

ADHEZE PNEUMATIK V ANALÝZE SILNIČNÍCH NEHOD

Doc.Ing.Jindřich ŠACHL, CSc (st.)
RNDr.Ing.Jindřich ŠACHL, Ph.D. (ml.)

**ČVUT v Praze, Fakulta dopravní,
Ústav soudního znalectví v dopravě
říjen 2008**

Obsah

0	Předmluva	4
1	OBEČNÁ ČÁST	4
1.1	Nejdůležitější úvodem	4
1.2	„Střední hodnoty“	9
1.3	Vlídá odmocnina	9
1.4	K účinnosti brzd a k rozdělení brzdných sil	10
1.5	Tření nebo adheze ?	11
1.6	K základním zákonitostem	12
1.7	K velikosti součinitele tření	13
1.8	Adhezní tíha	13
1.9	K souvislosti zpomalení se sklonem vozovky	14
2	STOPY PNEUMATIK	15
2.1	Stopy brzdné nebo blokové ?	15
2.2	Když začátky pravé a levé stopy brzdění neleží na jedné úrovni	16
2.3	K přerušení stop brzdění	16
2.4	Zpomalení na různě adhezních površích za sebou	17
2.5	Co s antiblokem ?	18
2.6	Kdy vznikají stopy pneumatik ?	19
2.7	Pozor na stopy nebrzděných pneumatik !	20
2.8	Limit zrychlení v bočním směru	20
3	MĚŘICÍ METODY V PRAXI	21
4	ZÁKONITOSTI ADHEZE ZA RŮZNÝCH STAVŮ VOZOVKY A PNEUMATIK	23
4.1	Vliv rychlosti	24
4.2	Vliv množství vody	24
4.3	Vliv skluzu kola	25
4.4	Vliv makro- a mikrotextury povrchu vozovky	25
4.5	Vliv dezénu pneumatiky	26
4.6	Vliv složení pryže běhounu pneumatiky	26
4.7	Vliv teploty	26
4.8	Vliv hustění pneumatiky	26
4.9	Vliv ročního období	27
4.10	Vliv stáří vozovky	27
4.11	Vliv polohy jízdních stop na vozovce	27
4.12	Vliv znečištění vozovky	28

4.13	Vliv zatížení kola	30
4.14	Vliv konstrukce plášťů	30
4.15	Vliv ojetí dezénu	31
4.16	K problematice aquaplaningu	31
5	ADHEZE V PRAXI	36
5.1	Jak se pozná kluzká vozovka a jak určit součinitele adheze . .	36
5.2	Na začátku deště	39
5.3	Jaké vzít tolerance	39
5.4	Jaké nejnižší hodnoty součinitele adheze se mohou vyskytnout	40
5.5	Jak uvažovat adhezi měnící se s rychlostí jízdy (za mokra) . .	42
5.6	Jaká je adheze na blátě	43
5.7	Problematika zledovatělé vozovky	43
5.7.1	K tvorbě náledí a ledovky	43
5.7.2	K adhezi pneumatik na ledě	45
5.7.3	K možnostem rozpoznat náledí	45
5.7.4	Další zimní podmínky	46
5.8	Adheze v bočním směru	46
6	PŘIMĚŘENÁ A KRITICKÁ RYCHLOST	52

0 Předmluva

Dopravní nehoda je fyzikální děj. Míra adheze pneumatik je jedním z hlavních parametrů v analýze dopravních nehod. Aplikace adheze pneumatik bývá v analýze dopravních nehod relativně často provázena neujasněností rozdílu mezi adhezními nároky a možnostmi, neadekvátní aplikací veličin, jejich hodnot apod. Proto je tato publikace koncipována jako praktická příručka zejména pro soudní znalce, aby sloužila pohotově při řešení různých problémů. Je dlouholetým souhrnem experimentálních poznatků z výzkumu protismykových vlastností vozovek, z více než třicetileté praxe znalce-analytika dopravních nehod a ze studia literatury. Je vedena snahou pojednat nejrůznější vlivy. Ty se ale navzájem prolínají v mnoha souvislostech, a tak u méně významných vlivů je uváděn slovní popis souvislostí (použitá adjektiva odkazují spíše k poučenému odhadu než k nějakému exaktnímu odvozování : častý, vyšší, důležitý, strmý apod.), než kupit spousty diagramů.

Hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek představuje samostatnou obsáhlou problematiku, jež není předmětem této publikace.

1 OBECNÁ ČÁST

1.1 Nejdůležitější úvodem

Dosažitelné zpomalení vozidla při intenzivním brzdění je dáno hlavně **dvěma vzájemně zcela nezávislými parametry**, jejichž vliv lze názorně vysvětlit. V konkrétním případě se většinou uplatňuje jen jeden z těchto dvou parametrů.

- a) **Účinnost brzd vozidla.** Vozovka s mimořádně dobrými protismykovými vlastnostmi tedy vozovka drsnější, než je běžné, nic nezachrání, jsou-li na vozidle neúčinné (zamaštěné či jinak porouchané) brzdy. V takovém případě nelze protismykové kvality povrchu vozovky využít. Kola (brzdy) prostě nebrzdí „a hotovo“.
- b) **Adheze pneumatik na vozovce.** Mimořádná účinnost brzd nic nezachrání na kluzké vozovce (mokrě mimořádně hladké, zablácené či zledovatělé). V takovém případě prostě nelze účinnost brzd využít, ani kdyby měl osobní automobil brzdy z velkého dopravního letadla. Na kluzké vozovce pneumatiky prostě kloužou tak, jako může na náledí uklouznout i ten nejsilnější muž.

Proto nelze ve znalecké praxi v problematice odvozování rychlosti používat výhradně jenom hodnoty zpomalení charakterizující účinnost brzd (např.

tzv. „zákoně“), ale stejně tak nelze uvažovat jen samotnou adhezi pneumatik, tedy „zakuklit“ se do problematiky „adheze“ a počítat jen s nějakými tabulkovými hodnotami součinitele tření. Je nutno případ od případu diferencovat a náležitě **uvážit, který z uvedených dvou parametrů se uplatnil jako slabší článek řetězu.**

Principiální rozdíl mezi oběma parametry plyne i z následujícího srovnání :

- ad a) Pokud se brzděné kolo otáčí bez větších skluzů, **ohřívají se brzdy** a nevznikají stopy brzdění.
- ad b) Když se zabrzděné kolo přestane otáčet (zablokuje se), pak zcela **ustane ohřev brzd, a tření s vývinem tepla se přeneso do stykové plochy pneumatiky s vozovkou.** Nastává možnost vzniku blokovacích stop.

V každém z těchto dvou stavů jde o tření jiných materiálů při působení jiných sil na jiném místě. To je **nutno důsledně rozlišovat.**

V praxi ovšem přichází v úvahu částečná kombinace obou uvedených limitních stavů : brzdění s intenzitou na mezi adheze pneumatik, kdy se kola ještě otáčejí, ale již s větším skluzem za vzniku stop brzdění. Proto je v odstavci ad a) uvedeno „... bez větších skluzů...“. Zpomalení je v takovém případě dáno limitem adheze.

S tím souvisí i pojmenování stop. Pojem „stopy blokovací“ je většinou jednoznačný – jde o stopy vytvořené podélným smýkáním zablokovaných kol, jež se neotáčejí.

Pojmem „stopy brzděné“ se běžně označují ty, které přísluší zmíněnému přechodnému stavu – brzděné kolo otáčející se s větším skluzem. Pozor však na to, že i blokovací stopy jsou stopami brzdění vozidla.

„Stopy driftové“ mají původ v bočním usmykávání rotujících pneumatik, jež neztratily možnost směrového vedení, odvalují se pod velkým úhlem směrové úchytky.

„Stopy smykové“ mohou vznikat, když adhezní nároky v bočním směru překročí nad okamžité adhezní možnosti.

Další podstatnou okolností, v níž je naprosto nezbytné rozlišovat a být orientován, jsou :

- **adhezní nároky,**
- **adhezní možnosti.**

Snad je to jasné už ze samotných názvů, jen je nutno na toto důležité rozdělení pamatovat. Adhezní nároky nemohou překročit přes adhezní možnosti.

Jízda, při níž by se kladly adhezní nároky nad adhezní možnosti, znamená ztrátu ovladatelnosti vozidla. Nelze však hned paušálně vyslovit výrok, že „Řidič nepřizpůsobil rychlost jízdy okolnostem . . .“. Na místo těch tří teček totiž patří dovětek : „. . . které bylo možno předvídat“. Umí znalci sami vždy přesně určit hodnotu součinitele adheze na dané textuře vozovky za mokra ? Dokázali bychom to „na dálku“ pohledem z jedoucího vozidla ? Pamatujme na to, že odhad (volba) přiměřené rychlosti je ztížen tím, že nutné brzdné zpomalení a i boční zrychlení a_b principiálně **rostou s druhou mocninou rychlosti jízdy** podle vztahů (1) a (2),

$$a = \frac{V^2}{2.L} \quad (1)$$

kde a je střední brzdné zpomalení [m.s^{-2}] potřebné k zastavení z rychlosti V [m.s^{-1}] na délce čisté brzdné dráhy L [m],

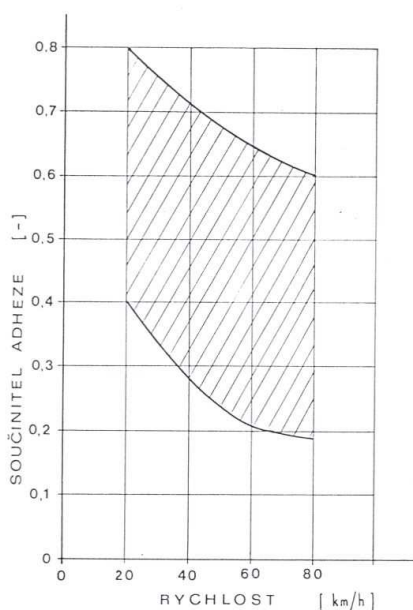
$$a_b = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

kde a_b je boční zrychlení [m.s^{-2}] působící na vozidlo jedoucí po vodorovné ploše rychlostí V [m.s^{-1}] po oblouku o poloměru R [m]. Poznamenejme, že jde o poloměr dráhy vozidla, jenž nemusí být totožný s poloměrem zatáčky – zvláště při malém středovém úhlu zatáčky přicházejí v úvahu značné difference mezi poloměrem zatáčky a poloměrem dráhy vozidla.

Ovšem ne každý řidič, který dostane s vozidlem smyk, je automaticky nevinný. Jsou však určité zvláštní okolnosti nebo jejich kumulace, při nichž může dojít k mimořádnému snížení adheze, přičemž tyto okolnosti nelze z místa řidiče pohledem rozpoznat nebo je jinak předvídat. Například některé formy náledí nejsou rozeznatelné od mokrého povrchu vozovky pohledem ani z pozice chodce. Může se stát při teplotní inverzi, že v údolí mrzne déšť na vozovce, zatímco na úbočí byla teplota nad nulou (řidič netuší „zradu“). Také takové technické okolnosti by měl technický znalec předložit soudu.

