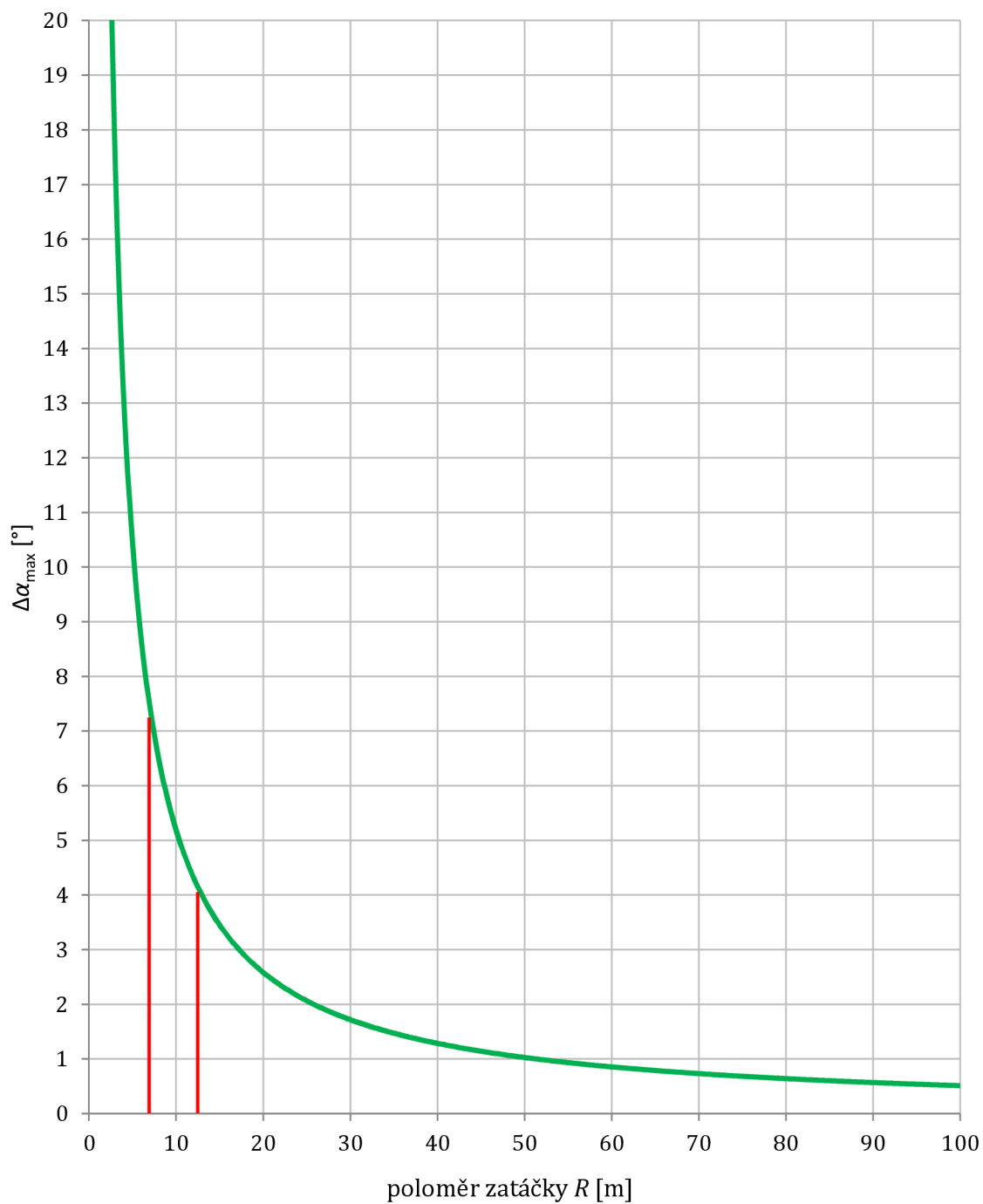
## SEZNAM PŘÍLOH

Nahraditelnost rotačního paraboloidu rovinou .....	I
Tabulka součinitelů tření .....	II
v-R diagram pro různé typy povrchů .....	III
v-R diagram pro různě naplněné nádrže .....	IV
v-V diagram, suchá asfaltová zatáčka o poloměru 50 m .....	V
v-V diagram, mokrá asfaltová zatáčka o poloměru 50 m.....	VI
v-V diagram, výběr přívěsu .....	VII
v-V diagram, různé kapaliny .....	VIII
v-V diagram, kapalina vs. nepohyblivý náklad.....	IX
$a_s$ -V diagram, průběh setrvačného zrychlení.....	X
$\alpha$ -V diagram, průběh úhlu vychýlení hladiny .....	XI
Průběh rychlosti při iteračním řešení .....	XII





## NAHRADITELNOST ROTAČNÍHO PARABOLOIDU ROVINOU



*Příloha I Závislost maximálního rozdílu úhlů  $\alpha$  na poloměru zatáčky při MS převrácení*

První červená čára označuje minimální poloměr zatáčky na silnicích III. třídy, druhá červená čára označuje minimální poloměr zatáčky na silnicích I. a II. třídy podle [5].