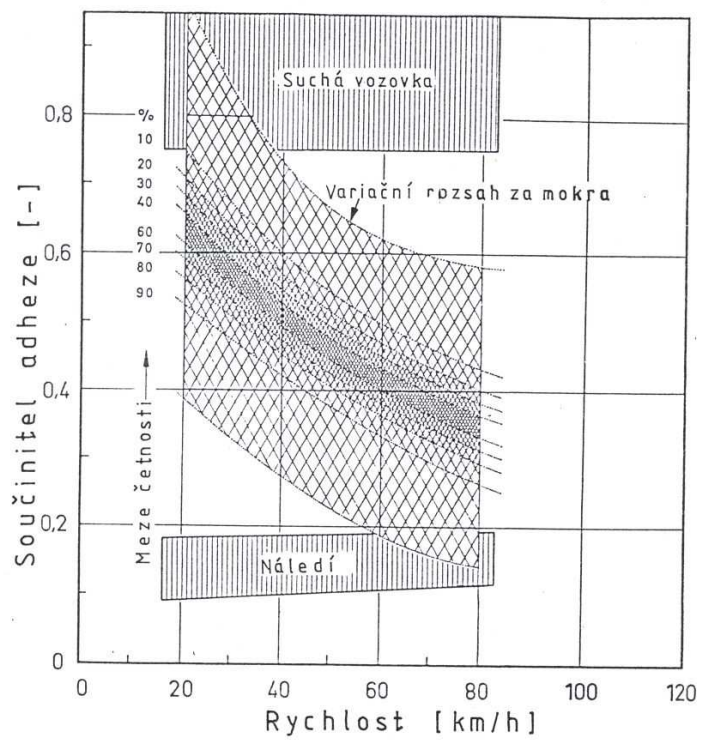
Ve znalecké praxi se setkáváme s více či méně kluzkými vozovkami snad ještě častěji, nežli s různě účinnými brzdami vozidel. Vozovky, jejichž povrch je zcela hladký, jsou za mokra kluzké. Existují rovněž vozovky drsné. **Na každém druhu povrchu** (beton, živice, dlažba) **však hodnoty součinitele adheze pneumatik za mokra klesají se vzrůstající rychlostí jízdy**. Na různě drsných površích jsou hodnoty součinitele adheze při nízké rychlosti (obvykle se udává hodnota při 20 km/h) různě vysoké. Se vzrůstající rychlostí pak klesají různě strmě. Grafy v obr.1 a 2 dokumentují, jakého rozpětí hodnot může součinitel adheze pneumatik za mokra nabývat na různě drsných površích (viz též lit.[6] a [9]). Hodnoty v grafu č.1 jsou z vozovek, jež byly **všechny zhotoveny z asfaltového betonu**. Nejsou zahrnuty

ostatní živičné úpravy, vozovky z cementového betonu a dlažby. K vlivům přistupuje ještě tloušťka vodního filmu (pro rychlosti zhruba nad 50 km/h), teplota, dezén a tvrdost pryže pneumatik, míra skluzu, zatížení kola, hustění pneumatik, roční období (vozovky jsou nejvíce ohlazeny provozem – tedy za mokra nejkluzčí – v létě, přes zimu se drsnost regeneruje), znečištění vozovky, výběr jízdní stopy (ohlazení povrchu provozem).



Obrázek 1: Rozsah hodnot součinitele adheze pneumatik s dezénem hlubším než 1 mm na vozovkách z asfaltového betonu (19 zkušebních úseků) za mokra při zcela zabrzděném kole. Výsledky měření provedených ve Výzkumném ústavu dopravním.

Tedy : zatímco pro suchou vozovku lze akceptovat většinu tabulek hodnot součinitele adheze uváděných v různé literatuře, pro mokrou vozovku žádné takové směrné hodnoty neplatí. Bohužel různí autoři takové tabulky navzájem opisovali a tak se objevily v různých publikacích. Údaj např. 0,4 jako směrná (tabulková) hodnota součinitele adheze na živičné vozovce za mokra může být silně zavádějící, neboť reálná hodnota se pohybuje od cca 0,70 do 0,15 (pro různé textury povrchů, různé rychlosti a další vlivy – viz též obr.1 a 2 a další text této publikace). Je to, jako kdyby byla „tabulková“ výška dětí udána 120 cm.



Obrázek 2: je převzat z lit. [7], kde se k němu uvádí : Rozdělení četnosti a variační rozsah součinitele adheze (mokrý vozovka, výpočtová tloušťka vodního filmu 1 mm) souboru vozovek novodobých konstrukcí.

1.2 „Střední hodnoty“

„Pachatelé“ nehod většinou nebývají zločinci, k nehodám dochází většinou z přehlédnutí či jiným omylem. Znalci nepřísluší posuzovat vinu, a tak by znalec měl dát orgánům činným v trestním řízení takové technické podklady, které umožní posoudit nejen zavinění, ale nemělo by se zapomenout ani na příslušné polehčující okolnosti z řady souvislostí technických parametrů příslušejících k danému případu. Vzhledem k tomu, že některé parametry (zpomalení vozidla zejména) neznáme přesně, musíme dát příslušný prostor k zákonným právním úvahám – pochybnost ve prospěch obviněného. Nezapomínejme na to !

Mějme případ, kdy osobní automobil zanechal na čisté suché vodorovné živičné vozovce výrazné blokové stopy všemi čtyřmi koly, stopy byly vzájemně přibližně shodné délky. Vezměme, že brzdné zpomalení na dané textuře povrchu vozovky přicházelo v úvahu v rozsahu od 6,5 do 8,5 m.s⁻². Použijeme-li v našich odvozeních „pro jistotu“ jedinou „oblíbenou“ hodnotu brzdného zpomalení 5,8 m.s⁻², pak si pleteme nejmenší předepsanou účinnost brzd se skutečnou adhezí pneumatik. Policii a soudu tím dáváme nesprávný výsledek. Je radno **počítat spíše s příslušnými rozsahy hodnot zpomalení nežli s jejich hodnotami středními.**

Není snad nutné podotýkat, že obdobnou chybou by bylo uvažování „zákonného“ zpomalení 5,8 m.s⁻² v případě kluzké vozovky.

Připomínám zcela na okraj, že hodnota zpomalení 5,8 m.s⁻² je nejnižší zpomalení, jaké musí být schopny vyvinout brzdy osobního automobilu na suché vodorovné vozovce **při zatížení na celkovou (maximální povolenou) hmotnost daného typu osobního automobilu.** Zanechá-li osobní automobil čtyři stopy brzdění na suché vozovce poskytující hodnotu součinitele tření $f = 0,8$, pak zřejmě jeho brzdy nebyly ve stavu jen právě sotva vyhovujícím předpisu, ale poskytovaly zpomalení vyšší ($a = 7,84$ m.s⁻²), než nejmenší požadované. Příslušná rychlost pak má být uvedena vyšší – druhý účastník nehody by byl poškozen ve svých právech, kdyby nebyla uvedena správná (vyšší) hodnota rychlosti toho, s nímž se střetl.

1.3 Vlídna odmocnina

Žádný měřený údaj není absolutně přesný. V oblasti adheze pneumatik počítáme mnohdy dokonce jen s údaji určenými odborným odhadem. Proto je nezbytné pracovat s určitými rozsahy, k jejichž volbě vedou dva protichůdné požadavky :

- v zájmu přesnosti by měly být toleranční meze co nejužší,

- v zájmu spolehlivosti, že reálná hodnota nevybočí z tolerančních mezí, musí být toleranční meze přiměřeně široké.

Hodnotu zpomalení vozidla a bychom většinou rádi znali s přesností lepší, než jakou máme k dispozici. Mnohdy bývá problematická i přesnost délky brzdné dráhy L . V mnohých úlohách nám přichází na pomoc efekt, který jsem kdysi nazval „vlídná odmocnina“. Představme si, že bychom namísto správné hodnoty $a = 4 \text{ m.s}^{-2}$ uvažovali hodnotu $a = 8 \text{ m.s}^{-2}$, tedy hodnotu dvojnásobnou, to jest zatíženou chybou $+100\%$. Jaká nás čeká chyba ve výsledku hodnoty rychlosti V podle vztahu (3)? Relativní chyba se bude rovnat jen odmocnině z našeho nežádoucího dvojnásobku, tedy přibližně 1,41, což odpovídá zatížení výsledku chybou jen $+41\%$. Nepřesností hodnoty zpomalení se ovlivní výsledek výpočtu rychlosti ještě méně, půjde-li o výpočet podle vztahu (např.(4)), v němž jsou pod odmocninou další sčítance – např. rychlost nárazu V_n . V podrobnostech a k obecné problematice nutné přesnosti vstupních parametrů v praxi znalce – analytika silničních nehod odkazují na lit.[5].

$$V = \sqrt{2.a.L} \quad (3)$$

$$V = \sqrt{V_n^2 + 2.a.L} \quad (4)$$

1.4 K účinnosti brzd a k rozdělení brzdných sil

Publikace je věnována zejména adhezi pneumatik. Přesto zde uvedme stručnou poznámku k účinnosti brzd. Při brzdění vozidel je důležité, aby nedocházelo k blokování **zadních** kol a tím ke ztrátě možnosti směrového vedení a k následným smykům s rotací (lid.hodiny). Proto se blokování zadních kol čelí různými konstrukčními úpravami počínaje zátěžovými regulátory brzdného účinku. Osobní automobily ŠKODA řady 105/120 však žádné zátěžové regulátory neměly, a tak se blokování zadních kol „čelilo“ nižší účinností zadních brzd. Silný muž dokáže rukama protočit zdvižené zadní kolo škodovek při brzdění provozní brzdou (kdo nevěří, ať to zkusí). Tedy **pokud máme na vozovce brzdné stopy jen od předních kol, pak u škodovek (105/120) je nutno počítat s menším brzdným zpomalením než u osobních automobilů vybavených řádně seřízeným zátěžovým regulátorem. Pokud však jsou na vozovce blokovací stopy od všech čtyř kol, pak jsou si všechny automobily (na stejných pneumatikách) samozřejmě rovny z hlediska brzdného zpomalení, tedy i s tou škodovkou.**

Obráceně to však neplatí : máme-li na vozovce stopy brzdění jen od předních kol, pak horní mez (zdůrazňuji **horní mez**) brzdného zpomalení přichází v úvahu odpovídající adhezi pneumatik **všech** brzděných kol (viz kap.4.3) – s výjimkou právě snad jen škodovek 105/120, jak bylo vysvětleno v předchozím odstavci. Máme-li na paměti, že kola brzděná pod mezí blokováni disponují obecně vyšší adhezí pneumatik, než kola zablokovaná, máme dobrou mnemotechnickou pomůcku k tomu, abychom si byli při odvozování vědomi toho, co je uvedeno v první větě tohoto odstavce.

S tím souvisí pojem rozdělení brzdných sil. Poměr velikostí brzdných sil na obvodech jednotlivých kol vozidla nebývá přesně shodný s okamžitým poměrem svislých zatížení (normálních sil) působících pod koly. Přichází pak „ke slovu“ pojem účinnost brzdění, veličina označovaná řeckým písmenem η (eta), jež se uplatňuje stejně a na stejném místě jako poměr adhezní tíhy (u) – viz kap.1.8. Problematika rozdělení brzdných sil ale není předmětem tohoto pojednání, a tak odkazují na lit.[1] str.174 nebo na lit.[2] str.44.

Účinnost **brzd** (jež limituje dosažitelné brzdné zpomalení v $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) může být dostatečná – ve vztahu k ustanovením o schvalování technické způsobilosti a technických podmínkách provozu silničních vozidel na pozemních komunikacích, a přesto v daném případě může být účinnost **brzdění** nižší než 100% , tedy hodnota u menší než jedna. Nezaměňujme proto pojmy „účinnost **brzd**“ ve smyslu dosažitelné brzdné síly na obvodu kol (eventuálně v poměru k normální síle – tzv. „zbrzdění Z “) a „účinnost **brzdění**“.

1.5 Tření nebo adheze ?

V obecné technické fyzice se používá nejčastěji pojem **tření** při řešení problematiky mechanického silového přenosu mezi tělesy, jež se po sobě mohou navzájem smýkat (tření statické a smykové). V oboru pneumatik a vozidel se používá většinou pojem **adheze**. Obory podle předchozích dvou vět se v následujícím výkladu budou prolínat, a tak v něm použijeme také oba pojmy, a to pro poměry přenosu sil ve stykové ploše elementů pryže běhounu pláště s povrchem vozovky či terénu například :

- pojem **tření** pro poměry při smýkání,
- pojem **adheze** pro poměry bez posunů anebo s nepatrnými posuny ve stykové ploše při odvalování kola.

Nejde ovšem o podstatu problému, mnohé platí jak pro „tření“ tak i pro „adhezi“, alternativnost (nevyhraněnost) těchto pojmů je v praxi běžná.

1.6 K základním zákonitostem

Ze zákonů smykového tření, jež byly odvozeny Coulombem, plynou teoretické závěry, že kinetické smykové tření nezávisí na velikosti stykové plochy a v jistých mezích na vzájemné rychlosti obou těles, a že je přímo úměrné složce přítláčné síly kolmé ke stykové ploše obou uvažovaných těles, kterou nazýváme normální tlakovou silou. Coulombovy zákony platí pro suché tření mezi běžnými víceméně tuhými materiály. Je vhodné si pamatovat, že v oblasti tření pneumatik máme právě tu výjimečnou smůlu, že zde Coulombovy zákony neplatí, lépe řečeno **pro tření pryže je platnost Coulombových zákonů nedokonalá**, problematická.

V následujícím výkladu a ve znalecké praxi bude vhodné pracovat s určitými zjednodušeními, jejichž meze přijatelnosti je však nutno znát, což si zde postupně uvedeme.

Základním vztahem (Coulombovým zákonem) v oboru tření je vzorec (5)

$$f = \frac{T}{N} \quad (5)$$

z toho je

$$T = f \cdot N$$

kde f je součinitel kinetického smykového tření – stručně součinitel tření, nebo též součinitel adheze, což je **bezrozměrné číslo**,

T je třecí síla v Newtonech [N] působící v tečném směru ve stykové ploše pneumatiky s vozovkou,

N je normální síla v Newtonech [N] působící ve směru normály, tedy kolmo ke stykové ploše pneumatiky s vozovkou.

Všimněme se, že ve vztahu (5) nefiguruje velikost stykové plochy ani rychlost smýkání. Součinitel f je konstantní, nezávisí na velikosti přítláčné (normální) síly N . **Pro tření pryže to však platí jen přibližně.**

Ze vztahu (5) lze po úpravě vypočítat (a to zcela přesně) velikost horní (nepřekročitelné) meze třecí síly pod kolem. Například při součiniteli adheze $f = 0,6$ až $0,8$ a při normální síle $N = 3000$ N je horní mez velikosti třecí síly pod kolem $T = 1800$ až 2400 N. **Zdůrazňuji, že celý uvedený rozsah je horní mezí** – rozsah je to proto, že hodnota f přichází většinou v úvahu v určitém rozsahu, tedy ne jako jednoznačně daný údaj. **Třecí síla ale mohla být samozřejmě i nižší než 1800 N – mohla být třeba i téměř nulová** (příslušející valivému odporu pneumatik, **jestliže se právě nebrzdilo**). Pokud ale kolo zanechávalo stopu brzdění (smýkání), pak třecí síla musela ležet v uvedeném rozsahu od $T = 1800$ až 2400 N. Při dané velikosti normální síly ale nemohla být velikost T větší než 2400 N.

Snad je to jasné. Namítnete možná, že vás většinou nezajímá velikost tangenciálních třecích sil, ale velikost dosažitelného zpomalení, abyste mohli vypočítat rychlost. Pak odkazují na jednoduchý vztah (6), kde **celý vypočtený rozsah zpomalení (a) je obdobně zase jen horní mezí**, v níž leží skutečná hodnota zpomalení prokazatelně jenom při zanechávání brzdných stop všemi koly vozidla. Dvojmontáž pneumatik lze považovat za jeden celek – tedy pokud zanechává stopy například jen vnější pneumatika dvojmontáže (u nezatížených nákladních automobilů TATRA), pak to lze považovat za stopu kola jako celku. Shoda není úplná, ale platí to s dobrou přibližností.

1.7 K velikosti součinitele tření

Hodnota součinitele tření bývá **většinou** (ne však vždy) menší než jedna. Mnemotechnickou pomůckou pro zapamatování, že **číslo jedna není limitem hodnot součinitele tření** nechť je makromodel tření – totiž představa ozubených kol. Hodnota součinitele tření mezi ozubenými koly (do destrukce) je přece nekonečně veliká.

To je důležité i v problematice adheze pneumatik. Hodnota součinitele adheze běžných pneumatik ohřátých za jízdy na hladké živičné vozovce za sucha může nabýt hodnot až kolem 1,1. Speciální závodní pneumatiky se zvláště měkkou pryží v hladké běhounové ploše (bez dezénu) na hladké suché živičné vozovce dosahují hodnot součinitele tření ještě značně vyšších (není výjimkou $f = 2,5$) – jde to až skoro do lepidlosti (viz např. zrychlení závodních monster na krátké trati), ovšem na úkor životnosti pneumatik.

1.8 Adhezní tíha

Provozní brzdění silničních vozidel bývá realizováno většinou (ne u všech vozidel) na všechna kola. Pohon vozidel bývá realizován většinou jen na některá kola. Proto může mít i v naší oblasti své uplatnění pojem „adhezní tíha“, který je běžný v oboru kolejových vozidel. Poměr adhezní tíhy představuje **poměr velikosti zatížení spočívajícího na brzděných (hnacích) kolech k celkové tíze vozidla** (soupravy). Např. v lit.[1] na str. 515 se uvádí, že pouhá zadní brzda motocyklu obsazeného jen řidičem znamená využití tíhy pro brzdění asi 36%, je-li i spolujezdec, pak 40%. Okolností uvedenou v tomto odstavci se snižuje dosažitelné zpomalení (zrychlení). Pro další výpočty označme poměr adhezní tíhy písmenem u .

1.9 K souvislosti zpomalení se sklonem vozovky

V projektování silnic i železnic, v mechanice pohybu silničních i železničních vozidel, ale i v předpisech o pravidlech silničního provozu a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích se **podélné a příčné sklony** neudávají ve stupních, ale **udávají se v procentech, což představuje změnu výšky v metrech na 100 m dráhy**. To je nejen velmi praktické, ale **zároveň** údaj představuje i tangentu úhlu sklonu. Největší přípustný podélný spád (pokud nejde o udělenou výjimku) je u **moderních** silnic 9% , (u dálnic 4,5%). Tomu odpovídá největší úhel vyjádřený ve stupních $\alpha = 5^{\circ}8'$ ($2^{\circ}35'$), přičemž $\cos \alpha = 0,996$ (0,999) je roven jedničce s přesností daleko větší, než s jakou jsme schopni dosadit hodnoty ostatních veličin. Pro takto malé úhly platí zároveň s přesností téměř dokonalou, že $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$. Ve výpočtových vztazích se pak namísto sinových funkcí píší tangenty udávané s výhodou právě v procentech, a kosiny úhlů odpadají. **Nejde zde o připomínku formální.** Vzorce lze výrazně zjednodušit bez újmy na přesnosti. Délka dráhy v půdorysu se liší od šikmé délky **na silnici** stejně, jako se liší kosinus malého úhlu od jedničky. Proto je v prvé větě tohoto odstavce uvedeno „... na 100 m dráhy“ a nikoli „... na 100 m půdorysného průmětu dráhy“. **Pro havarijní pohyb vozidla po strmější stráni by však bylo samozřejmě nutno uvažovat příslušné goniometrické funkce bez zmíněných zjednodušení.**

To, co bylo uvedeno v předchozím odstavci, dává výhodu přímé „srovnatelnosti“ dosažitelného zpomalení a s adhezí f a s podélným sklonem vozovky s . Pro stoupání použijeme kladné znaménko, pro klesání záporné znaménko. Ze vztahu (6) lze přímo jednoduše vypočítat, na jakou hodnotu se sníží či zvýší dosažitelné brzdné zpomalení v klesání či stoupání vozovky.

$$a = (u \cdot f + 0,01 \cdot s)g \quad (6)$$

kde a je dosažitelné (dosažené) zpomalení v m.s^{-2}

u je poměr adhezní tíhy nebo účinnost brzdění – bezrozměrná hodnota vždy menší nebo rovna jedné – při zablokování všech kol vozidla je $u = 1,000$,

f je součinitel tření (adheze) – bezrozměrná hodnota většinou (ne však vždy) menší než jedna

s je sklon vozovky ve směru pohybu vozidla – v procentech (kladné stoupání, záporné klesání)

g je velikost gravitačního zrychlení $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

Uveďme si příklad, ze kterého bude zřejmé, jak velký vliv na dosažitelné zpomalení má podélný sklon vozovky (např. klesání $s = -7\%$) při extrémním brzdění přes mez adheze (např. $f = 0,7$) automobilu brzděného všemi koly ($u = 1,0$ přibližně) a motocyklu, když je brzděn jen zadní brzdou ($u = 0,36$ přibližně). Po dosazení vychází pro automobil $a_a = 6,17\text{m.s}^{-2}$, zatímco pro motocykl vychází na téže vozovce jenom $a_m = 1,78\text{m.s}^{-2}$.

$$\begin{aligned} a_a &= (1,0 \cdot 0,7 + 0,01 \cdot (-7\%)) \cdot 9,8 \text{ m.s}^{-2} = \\ &= 6,17 \text{ m.s}^{-2}, \\ a_m &= (0,36 \cdot 0,7 + 0,01 \cdot (-7\%)) \cdot 9,8 \text{ m.s}^{-2} = \\ &= 1,78 \text{ m.s}^{-2}. \end{aligned}$$

Je dobré si uvědomit, že poměrem adhezní tíhy u se neredukuje **vliv podélného sklonu**, a ten se tedy **uplatňuje na dosažitelném zpomalení v plné velikosti, tedy relativně ve zvýšené míře u vozidel, u nichž je poměr adhezní tíhy menší než jedna. To jsou například i jízdní kola**, u nichž chybí nebo je nefunkční přední brzda.