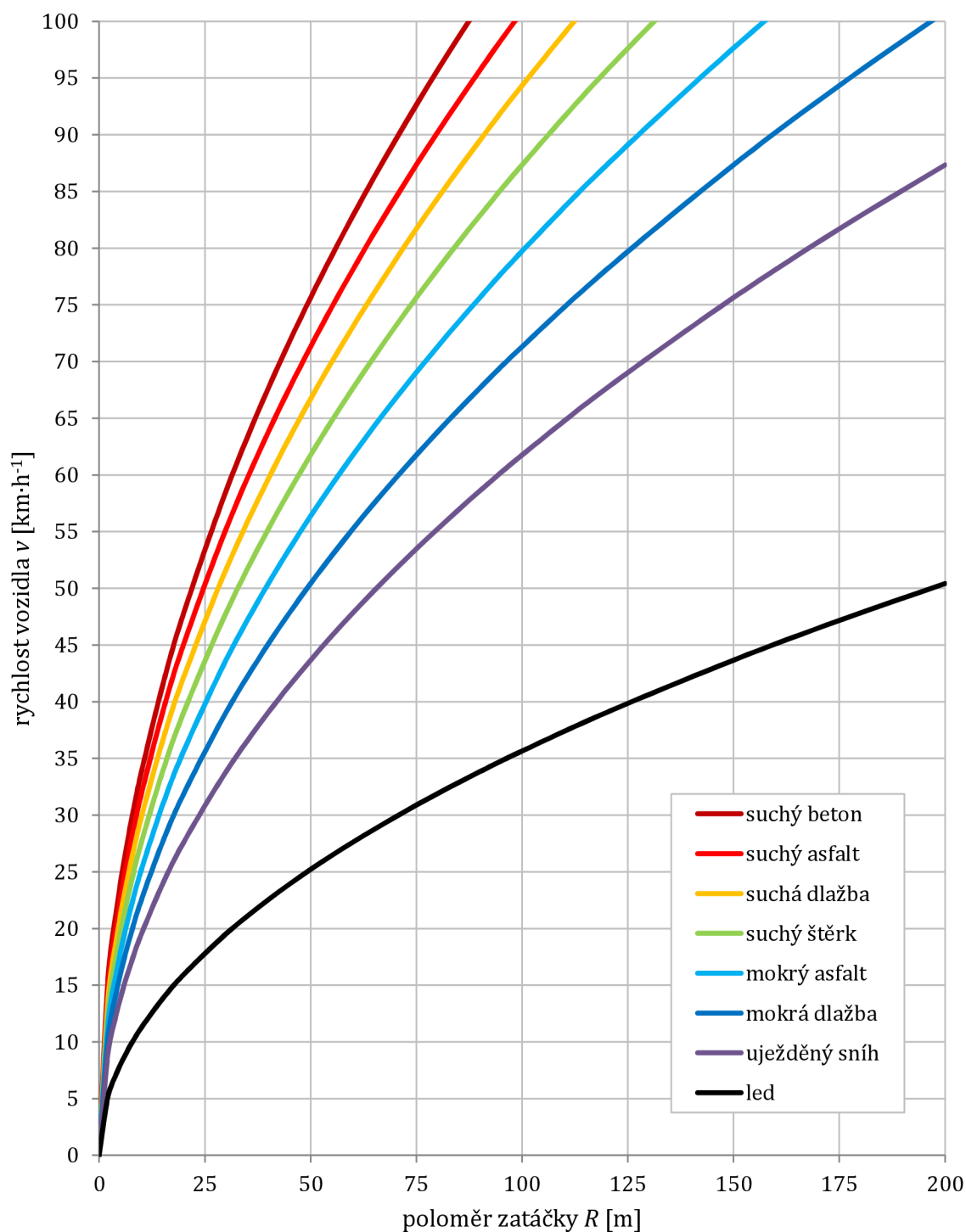
## TABULKA SOUČINITELŮ TŘENÍ

*Příloha II Tabulka součinitelů tření  $f$  pro pneumatiku a uvedený materiál [4][17]*

Typ povrchu		Součinitel tření $f$ [1]
asfalt	suchý	0,7 – 0,9
	mokrý	0,4 – 0,6
beton	suchý	0,8 – 1,0
	mokrý	0,5 – 0,8
dlažba	suchá	0,6 – 0,8
	mokrá	0,3 – 0,5
polní cesta	suchá	0,4 – 0,6
	mokrá	0,3 – 0,4
štěrk	suchý	0,5 – 0,7
	mokrý	0,3 – 0,5
hluboký sníh		0,3 – 0,4
uježděný sníh		0,2 – 0,3
led		0,1