Ještě jednu poznámku uveďme na tomto místě. Souvisí s předností v jízdě, tedy s otázkou, zda řidič jedoucí například po silnici označené jako hlavní, byl nucen k **náhlé** změně rychlosti jízdy. Co lze považovat za náhlé snížení rychlosti uvádí autor lit.[1] na str.514. Vezme-li se, že není dán předpis, který by ukládal motocyklistům používat současně se zadní brzdou i brzdu přední, pak v podélném klesání silnice může i velmi malé zpomalení motocyklu být hodnotitelné jako náhlá změna rychlosti. Dál to znamená, že při malé hodnotě součinitele adheze (na kluzké vozovce) a ve strmějším klesání vozovky může nastat stav, kdy vozidlo brzděné intenzívně jen na zadní kolo (kola) nebude zpomalovat vůbec.

Principiálně není vyloučeno, že vozidlo brzděné intenzívně může v klesání dokonce zrychlovat svůj pohyb – například na náledí.

2 STOPY PNEUMATIK

2.1 Stopy brzdné nebo blokovací ?

Pokud se kolo, zanechávající stopy pryže na vozovce, ještě otáčí, pak lze ve stopě rozeznat otisky jednotlivých bloků dezénu pneumatiky – ovšem jen u blokového dezénu. Mylné to může být u dezénu pásového. Brzdná síla pod otáčejícím se kolem je při vzniku brzdné stopy sice větší než pod kolem zablokovaným, rozdíl ale stejně nejsme většinou schopni postihnout jinak než volbou uvažovaného rozsahu zpomalení. Proto v otázce hodnoty zpomalení

v podélném směru většinou není třeba se zabývat příliš podrobně problémem, zda jde o stopu brzdovou či o stopu blokovací. Ostatně i stopa blokovací je stopou brzdění vozidla.

Kolo, které se při brzdění ještě otáčí (pod mezí blokování), je schopno přenášet vodící síly. Zablokované kolo se volně smýká v obecném směru příslušné tangenciální síly.

2.2 Když začátky pravé a levé stopy brzdění neleží na jedné úrovni

K této problematice nelze dát jednoduché pravidlo. Důležité je, o jak velký podélný posun se jedná – **v přepočtu na čas**.

Půjde-li o krátký časový interval nestejnosti vzniku stop u brzd s kapalinovým přenosem sil, pak lze vzít za délku dráhy s plným brzdným zpomalením délku odpovídající nejdelší stopě (viz též lit.[3] str.68). Když například začne zanechávat stopu brzdění první kolo osobního automobilu, znamená to, že je v soustavě brzd již velký tlak. Pod pneumatikou, která se zanecháváním stopy „otálí“, může být poněkud vyšší součinitel adheze – to lze na místě nehody ověřit prohlídkou textury. V kap. 4.3 se dočtete, že pod kolem, které stopu nezanechává, může být třecí síla dokonce vyšší, než pod kolem již zablokovaným.

Půjde-li o delší časový interval nestejnosti vzniku stop, nebo když automobil zanechal jen jedinou stopu brzdění, pak je vhodné zkoumat, zda na „otálejícím“ kole není například zamaštěná brzda. V případě snížené účinnosti některé brzdy je nutno uvažovat v příslušném úseku brzdné dráhy menší hodnotu brzdného zpomalení. Ovšem v úseku, kde potom již „kreslí“ své stopy všechna kola, tam je **zpomalení dáno výhradně adhezí pneumatik**, i kdyby byla některá brzda zamaštěná. V tom úseku již jsou tlaky v brzdách totiž tak veliké, že i méně účinnou brzdu „přinutily“ k zablokování kola na vozovce s danou adhezí.

2.3 K přerušení stop brzdění

Při nehodách střetů osobních automobilů s chodci se někdy setkáváme s přerušením kontinuity stop brzdění a s opětovným pokračováním. Po uplynutí reakční doby řidič obvykle již před střetem intenzívně brzdí. Z místa řidiče je přítom možno vidět chodce, jak se **relativně** řítí proti vozidlu. A teď přichází přirozený úlek řidiče – řidič může podvědomě „ucuknout“ buď ještě těsně před střetem automobilu s chodcem, anebo v okamžiku nárazu těla do čelního skla. Reakční doba bývá po úderu kratičká, neboť na místě řidiče jde

o pozorovatele, který již kritický objekt a děj průběžně upjatě sleduje. Obvykle pak ale dochází k opětovnému prudkému sešlápnutí pedálu – přerušeni může trvat dokonce i po dobu kratší než 1 s. Při úvaze o zpomalení vozidla v úseku přerušeni kontinuity stop je radno vzít v úvahu prudkost uvolnění pedálu a jeho opětovného sešlápnutí – podle strmosti konce (opětovného začátku) stop a zejména podle délky podélného přesazení pravé a levé stopy (při nulovém přesazení lze usuzovat na prudké sešlápnutí pedálu a na krátký náběh brzdícího účinku). Na délce přerušeni lze například uvažovat zpomalení v rozsahu od nuly do přibližně poloviny plné hodnoty. Při krátkodobém přerušeni bývá vliv nepřesnosti tohoto odhadu zanedbatelný ve vztahu k poloze příslušných čar v diagramu dráha \times čas, není však zanedbatelný vliv na určení hodnoty rychlosti na počátku brzdění.

Jiná je situace po střetech dvou vozidel. Je třeba uvážit, zda zde byly i po střetu podmínky k tomu, aby řidič mohl nadále působit nohou na pedál brzd. Pokud tomu tak není, pak po střetu přichází v úvahu zpomalení :

- vlivem dosednutí deformovaných podběhů na kola (zachování spíše hladkých ploch nebo naopak vytvoření ostrých hran),
- vlivem příčného pohybu (smýkání) vozidla – při rotaci vozidla kolem svislé osy přichází v úvahu úseky se zpomalením téměř nulovým i úseky se zpomalením odpovídajícím součiniteli adheze pneumatik v bočním směru, to vše s plynulými přechody,
- vlivem stoupání vozovky.

2.4 Zpomalení na různě adhezních površích za sebou

Někdy se setkáváme s případy, kdy vozidlo zpomalovalo brzděním nejprve na suché vozovce, potom na blátě krajnice, pak na travnatém terénu, pak došlo k převrácení se smýkáním a nakonec k nárazu zbytkovou rychlostí V_n . Odvození počáteční rychlosti není tak složité, jak by se mohlo na první pohled zdát. Zde je příslušný výpočtový vztah (7) pro pět různých fází pohybu vozidla za sebou.

$$V = \sqrt{V_n^2 + 2(a_1 \cdot L_1 + a_2 \cdot L_2 + f_3 \cdot g \cdot L_3 + f_4 \cdot g \cdot L_4)} \quad (7)$$

kde V	rychlost na počátku stop brzdění v m.s^{-1} (lze k ní přičíst ještě úbytek za dobu náběhu brzdného účinku)
V_n	rychlost nárazu, po němž se vozidlo zastavilo [m.s^{-1}]
$a_1 a_2$	dvě různá zpomalení [m.s^{-2}] v libovolném pořadí
$f_3 f_4$	dvě různé hodnoty součinitele tření (smýkání) [-] v libovolném pořadí pokud jde o pohyb na vodorovné ploše (ve spádu např. při pohybu po stráni je nutno provést příslušnou redukci součinu $f.g = a$)
L_1 až L_4	čtyři příslušné délky dílčích úseků pohybu [m].
g	gravitační zrychlení $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

2.5 Co s antiblokem ?

Někteří odborníci tvrdí, že vozidla s brzdami vybavenými antiblokovacím systémem (ABS, něm. též ABV) nezanechávají stopy brzdění pneumatik na vozovce. Jiní říkají, že určité stopy lze nalézt. Pravdu by měli ti, kteří by říkali, že **obvykle nevznikají stopy blokovací, ale stopy brzdné lze většinou nalézt** spíše ovšem jako přerušované. K tomu viz lit.[13] a [14].

Je-li na pevném povrchu vozovky nezanedbatelné množství písku či posypového materiálu, pak působením veliké tangenciální síly při brzdění dochází k usmykávání a drobení zrn. To je přirozeně provázeno drhnutím a vznikem stop majících původ v brzdění, a to i při funkci ABS, tedy aniž by docházelo k blokování rotace kol.

Pokud policisté při ohledání stop nenalezli stopy brzdění vozidla vybaveného ABS, nevzniká tím pro znalce žádná diametrálně nová situace. Vždyť i vozidlo s klasickými brzdami na mokré vozovce mnohdy nezanechá stopy. Cesta k řešení může někdy vést přes rozbor trvání alarmující situace. Jak dlouho trvala alarmující situace, kolik času z toho zabrala neopoždřená reakce řidiče – a zbytek by měl připadat na brzdění.

ABS zabráňuje zablokování kol, tedy umožňuje využít adhezi pneumatik v okolí vrcholu tzv. skluzové charakteristiky, a tím poskytuje „svým“ pneumatikám vyšší hodnotu součinitele adheze (f). Platí to na vozovce suché i mokré, platí to i pro ocelová kola kolejových vozidel na kolejnicích suchých i mokrých.

ABS současně (samozřejmě) brání blokování zadních kol, tedy je lepší než zátěžový regulátor brzdného účinku, a hlavně přibližuje účinnost brzdění u ke 100%, což je další příspěvek ke zvýšení dosažitelného brzdného zpomalení – srovnej závislost zpomalení a na u a na f dle vztahu (6). Jsou však samozřejmě různé systémy ABS, různě rychle reagující – ale to není předmětem tohoto pojednání.

2.6 Kdy vznikají stopy pneumatik ?

Nutnou – zřejmě však nikoli postačující – podmínkou pro vznik otěru pryže je smýkání elementů pryže po povrchu. Ke vzniku smýkání je nutno vždy překonat třecí odpor – při dané hodnotě součinitele adheze to znamená buď zvýšit tangenciální sílu anebo snížit normální sílu (viz vztah (5)).

Při intenzivním brzdění na mokřích površích vozovek je méně případů se vznikem stop než případů, kdy žádné stopy nevznikly. Záleží to zejména na mikrotextuře povrchu vozovky.

Při příčném pohybu automobilu ve smyku na suché vozovce zanechávají stopy vždy spíše kola na straně přitížené, tedy na té straně, která je v daném okamžiku právě vpředu vůči směru pohybu. Plyne to z videozáznamů crash-testů i z podrobné analýzy stop řady reálných nehod. Úvaha, že kola na straně odlehčené se dostávají snáze do smyku a tudíž že tato kola zanechávají spíše stopy, by byla zavádějící. Svírá-li totiž rovina kol velký úhel se směrem jejich pohybu, je příčná (smyková) složka rychlosti pohybu na pravém kole stejná jako na levém (diference jen vlivem okamžité rotace vozidla kolem svislé osy). Analogie pro zapamatování : Potáhnete-li po desce stolu pryž na gumování výkresů bez přitlaku, nejspíše žádnou stopu nezanechá. Teprve když pryž k desce přitlačíte, bude stopa vznikat.

Při fázovém odvíjení pohybů kol vozidla po smykových stopách vycházejí v situačním plánu křivky pohybů ostatních kol. V odpovídajících místech na fotodokumentaci lze pak mnohdy dodatečně nalézt méně zřetelné stopy, jež při ohledání místa nehody unikly pozornosti. Některé stopy totiž nejsou zjevné při pohledu shora, ale jsou viditelné při pohledu v malém úhlu vůči povrchu vozovky, tedy z povzdálí. Ten, kdo místo fotografuje z povzdálí, věnuje pozornost přirozeně především tomu, kam se má postavit, aby dostal do záběru důležité objekty, a mnohdy přitom uniká, že z toho místa jsou viditelné stopy, jež nebyly nápadné při pohledu zblízka (shora). V každém případě se velmi osvědčuje **zkoumat fotografie stop pneumatik pod lupou**. Pod zvětšovací sklem mnohdy můžeme nalézt řadu dalších „zajímavostí“ které by při prohlídce pouhým okem unikly pozornosti.

Zeptáte-li se, zda mohou vznikat stopy pneumatik na suché vozovce už při součiniteli tření $f = 0,2$, pak namítnu, že jde o špatně položenou otázku. Otázkou není, zda mohou vznikat stopy při součiniteli tření $f = 0,2$, ale zda existuje silniční povrch, jenž by za sucha tak nízkou adhezi vykazoval. Principiálně by stopy pneumatik mohly vzniknout i při smýkání po suchém povrchu, na němž by součinitel tření pryže byl roven $f = 0,2$. Nevím, nezkoušel jsem to, ale možná, že by tak extrémně nízká hodnota součinitele tření příslušela styku pneumatiky s povrchem některých typů teracových dlaždic určených pro vnitřní prostory (chodby). Na suchém **neznečistěném**

povrchu živičné vozovky podle mých zkušeností přichází v úvahu nejnižší hodnota součinitele tření pneumatik $f = 0,55$ – a to ještě jen spíše výjimečně – převážně nad $0,65$. Tedy v odpovědi na otázku uvedenou v úvodu tohoto odstavce bych řekl, že na neznečištěné živičné vozovce za sucha určitě nepřichází v úvahu hodnota součinitele tření $f = 0,2$.

2.7 Pozor na stopy nebrzděných pneumatik !

Zatáčí-li vozidlo velkým úhlem rejdu (na dráze o velmi malém poloměru) na suché vozovce, pak přitom mnohdy vznikají zcela výrazné stopy pneumatik, i když kola přitom nejsou vůbec brzděna. Bývá to patrné například na parkových cestách, kam nákladní automobil přivezl nějaký kontejner a při otáčení složitě manévroval. Vznik takových stop má zřejmě původ v tom, že mezi vnějším a vnitřním okrajem běhounové plochy pneumatiky není žádný „diferenciál“, tedy skutečná ujetá dráha je různá, odvalený obvod kola je ale jediný. Tato okolnost může být někdy i zavádějící, vyskytne-li se na místě nehody (např. v souvislosti s otáčením sanitky).

Mezi stopy nebrzděných (nebo jen mírně brzděných) pneumatik patří tzv. stopy driftové – viz lit.[3] str.30 až 42 a lit.[4]. Driftové stopy mají původ v překročení adheze v bočním směru. Vedou vždy obloukem (nikdy v přímce) a jsou na nich patrné stopy příčného usmykávání dezénu. Zjistíme-li měřením na vozovce poloměr oblouku stop R , pak pro příslušný rozsah hodnot součinitele adheze v bočním směru f_b lze vypočítat ze vztahu (8) rychlost jízdy. Ve vztahu se opět příznivě uplatňuje „vládná odmocnina“, jež snižuje vliv nepřesnosti vstupních hodnot výpočtu na jeho výsledek.

$$V = \sqrt{R \cdot g (f_b + 0,01 \cdot p)} \quad (8)$$

kde V je rychlost jízdy v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

g je gravitační zrychlení $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

f_b je součinitel adheze v bočním směru – bezrozměrné číslo

p je příčný sklon vozovky v % (+ dostředný, – opačný)

2.8 Limit zrychlení v bočním směru

Zrychlení v bočním směru může být limitováno několika vlivy :

- a) adhezí pneumatik v bočním směru,
- b) rychlostí, šířkou vozovky a časem, který je k dispozici na příslušný manévr,

c) stabilitou vozidla proti převrácení.

Ad a) Závodní automobily s pneumatikami s běhounovou plochou ze zvlášť měkké pryže, dosahují v bočním směru zrychlení dokonce i přes 12 m.s^{-2} . Pro běžný osobní automobil ŠKODA Favorit jsme bez zvláštních opatření naměřili hodnotu na suché kvalitní živičné vozovce 6 m.s^{-2} při rychlosti 60 až 70 km/h. Není vyloučeno dosažení i hodnoty vyšší.

Ad b) Při vyhýbacím manévru (jednoduchým či dvojitým obloukem) bývá řidič omezen šířkou vozovky a tím i časem, po který je možno zmenšovat poloměr zatáčení do doby, než nastane nutnost opět dráhu přesměrovat zpět, nemá-li dojít k vyjetí mimo silnici. Pro vyhýbací manévry platí graf na str.420 v lit.[1]. Nejde však o obecné limity bočního zrychlení a už vůbec ne o nějaké limity součinitele adheze v bočním směru (ta závisí na pneumatikách a na textuře povrchu vozovky).

Ad c) Problematika stability vozidel proti převrácení není předmětem této publikace.

3 MĚŘICÍ METODY V PRAXI

Pro určení reálné hodnoty zpomalení vozidla v době nehody lze považovat za ideální **měření zpomalení** registračním decelerografem provedené na místě nehody v co nejkratším časovém odstupu od nehody s tímž vozidlem (tytéž pneumatiky) se znalostí vlivů uvedených v této publikaci.

Kontrolní cejchování decelerometru lze provést velmi jednoduše : překlopením z polohy vodorovné do svislé musí vzniknout údaj $9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Přístroj musí být před měřením ve vozidle upevněn a urovnán podle návodu výrobce. Pro měření v podélném spádu komunikace (např. klesání) je výhodné nejprve ve stojícím vozidle v daném spádu přístroj urovnat tak, aby údaj zrychlení byl nulový (pokud neudává výrobce jiný postup). Takto ustavený přístroj registruje při brzdění vodorovnou složku vektoru podélného zpomalení příslušného pro daný spád (např.klesání). Shoda s hodnotou příslušející šikmému vektoru zpomalení (v daném spádu) je téměř dokonalá, neboť i zde platí to, co jsme vpředu uvedli o kosinových poměrech mezi délkou ve stoupání a ve vodorovném průmětu na silnici. Pokud by citlivá osa decelerografu byla ve vozidle orientována napevno pro stání na vodorovné ploše, pak v podélném spádu by přístroj udával „zpomalení“ i při konstantní rychlosti nebo při stání – mnemotechnickou pomůckou může být představa decelerometru v pozemní lanovce : Přístroj orientovaný v lanovce vodorovně bude registrovat jen zpomalování či zrychlování, zatímco přístroj orientovaný rovnoběžně se spádem trati by své výsledky superponoval k příslušné šikmé (sinové) nezanedbatelné složce gravitačního zrychlení. Jinými slovy : přístroj

fixovaný pro měření na vodorovné vozovce bude při měření ve spádu zvětšovat výsledek o nezanedbatelnou sinovou složku gravitačního zrychlení, ve stoupání naopak o tuto složku výsledek snižovat. To lze dodatečně ošetřit při zpracování výsledků – nesmí se však na problém zapomenout. Příslušnou korekci jsme mohli ušetřit při přípravě měření.

Praktická poznámka : při každém zastavení po brzdění je radno zůstat s vozidlem stát v klidu pár sekund se zapnutou registrací. Tím se ověří nulová úroveň zrychlení v záznamu.

Vše uvedené vpředu v této kapitole platí nejen pro zjišťování dosažitelného brzdného zpomalení na místě nehody za daného stavu vozovky (mokrá, zablácená apod.), ale lze aplikovat i na ověřování účinnosti brzd vozidla (na suché vodorovné vozovce).

Na suché vozovce postačuje provést měření s intenzívním brzděním z nízké rychlosti (max.40 až i 30 km/h), neboť hodnota součinitele adheze za sucha téměř nezávisí na rychlosti (viz např. obr.3). Proto přesná hodnota počáteční rychlosti dle tachometru má při tomto způsobu měření podružný význam na přesnost výsledků, což je velmi výhodné.

Měření **na mokré vozovce** je problematičtější : Hodnoty součinitele adheze pneumatik za mokra klesají na každém druhu povrchu vozovky se vzrůstající rychlostí jízdy a to různě strmě (viz obr.1 a 2). Za mokra se lze eventuálně také spokojit s měřením z rychlosti jen kolem 40 km/h (s ohledem na vlastní bezpečnost) – ovšem výsledky lze pak použít jen jako orientační, neboť měřením provedeným v malém rozsahu rychlosti nejspíše nezjistíme dostatečně přesně strmost poklesu adheze se vzrůstající rychlostí.

Některé moderní elektronické decelerometry provádějí vyhodnocování samočinně. Přesto doporučuji přenést digitální záznam na obrazovku počítače a ověřit, zda vyhodnocený časový interval skutečně (bez překmitů) odpovídá měřené fázi brzdění.

Při vyhodnocování výsledků měření je třeba pamatovat na to, že skutečná hodnota dosaženého zpomalení je poněkud nižší, než je údaj přístroje, jenž se působením klopného momentu při intenzívním brzděním naklápěl spolu s podlahou vozidla, na níž byl upevněn (pokud nemáme k dispozici tzv. stabilizovanou gyroskopickou plošinu).