## V-R DIAGRAM PRO RŮZNÉ TYPY POVRCHŮ

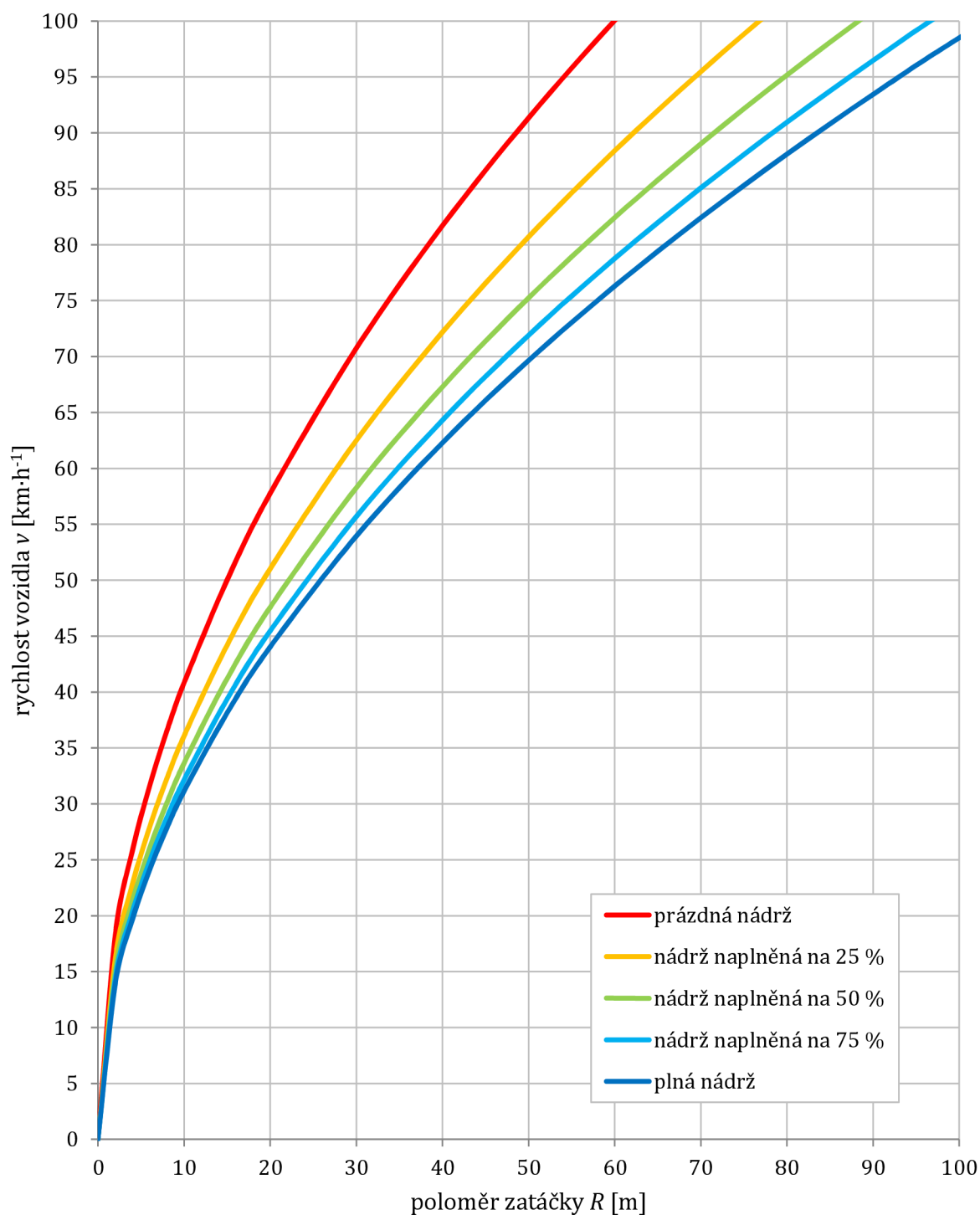


Příloha III Závislost rychlosti na poloměru zatáčky (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Křivky představují nejvyšší rychlost pro průjezd zatáčkou, při které ještě nedojde k MS smyku na daném povrchu, plocha pod danou křivkou je oblast provozních rychlostí.



## V-R DIAGRAM PRO RŮZNĚ NAPLNĚNÉ NÁDRŽE



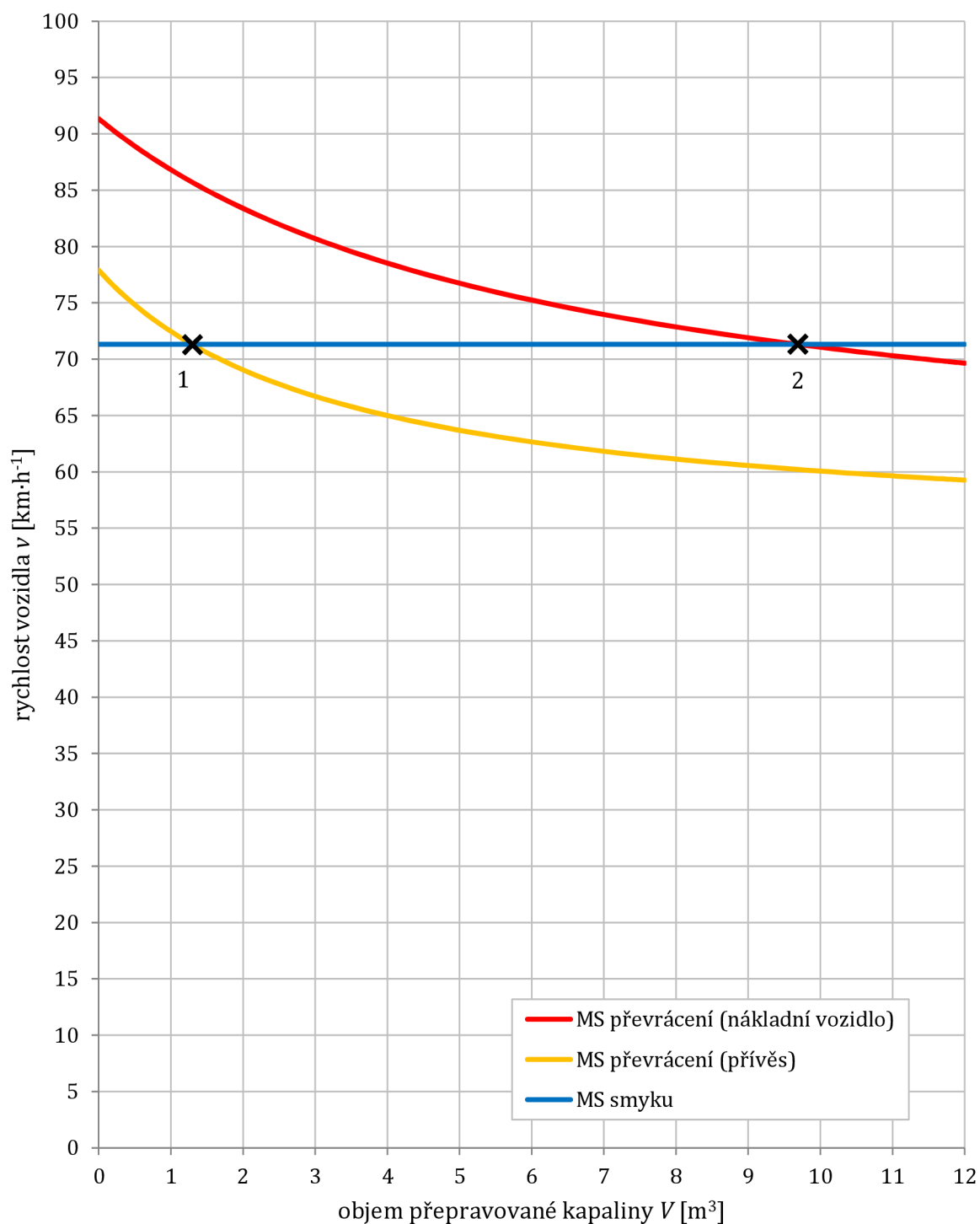
Příloha IV Závislost rychlosti na poloměru zatáčky (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Křivky představují nejvyšší rychlost pro průjezd zatáčkou, při které ještě nedojde k MS převrácení s daným naplněním nádrže, plocha pod danou křivkou je oblast provozních rychlostí.