Ideál rekonstrukčního zjišťování bývá nedosažitelný. Pokud je vozidlo pojízdné (šlo např. o střet s chodcem), pak nebývá po ruce znalec, pokud i ta podmínka by mohla být splněna, pak nebývá na místo nehody hned přizván, a když i to je splněno, tak není decelerograf.

Měření délky brzdné dráhy z vyšší rychlosti na místě nehody může být nebezpečné, měření délky brzdné dráhy z nízké rychlosti je zatíženo velkou relativní chybou, není-li k dispozici elektrický palník pro nástřel barvy na vozovku v okamžiku sešlápnutí pedálu brzd. **Tady už neplatí, že jakékoli**

měření je lepší než žádné, neboť je zde riziko hrubě nesprávného výsledku měření. Rekonstrukční zjišťování délky brzdné dráhy metodou sešlápnutí pedálu na úrovni vybraného sloupu je dle mého názoru nepříjemně nepřesné – je zatíženo subjektivní reakční dobou jiného řidiče a v jiné situaci než v době nehody (prudkost sešlápnutí pedálu, jiný náběh brzdného účinku). Význam nepřesností narůstá s klesající zvolenou počáteční rychlostí. Je třeba si uvědomit, že například při brzdném zpomalení $5,8 \text{ m.s}^{-2}$ klesá rychlost za každou sekundu o -20 km/h . Brzdné stopy přitom ještě nemusejí vždy vznikat. Tedy pokud se při dodatečných zkouškách nějak prodlouží náběh brzdného účinku (sešlápnutí pedálu není rasantní), mohou být potom vzniklé krátké blokovací stopy (odpovídající neznámé zbytkové rychlosti) mylně přiřazeny k počáteční rychlosti na začátku brzdění.

Parametry adheze pneumatik osobních automobilů se měří v reálných podmínkách tzv. dynamometrickými přívěsy typu VÚD-2 a podobnými. Měřicí zařízení existují i pro pneumatiky nákladních vozidel a autobusů. Pro reprodukci stavu daného nehodového děje je ovšem nutno měřicí zařízení osadit pneumatikou s předemtným dezénem dané hloubky.

4 ZÁKONITOSTI ADHEZE ZA RŮZNÝCH STAVŮ VOZOVKY A PNEUMATIK

V textu a v obrázcích značí :

f součinitel adheze obecně

f_p tzv. součinitel podélného tření zjišťovaný dynamometrickým přívěsem při zablokovaném měřicím kole

f_1 součinitel adheze v podélném směru

f_b součinitel adheze v bočním směru

Na výsledky zjišťování adheze pneumatik má vliv celá řada činitelů. Jsou to :

1. Činitelé přímo ovlivňující hodnotu součinitele adheze
 - (a) činitelé textury povrchu vozovky,
 - (b) činitelé vlastností pneumatik,
 - (c) činitelé interakční.
2. Činitelé určující nebo omezující přesnost měření nejsou předmětem této publikace (lit.[8]).

4.1 Vliv rychlosti

Rychlost jízdy ovlivňuje interakci pneumatiky s vozovkou a tím přímo i součinitele adheze. Na suché vozovce nezávisí součinitel adheze na absolutní rychlosti jízdy, ale je ovlivněn mírou skluzu pneumatiky po povrchu vozovky (stoprocentní skluz přísluší zablokovanému kolu).

Na vozovce mokré a na vozovce pokryté rozbředlým sněhem výrazně klesá hodnota součinitele tření se vzrůstající rychlostí jízdy a to na vozovkách s různou texturou povrchu různě strmě a z různých počátečních hodnot. Rozdíly jsou značné a to v absolutních hodnotách i ve strmosti poklesu a to dokonce i na vozovkách, jejichž obrusná vrstva byla zřízena technologií téhož typu (viz např. obr.1 a 2).

Jen na uježděném sněhu a na ledě se suchým povrchem vykazují součinitelé f mírný (málo výrazný) nárůst se vzrůstající rychlostí jízdy – např. součinitel f na ledě při teplotě povrchu -3°C vzroste z průměrné hodnoty 0,15 při rychlosti 20 km/h na průměrnou hodnotu 0,18 při rychlosti 60 km/h (obr.6). Na ledě s mokrým povrchem se vliv rychlosti jízdy neprojevuje a hodnoty jsou extrémně nízké – 0,05 až 0,12.

4.2 Vliv množství vody

Množství vody na vozovce ovlivňuje interakci pneumatiky s vozovkou a tím přímo i hodnotu součinitele adheze.

Höcker (lit.[26]) zavedl pojmy „výpočtová“ a „vztažná tloušťka vodního filmu“. Výpočtová tloušťka je dána jednoduše podílem objemu vody a příslušné plochy vozovky. Se skutečnou tloušťkou vodního filmu se shoduje ale jen na ploše zcela hladké (bez textury). Vztažná tloušťka vodního filmu udává převýšení hladiny nad výstupky textury – může proto být pozitivní ale i negativní. Podrobnosti a vzájemné vztahy jsou v lit.[26].

Velikost hodnoty součinitele tření závisí na tloušťce vodního filmu na vozovce až při rychlostech nad 50 km/h, pokud se nejedná o vozovku zaplavenou. Při rychlosti do 50 km/h se množství vody pod pneumatikou prakticky neuplatňuje (hovoříme ovšem o vozovce mokré s tloušťkou vodního filmu alespoň 0,2 mm, tedy nikoli o vozovce nesouvisle navlhlé). Naopak při zvyšování rychlosti nad 50 km/h proniká postupně vodní klín pod běhounovou plochu a postupně zmenšuje stykovou plochu pneumatiky s vozovkou, až dojde k úplnému oddělení jež se nazývá aquaplaning. Podrobnější pojednání o vodě na vozovce je v kapitole 4.16.

4.3 Vliv skluzu kola

O skluzu kola hovoříme, když obvodová rychlost brzděného kola je menší než rychlost dopředná. Prokluz přichází v úvahu při prudké akceleraci, kdy obvodová rychlost kola je vyšší než rychlost dopředná.

Míra skluzu pneumatik ovlivňuje interakci pneumatiky s vozovkou a tím přímo i hodnoty součinitele adheze. Kombinuje se s vlivem rychlosti jízdy. Maximální adhezní možnosti v podélném směru poskytuje pneumatika, jejíž běhounová plocha se odvaluje po povrchu vozovky s určitým skluzem (podle konstrukce pneumatiky a druhu dezénu 10 až 30%).

Pokud se kolo odvaluje po povrchu bez posunů nebo jen s malými relativními posuny ve stykové ploše, disponuje součinitelem adheze, který je vyšší než součinitel smykového tření příslušející 100% smýkání neotáčejícího se kola. Tato závislost platí obecně, tedy pro pneumatiky za sucha, za mokra i v zimních podmínkách, ale i pro kolejová vozidla. Závislost součinitele adheze na relativním skluzu kola (udávaném obvykle v procentech od 0 do 100) se nazývá skluzová charakteristika.

4.4 Vliv makro– a mikrotextury povrchu vozovky

Textura povrchu vozovky je morfologické uspořádání částic materiálu vytvářejícího povrch vozovky.

Mikrotextura je souhrn výstupků na jednotlivých zrnech kameniva krytu vozovky.

Makrotextura je souhrn výstupků na povrchu krytu vozovky (obvykle výstupků tvořených zrny kameniva). V souvislosti s makrotexturou hovoříme o drenážní schopnosti odvádět vodu ze stykové plochy mezi pneumatikou a vozovkou (obdobně jako drenážní schopnost dezénu pneumatiky).

Textura určuje adhezi zejména za mokra. **Velikost adheze při nízké rychlosti** (udává se pro 20 km/h) **je určována hlavně mikrotexturou, zatímco makrotextura ovlivňuje strmost poklesu adheze se vzrůstající rychlostí.**

Prakticky to znamená, že povrch bez mikrotextury bude za mokra kluzký, i když by měl relativně výraznou makrotexturu. Jsou-li totiž hodnoty adheze nízké při rychlosti 20 km/h, nelze kluzkost napravit mírností poklesu adheze se vzrůstající rychlostí. Představme si texturu tvořenou malými ohlazenými křemencovými oblázky přibližně shodné velikosti. Taková textura je zvláště záludná : za mokra netvoří hladkou lesklou plochu, tedy nejeví se na pohled z místa řidiče jako kluzká ale naopak jako povrch se zdánlivě dobrými protismykovými vlastnostmi.

Podrobnosti jsou v kapitole 5.1, kde je i vývojový diagram textur (obr.4).

4.5 Vliv dezénu pneumatiky

Různé dezény poskytují přirozeně i různé protismykové vlastnosti. Nejosvědčenější dezény se vyráběly řadu let a ve velkých sériích – například Barum OR6 či Michelin XZX. Závislosti hodnot součinitele adheze na rychlosti jízdy za mokra jsou přirozeně různé na různých texturách vozovek a ovlivněny řadou dalších činitelů, a tak bohužel nelze uvést žádné reprezentativní grafy bez rizika, že budou později neadekvátně aplikovány.

Na ledě pod bodem mrznutí se vliv dezénu neprojevuje, pouze na ledě s mokrým povrchem se uplatňuje vliv hloubky drážek dezénu od 0 do 1 mm a to nárůstem součinitelů f o cca +0,05.

4.6 Vliv složení pryže běhounu pneumatiky

Běhounová plocha z měkčí pryže (s nízkou resiliencí) vykazuje vyšší hodnoty součinitele adheze za sucha i za mokra. Zájem o co nejvyšší adhezi se tím ale dostává do protikladu zájmu o životnost pneumatik (v km). Principiálně lze říci, že pneumatiky pro vyšší kategorii rychlosti mají běhounovou plochu z měkčí pryže.

4.7 Vliv teploty

Hodnota součinitele adheze za mokra mírně klesá se vzrůstající teplotou vozovky (vody) od 0° C do cca 20° C (o max. cca –0,14 při rychlosti 20 km/h na vozovce s dobrými adhezními vlastnostmi). Při dalším zvyšování teploty je pokles adheze již zcela nepatrný.

Vliv teploty ledu je relativně výrazný, součinitelé f stoupají s teplotou klesající pod bod mrznutí. Na ledě s mokrým povrchem lze počítat s hodnotou f v rozsahu od 0,05 do 0,12 nezávisle na rychlosti jízdy, při teplotě –5° C pak 0,18 až 0,25 (včetně vlivu rychlosti – viz nahoře).

4.8 Vliv hustění pneumatiky

Zákonitosti pojednané v této publikaci mají vztah k jmenovitému hustění pneumatik.