## V-V DIAGRAM, SUCHÁ ASFALTOVÁ ZATÁČKA O POLOMĚRU 50 M

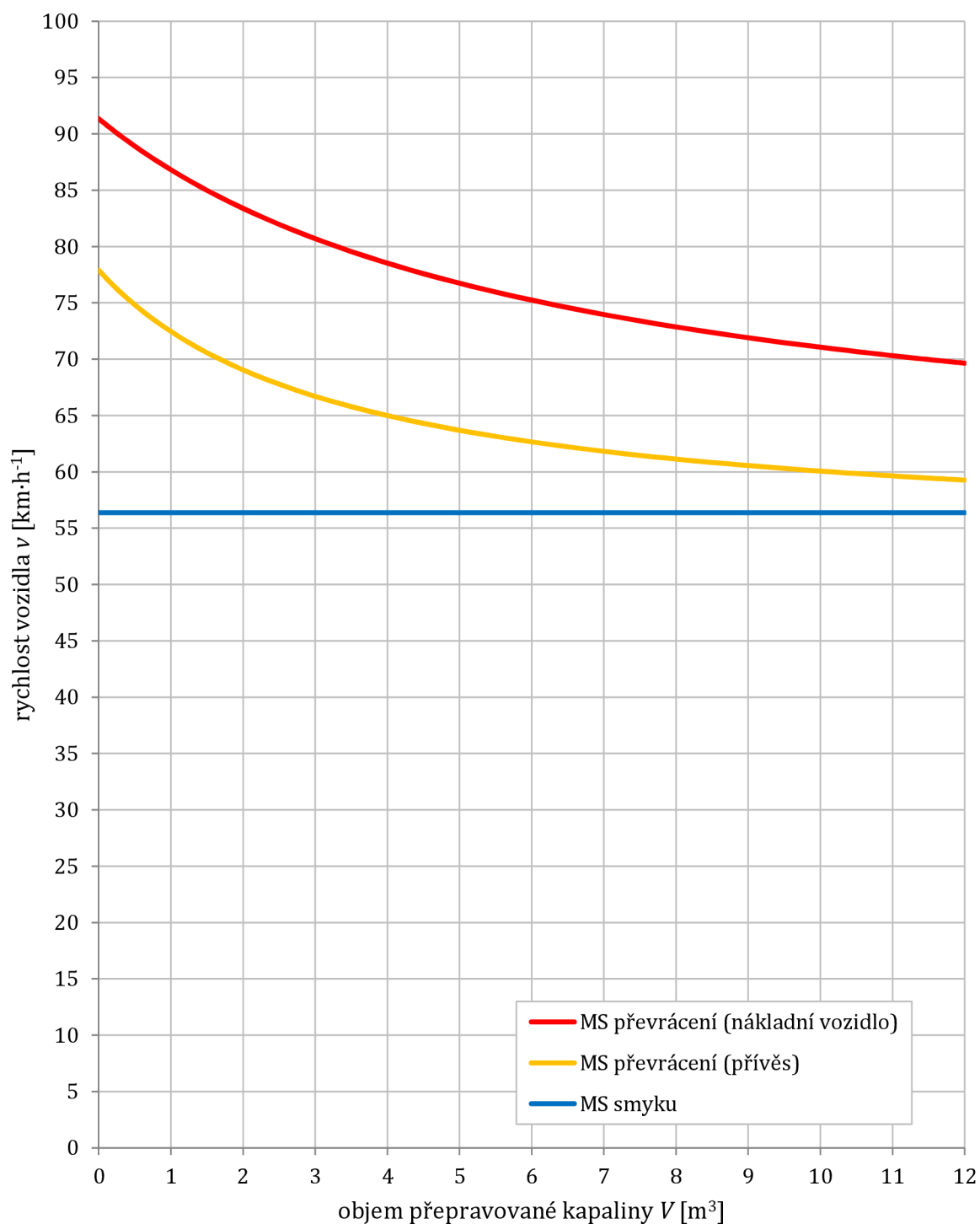


Příloha V Závislost rychlosti na objemu kapaliny (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Průjezd soupravy zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m na suchém asfaltu. Pro přívěs a tedy i celou soupravu nastává zvrát v bodě 1, pro menší objem přepravované kapaliny hrozí MS smyku, pro větší objem přepravované kapaliny hrozí MS převrácení. Pro nákladní vozidlo bez přívěsu je bodem zvratu bod 2.



## V-V DIAGRAM, MOKRÁ ASFALTOVÁ ZATÁČKA O POLOMĚRU 50 M

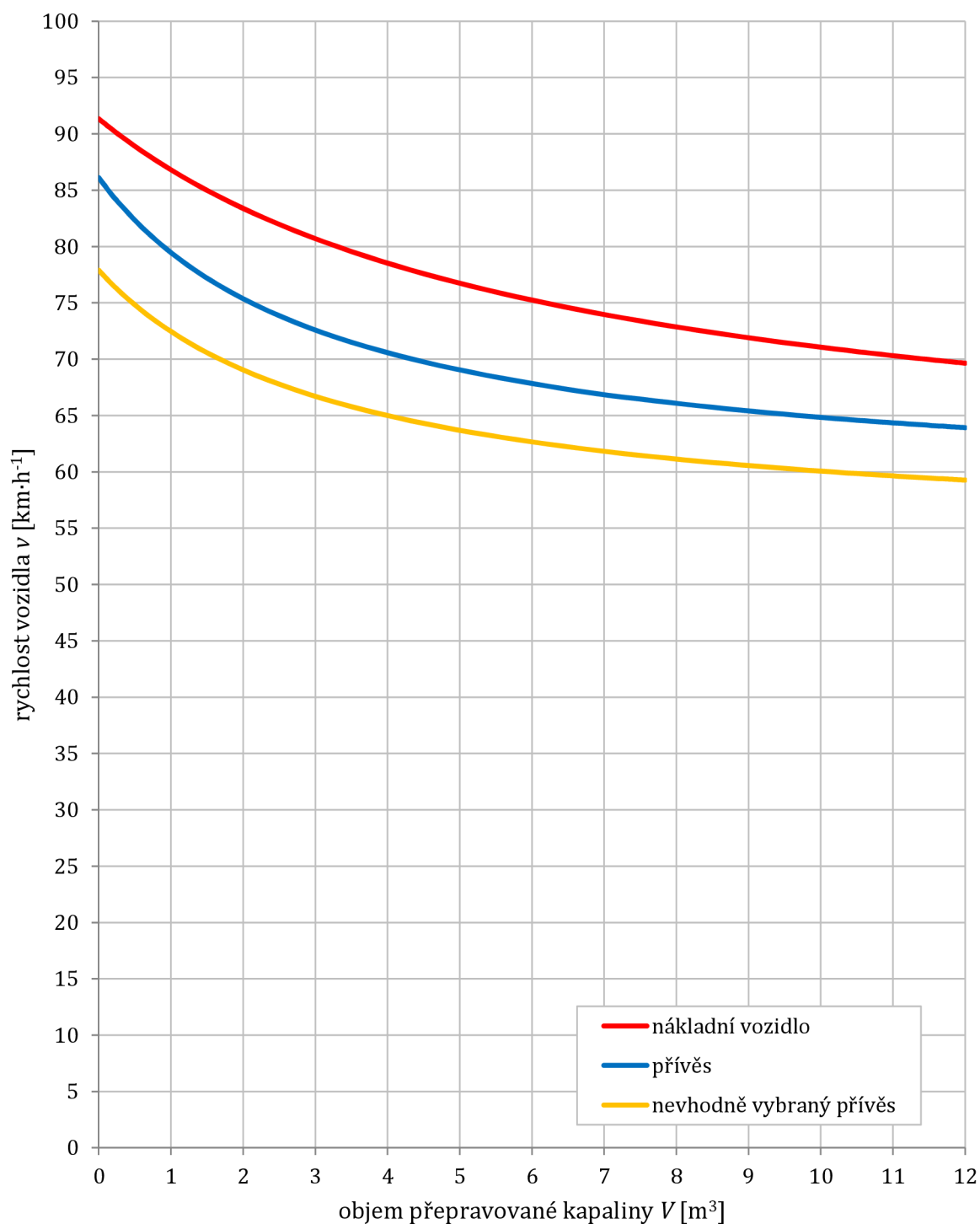


Příloha VI Závislost rychlosti na objemu kapaliny (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Průjezd soupravy zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m na mokrém asfaltu. Zde není žádný bod zvratu, při vysoké nájezdové rychlosti dojde v této zatáčce k MS smyku.



## V-V DIAGRAM, VÝBĚR PŘIVĚSU

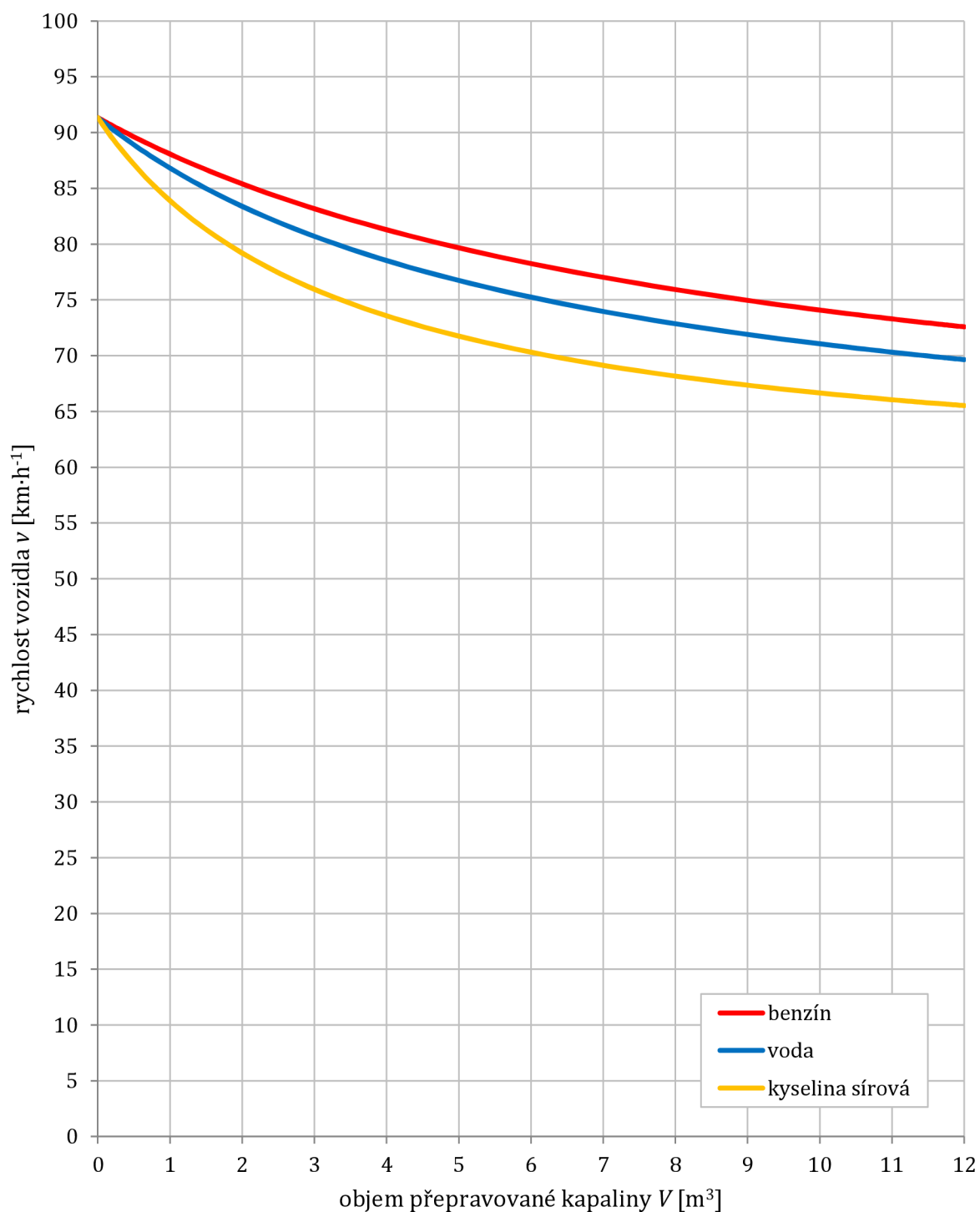


Příloha VII Závislost rychlosti na objemu kapaliny (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Průjezd soupravy zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m. Nákladní vozidlo a přívěs mají výšku podvozku 1,1 m, nevhodně vybraný přívěs má tuto výšku 1,4 m. Na mezi převrácení je pak v tomto případě rozdíl mezi oběma přívěsy (5 až 10) km·h<sup>-1</sup>.