Mírné snížení přetlaku v pneumatice vede k zvětšení stykové plochy s vozovkou a za sucha může vést k zvýšení využitelné adhezní síly, tedy na suché a na vlhké vozovce nevede k prodloužení brzdné dráhy (lit.[24]).

Za mokra je vliv hustění závislý na řadě dalších činitelů, a proto nelze uvést nějaké jednoduché pravidlo.

Při nesprávném hustění se zmenšuje styková plocha pneumatiky s vozovkou : při přehustění se zmenšuje směrem k centru, při značném podhustění se zmenšuje směrem od centra, které se odlehčuje.

Adheze pneumatik bez přetlaku se nezjišťovala, neboť jde o extrémní stav, při němž adheze může být případ od případu ovlivněna řadou dalších činitelů.

4.9 Vliv ročního období

Roční období je činitel ovlivňující protismykové vlastnosti povrchu vozovky.

V létě jsou povrchy vozovek za mokra systematicky nejkluzčí. Tato málo známá a poněkud paradoxní skutečnost plyne shodně z výzkumů provedených u nás i v zahraničí. Vysvětlení je jednoduché : za suchého období se povrch vozovek zvýšenou měrou obrušuje a uvolněné částice jsou za tepla zatlačovány do měkčího povrchu (zejména u vozovek živičných). V průběhu déletrvajícího chladnějšího období povrch poněkud křehne a ulpělé částice se za mokra z textury vymývají. **Drsnost se regeneruje v průběhu zimy.** Hodnoty součinitele tření zjištěné v průběhu roku lze přepočítat na nejnižší letní hodnoty s použitím přibližných koeficientů dle následující tabulky :

Měsíc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Asf.	0,86	0,87	0,87	0,88	0,92	0,98	1,00	1,00	0,96	0,90	0,87	0,86
Beton	0,91	0,91	0,92	0,94	0,96	0,99	1,00	1,00	0,97	0,92	0,92	0,91

kde Asf. = asfaltový kryt vozovky
 Beton = cementobetonový kryt vozovky

4.10 Vliv stáří vozovky

Sezónní vlivy se kombinují s vlivem celkového opotřebení a obrusu krytu vozovky. Nová živičná vozovka po zahájení provozu obvykle zlepšuje svoji geometrickou drsnost, a to jednak změnou uválcovaného povrchu na charakteristickou texturu a jednak setřením živičného filmu s povrchu zrn kameniva. Potom nastává mírný dlouhodobější pokles vlivem ohlazování. Po provozu trvajícími půl až dva roky (podle hustoty provozu vozidel – zejména nákladních) působí již jen sezónní změny.

4.11 Vliv polohy jízdních stop na vozovce

Výběr měřené stopy ovlivňuje hodnotu součinitele adheze vlivem nestejnosti rozložení protismykových vlastností v šířce vozovky.

Vliv provozu vozidel na obrušování a ohlazování povrchu vozovek závisí na trvání, na intenzitě provozu (vozovky na silnicích podřadného významu bývají dlouhodobě drsné) a na kolových tlacích. Pneumatikami nákladních vozidel se povrch obrušuje mnohonásobně víc než účinky pneumatik osobních automobilů a motocyklů. Na vícepruhových vozovkách bývá značný rozdíl v protismykových vlastnostech v pružích krajních ve srovnání s pruhy ostatními. V samotných jízdních pružích jsou nejvíce ohlazeny jízdní stopy v rozestupu odpovídajícím zhruba rozchodu kol velkých nákladních automobilů.

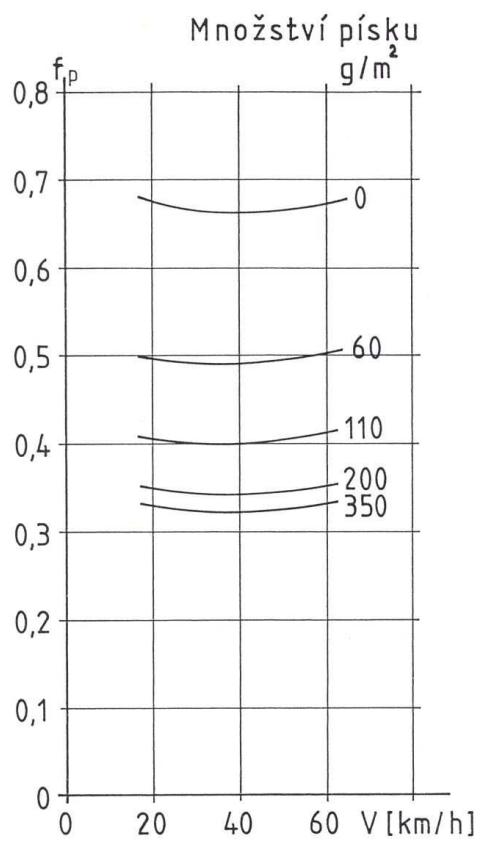
4.12 Vliv znečištění vozovky

Nečistoty na povrchu vozovky (prach, saze, hlína, písek) mění protismykové vlastnosti povrchu vozovky. Vznikají odlišné podmínky pro styk pneumatiky s vozovkou, neboť například řídké bláto má podstatně vyšší viskozitu než čistá voda.

Písek na povrchu vozovky snižuje adhezi pneumatik i za sucha – hrubou představu poskytuje obr.3.

Zvláště zálužný stav – naštěstí u nás zcela výjimečný – vzniká, vysype-li se na vozovku štěrky s oblými (oblázkovitými) zrny. Adhezní poměry pneumatik při jízdě běžnou provozní rychlostí mohou být srovnatelné s náledím nebo s aquaplaningem. Povrch je obdobou obávaného australského „gravel road“, t.j. drobné oblázky na tvrdém povrchu, na němž selhávají i mnohé ABS systémy, pneumatiky vozidel na oblázcích kloužou podobně jako Jánošík na hrachu. Nejedná se ovšem o ojedinělá zrna štěrku, ale o hustý téměř souvislý posyp.

V této souvislosti vzpomínám na případ, kdy v obci byla prováděna pokládka zdršňovacího nátěru na krátkém přímém úseku mezi dvěma protisměrnými zatáčkami, kritický úsek začínal těsně před koncem zatáčky, a tak jej nebylo možno zpovzdálí vidět. Byla použita předepsaná kamenná drť úzké zrnitosti, tedy všechna zrna byla zhruba stejně veliká cca 8 mm. Pro danou technologii je stanoveno, že po posypu kamenivem je nutno úpravu okamžitě válcovat, válcování se provádí tak, aby každé místo úpravy bylo ošetřeno 4 až 6 pojezdy válce. Nepřichycená zrna kameniva se mají odstranit v závislosti na počasí a klimatických podmínkách. Do doby odstranění nepřichyceného kameniva je nutné na úseku omezit rychlost provozu na 40 km/h. Při použití kationaktivní asfaltové emulze lze provoz uvolnit v závislosti na teplotě vozovky, teplotě ovzduší, rychlosti větru, intenzitě slunečního svitu a umístění úseku nejdříve po 2 hodinách po položení s omezením rychlosti provozu na 40 km/h po dobu 24 h. Po dobu dalších 5 dnů je třeba omezit rychlost provozu na 60 km/h. Ve vzpomínaném případě byla práce ukončena v pátek odpoledne. Pracovníci po provedení pokládky nevyčkali na vyštěpení asfal-



Obrázek 3: Hodnoty součinitele tření pod zablokovaným kolem za sucha při znečištění povrchu vozovky pískem

tové emulze (tedy na to, až drť dostatečně ulpí), předčasně sbalili eventuálně použitá dopravní zařízení (dopravní kužele Z1 či zábrany Z2) a odjeli, čímž zároveň uvolnili silniční provoz v době, kdy jízda po nehotovém (nevyštěpeném) povrchu byla nebezpečná. Zakrátko na tom místě havaroval osobní automobil jako na ledě – bylo sucho, léto. Živice jsou produkty mastné povahy. Teprve po vytvrnutí (vychladnutí, zde po vyštěpení) ztrácejí své mazací vlastnosti. Stav v době nehody bylo možno s nevelkou nadsázkou přirovnat k vylití maziva a posypání souvislou vrstvou kuliček.

4.13 Vliv zatížení kola

Zatížení kol ovlivňuje interakci. Součinitel adheze pryže není nezávislý na přítlačné síle (neřídí se Coulombovým zákonem). Závislost součinitele adheze na přítlačné síle se ale kombinuje (komplikuje) s mírou skluzu kola : Například při experimentech (lit.[11]) prováděných se zatížením kola 2, 4 a 6 kN na suché vozovce při rychlosti 50 km/h byly při skluzu a prokluzu 60% naměřeny nejvyšší hodnoty při 2 kN, s přibývajícím zatížením součinitel adheze klesal, zatímco kolem 15% byly nejvyšší hodnoty adheze při 4 kN, pod tím bylo 6 kN a nejnižší 2 kN (křivky se různě kříží). Na mokré vozovce při tloušťce vodního filmu 0,1 mm při rychlosti 50 km/h a zatíženích opět 2, 4 a 6 kN nebyl při brzdění vliv téměř žádný, při pohonu ležely nejvýše hodnoty při 2 kN, při 4 a 6 kN poněkud níž, vliv je ale velice malý. Na ledě při zvýšení zatížení kola na čtyřnásobek, klesá součinitel adheze o cca $-0,03$.

Pro znaleckou praxi postačuje vědět, že vliv zatížení kola (v běžném provozním rozsahu) na hodnoty součinitele adheze není velký, lze jej zahrnout v tolerančním rozpětí (pásu) uvažovaných hodnot součinitele adheze. Běžným provozním rozsahem zatížení kola je míněno zatížení vlastní hmotností vozidla až po dovolenou celkovou hmotnost s eventuálním přetížením na cca 150% dovoleného užitečného zatížení (to je zatížení, jež rovněž přichází v úvahu v běžném provozu vlivem dynamických sil pod koly).

4.14 Vliv konstrukce pláště

Typ pláště ovlivňuje adhezní vlastnosti pneumatiky zvláště za mokra. Eventuální měření je tedy nutno provádět na pneumatikách téže konstrukce a s tímž dezénem, jaký přísluší situaci modelované. Na náledí nemá konstrukce pláště žádný významný vliv na adhezi.

4.15 Vliv ojetí dezénu

Opotřebením dezénu pneumatiky snižuje hodnoty součinitele adheze na **mokré** vozovce a to tím více, čím se hloubka drážek propadá pod 1,6 mm. Nejnepříznivější adhezní vlastnosti za mokra vykazuje pneumatika s hladkou běhounovou plochou. Na **suché** vozovce je situace opačná – největší adhezi poskytuje pneumatika hladká. Pro znaleckou praxi z toho plyne připomínka, kterou je vhodné v příslušném případě v posudku uvést : že při jízdě na ojetých pneumatikách představuje změna ze suché na mokrou vozovku zvláště velký propad hodnoty součinitele adheze.