## V-V DIAGRAM, RŮZNÉ KAPALINY

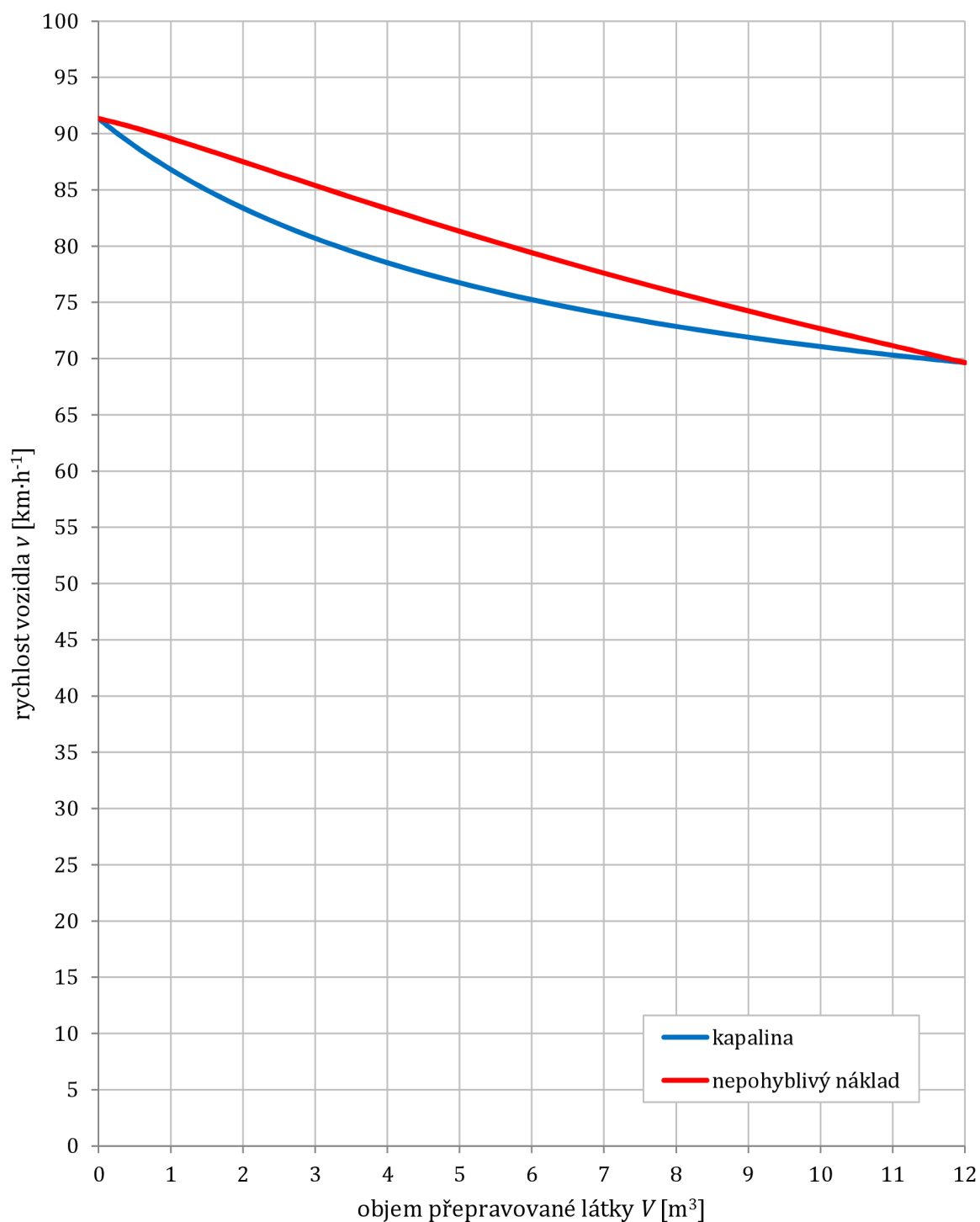


Příloha VIII Závislost rychlosti na objemu kapaliny (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Průjezd nákladního vozidla zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m. Přepravovanými látkami jsou v tomto případě benzin o hustotě  $690 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , voda o hustotě  $1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a koncentrovaná kyselina sírová o hustotě  $1\,835 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Největší rozdíl rychlostí na mezi převrácení mezi benzinem a kyselinou sírovou činí přibližně  $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .



## V-V DIAGRAM, KAPALINA VS. NEPOHYBLIVÝ NÁKLAD

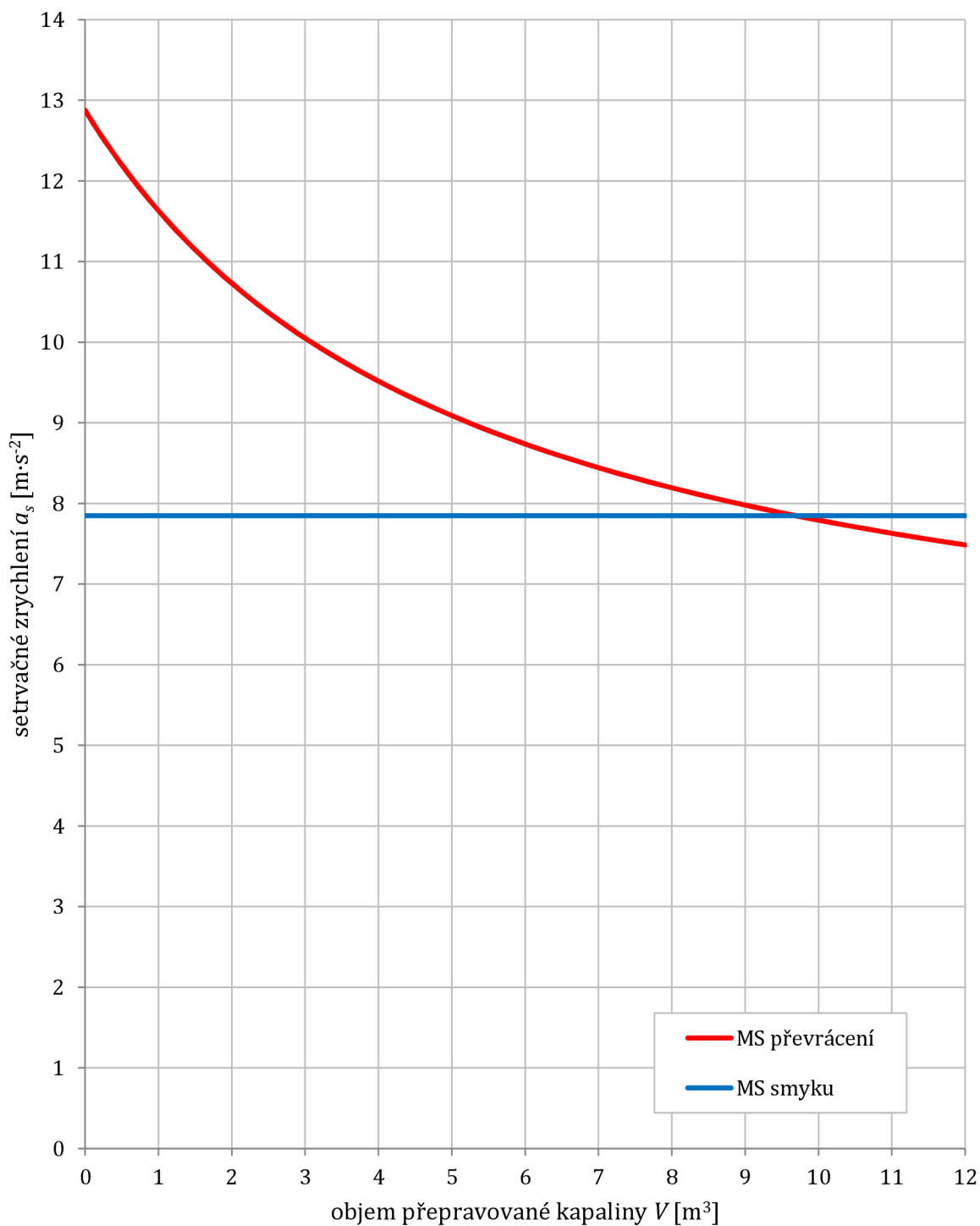


Příloha IX Závislost rychlosti na objemu kapaliny (použitá data viz příklad v kapitole 4)

Průjezd nákladního vozidla zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m. Kapalina i nepohyblivý náklad je v tomto případě přepravován ve válcové nádrži o průměru 1,8 m, hustoty obou nákladů jsou shodné. Největší rozdíl rychlostí na mezi převrácení je při třetinovém naplnění a činí přibližně  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .



## $a_s$ - $V$ DIAGRAM, PRŮBĚH SETRVAČNÉHO ZRYCHLENÍ

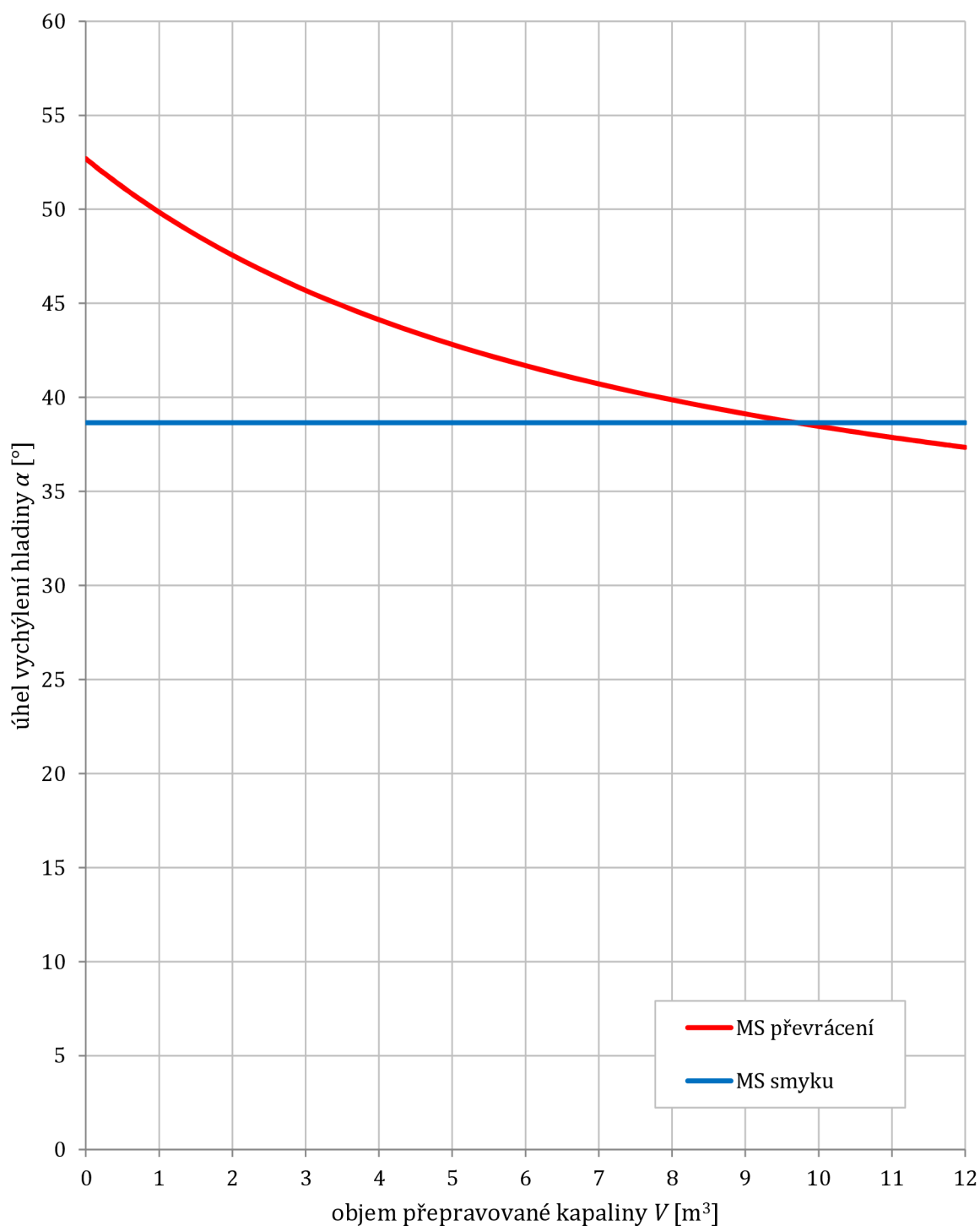


Příloha X Závislost setrvačného zrychlení na objemu kapaliny (použitá data viz kapitola 4)

Průběh setrvačného zrychlení při průjezdu vozidla zatáčkou o poloměru 50 m. Křivky představují setrvačná zrychlení, při nichž dojde k MS převrácení, respektive MS smyku. Nastane MS s nižší hodnotou zrychlení.



## $\alpha$ -V DIAGRAM, PRŮBĚH ÚHLU VYCHÝLENÍ HLADINY

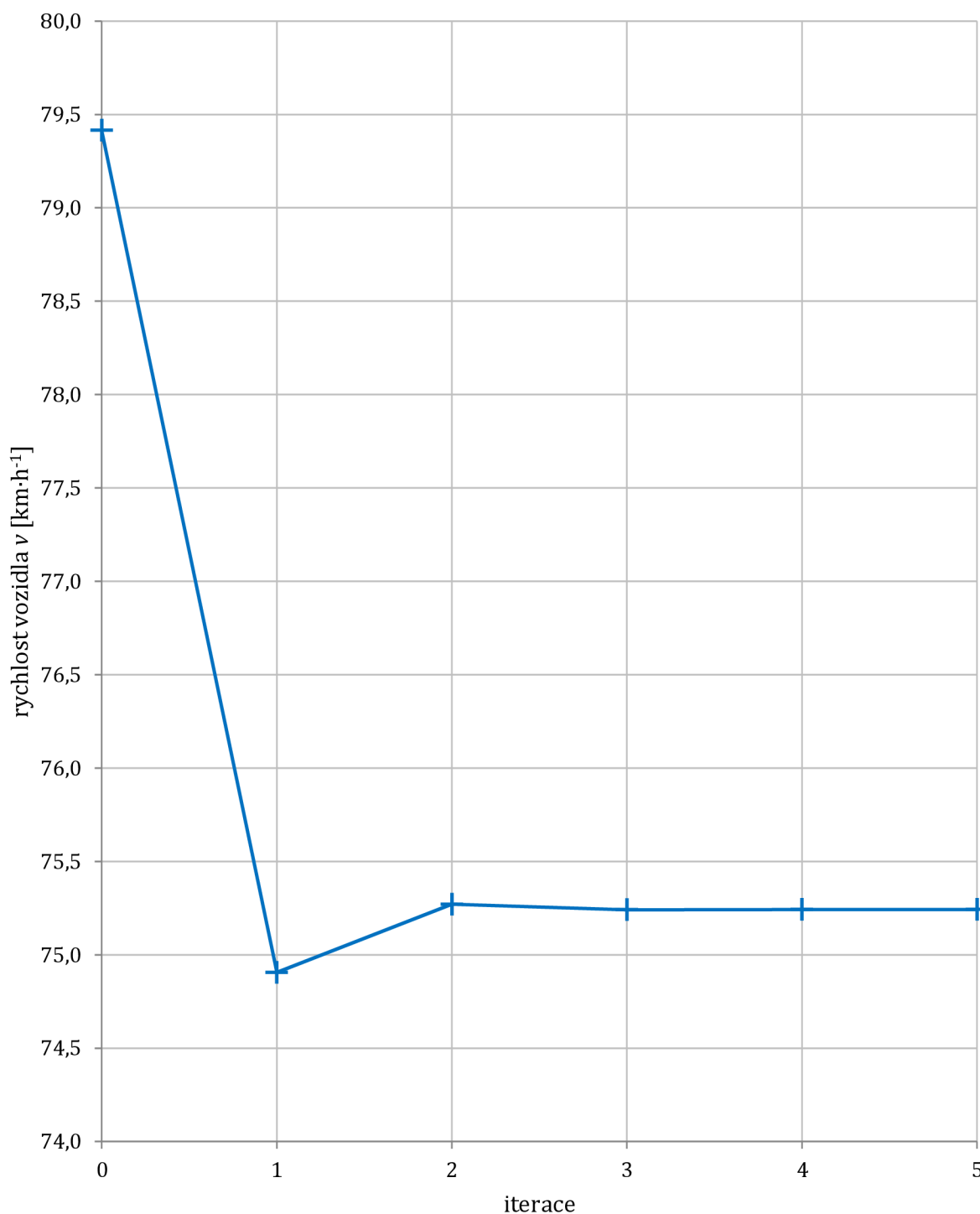


Příloha XI Závislost úhlu vychýlení hladiny na objemu kapaliny (použitá data viz kapitola 4)

Průběh úhlu vychýlení hladiny při průjezdu vozidla zatáčkou o poloměru 50 m. Křivky představují úhel vychýlení, při MS převrácení, respektive MS smyku.



## PRŮBĚH RYCHLOSTI PŘI ITERAČNÍM ŘEŠENÍ



*Příloha XII Průběh rychlostí při iteračním řešení (použitá data viz příklad v kapitole 4)*

Průběh iteračního výpočtu nákladního vozidla projíždějícího zatáčkou o poloměru  $R = 50$  m. Řešení konverguje k hodnotě  $75,243$  km·h<sup>-1</sup>. Pro výpočet nulté iterace byla použita hodnota setrvačného zrychlení při MS převrácení pro hladinu v horizontální poloze (nehybný náklad).