4.16 K problematice aquaplaningu

Aquaplaning (čes. též akvaplanink) je stav, kdy pneumatika za určité rychlosti a dané tloušťky vodní vrstvy úplně ztratí kontakt s povrchem vozovky a vozidlo se stane neovladatelným.

Je to jev analogický vodnímu lyžování. Lyže vodního lyžaře by při pomalém pohybu samozřejmě zapadly pod hladinu ke dnu tak, jako pneumatika dosedá skrze vodní film až k povrchu vozovky při pomalé jízdě.

Teprve když rychlost pohybu lyží po hladině je dostatečně vysoká, mohou lyže klouzat po hladině, přičemž se „boří“ tím méně, čím rychleji je vodní lyžař po hladině tažen.

Obdobně nezbytnou podmínkou pro vznik aquaplaningu je náležitá hloubka vody a nadkritická rychlost.

Řekne-li se : vrstva vody o tloušťce 5 mm, každý si to dovede představit. Je ale vhodné uvážit, že to je nejméně 5 litrů na každém čtverečním metru a nejméně 500 litrů na ploše 10x10 m. Proč nejméně ? Protože při aquaplaningu jde o tzv. vztažnou tloušťku vodního filmu nad výstupky textury, tedy množství vody je zvětšeno o objem potřebný k vyplnění prohlubní v textuře (viz kap.4.2). Přívalový déšť nemívá dlouhé trvání. Za 5 minut při něm napršelo například 6,6 mm vody, přičemž četnost takové intenzity lze očekávat zhruba jednou ročně. S četností cca jednou za 10 let přichází v úvahu intenzita 14 mm za 5 minut, a s četností cca jednou za 20 let až 16,6 mm za 5 minut.

Voda ale na vozovce nezůstává bez pohybu – stéká ve směru výsledného sklonu vozovky. Na dálnicích v přímém směru a v pravotočivých směrových obloucích to znamená, že zatímco nalevo může být jen tolik vody, kolik odpovídá rovnováze mezi přítokem a odtokem, v pravém pruhu může být vrstva vody vyšší o to, co přitéká z pruhu levého. V levotočivých směrových obloucích je přirozeně naopak více zaplavena levá strana vozovky. Se zvětšením podélného spádu vozovky se zvětšuje délka dráhy odtoku vody a tím se zvět-

šuje její množství a přirozeně i tloušťka vodního filmu. Studie na toto téma je v lit.[26].

Tloušťka vodního filmu je dána intenzitou deště, příčným a podélným sklonem vozovky, délkou spádnice, texturou, rovností a silou větru. Pokud vítr fouká proti směru výsledného spádu vozovky, může tloušťku vodního filmu významně zvětšit (lit.[7]).

Riziko vzniku aquaplaningu bývá největší v okolí začátků a konců levotočivých zatáček. Kvůli odtoku srážkové vody s povrchu vozovky se na přímých úsecích silnic stavějí vozovky v oboustranném příčném sklonu, jemuž se říká střechovitý. To znamená, že od středu šířky silnice má vozovka příčný sklon (zpravidla 2,0 až 2,5%) na obě strany. Vícepruhové jednosměrné jízdní pásy dálnic a rychlostních komunikací (dále jen dálnice) se v přímých úsecích stavějí v jednostranném příčném sklonu směrem vpravo. Kvůli zlepšení průjezdnosti zatáček se vozovky silnic i dálnic v zatáčkách stavějí v jednostranném dostředném příčném sklonu (podle poloměru zatáčky a návrhové rychlosti komunikace). V úseku tzv.vzestupnice, kde se pravý okraj vozovky postupně zdvihá a vozovka se překlápí z pravostranného do levostranného příčného sklonu, je vždy místo, kde je příčný sklon vozovky nulový – nedostatečný pro odtok srážkové vody. **Za přívalového deště se v takovém místě přirozeně vytváří vrstva vody tlustší, než v předchozím přímém úseku a než dál v zatáčce.** Při průtrži mračen je rozumné jet obzvláště pomalu, nebo raději zastavit a počkat, až se přežene.

Kritická vrstva vody se vytváří ve formě velikých kaluží i při zcela běžném dešti nebo dokonce až za chvíli po jeho skončení : stečením vody z velké plochy do nejnižšího místa údolnicového výškového oblouku, dojde-li tam k ucpání kanalizace. Je-li v tom místě současně levotočivý směrový oblouk komunikace směrově rozdělené středovým dělicím pásem, pak se kaluž vytvoří v levém („rychlém“) jízdním pruhu u středového dělicího pásu. Za snížené viditelnosti lze kaluž rozpoznat snad jen podle toho, že v ní „mizí“ vodící čára. Úplné či kritické ucpání kanalizace (ve vztahu k určitému přítoku) má nějaký počátek v čase : havaruje-li v takovém místě řidič v důsledku aquaplaningu, pak argumentace, že tudy jiní projeli, je povrchní. Navíc ani nevíme, kolik jiných řidičů postižených aquaplaningem tam do ničeho nenarazilo a prostě odjeli.

Vodní kaluž vzniklá na vozovce v příčném sklonu má pod pravými a levými koly automobilu rozdílnou hloubku i délku. V takovém místě nejsou všechna čtyři kola automobilu „postižena“ aquaplaningem současně (naráz) a tím dochází k směrovému stáčení automobilu, neboť **při průjezdu hlubší vrstvou vody působí na kola i při aquaplaningu přídavný brodivý odpor**, zatímco na kola jedoucí ještě po vozovce s tenkým vodním filmem působí jen malý odpor valivý. Když potom opodál (u konce kaluže) pneumatiky postupně zase získávají adhezi, bývá pootočený automobil prudce nasměro-

ván obecným směrem – například do protisměru, pokud se levá kola předtím brodila hlouběji a déle než kola pravá. Konstatování, že výjezd automobilu do protisměru byl způsoben neadekvátní manipulací řidiče s volantem, by v takovém případě bylo v rozporu s reálem.

Nebezpečí aquaplaningu souvisí také s podélnými prohlubněmi nazývanými výstižně vyjeté koleje. V nich může stékat dešťová voda jako korytem a tloušťka vrstvy vody může být i kolem 20 mm, zatímco na okolní ploše jen třeba kolem 1 mm. Při míjení s protijedoucím vozidlem nebo při předjíždění může být ve vyjetých kolejích náhle postižen aquaplaningem automobil, jehož řidič předtím jel koly mimo koleje.

S odvolávkou na výzkum provedený v NASA (USA) Hornem a Joynerem se v lit.[23] uváděl pro **diagonální** pneumatiky bez dezénu přibližný vztah (9) mezi kritickou rychlostí V_{akv} [km/h] a tlakem v pneumatice. Předpokládá se, že hydrodynamický tlak pod pneumatikou při aquaplaningu je přibližně shodný s vnitřním tlakem v pneumatice. Např. při hustění (přetlaku) okolo 2 at (= 0,2 MPa) je uvedena kritická rychlost okolo $V_{akv} = 89$ km/h. V poznámce stojí, že vztah platí přibližně i pro pneumatiku s dezénem, pokud je tloušťka vodního filmu větší, než hloubka drážek dezénu. Dále se ovšem poznamenává, že **takto vypočtená hodnota leží v relativně širokém rozsahu**, v němž je skutečná hodnota ovlivněna řadou dalších činitelů. Konstatuje se, že podhuštění je stejně nebezpečné jako ojetý dezén. Při malé tloušťce vodního filmu se pneumatika neodpoutá úplně z kontaktu s vozovkou. Velká tloušťka vodního filmu se na komunikacích vyskytuje zřídka : při tání sněhu, průtrži mračen, silné bouřce nebo při přeplnění kanalizace. – potud výpis z lit.[23].

$$\begin{aligned} V_{akv} &= 62,77 \cdot \sqrt{p_i [\text{at}]} \\ &= 200 \cdot \sqrt{p_i [\text{MPa}]} \end{aligned} \quad (9)$$

kde p_i je přetlak v at resp MPa.

V lit.[25] je uveden vztah jako (9), ale před odmocninou je namísto 62,77 koeficient 80 pro p_i udávané v at, tomu přísluší koeficient 250 pro p_i udávané v MPa. Pro přetlak od 1,5 do 1,7 at je v lit.[25] příkladmo určena kritická rychlost kolem 100 km/h.

Přibližný vztah (9) platil jen pro běžné diagonální pneumatiky. Měrný tlak ve stykové ploše **radiální** pneumatiky se může lišit od vnitřního tlaku, a zde je nutno brát vztah (9) obzvlášť jen jako orientační, přibližný. V různé literatuře naleznete vztahy jako (9), ale s jinými koeficienty před odmocninou a to nejen podle toho, zda se tlak udává v MPa, kPa, atm, barech apod.

Tedy údaje o kritické rychlosti pro vznik aquaplaningu jsou různé podle různých autorů – ostatně ve shodě s reálem : podle tloušťky vrstvy vody, textury vozovky, druhu a hloubky dezénu a šířky pneumatiky, podle jejího zatížení a v neposlední řadě i podle průměru kola.

Vznik aquaplaningu při nižší rychlosti není vyloučen, je však podmíněn zvláště velkou vrstvou vody, hladkostí vozovky nebo ojetými pneumatikami. Účelem textury povrchu vozovky a stejně tak i účelem drážek dezénů pneumatik je odvádění vody ze stykové plochy běhounové plochy plášťů s vozovkou, aby se zabránilo vzniku aquaplaningu. Ojeté pneumatiky na kolech spolu s hladkou vozovkou usnadňují vznik aquaplaningu v tom smyslu, že při dané tloušťce vodního filmu může aquaplaning vzniknout při rychlosti nižší, než by to mohlo nastat s pneumatikami neojetými a na drsné vozovce.

V lit.[9] se na str.37 konstatuje možnost vzniku aquaplaningu při velké tloušťce vodního filmu (nad 10 mm) již při rychlosti 75 až 80 km/h.

Z lit.[18] je převzata následující tabulka hodnot kritické rychlosti pro vznik aquaplaningu v závislosti na tloušťce vodního filmu a hloubce drážek dezénu. Poznámám, že uvedené hodnoty jsou přirozeně jen orientační, neboť není specifikována textura povrchu vozovky ani poměr velikosti drážek a figur dezénu, jež se uplatňuje zejména pro tloušťku vodního filmu do cca 5 mm, není zohledněn vliv šířky pneumatiky v poměru k zatížení kola, apod.

Tloušťka vodního filmu	Hloubka dezénu	
	1,6 mm	8,0 mm
do 2 mm	cca 120 km/h	> 140 km/h
4 až 5 mm	90 km/h	110 km/h
6 až 8 mm	80 km/h	90 km/h
10 až 14 mm	60 km/h	70 km/h

U nákladních vozidel nepřichází aquaplaning prakticky v úvahu vzhledem k velikému měrnému tlaku ve stykových plochách pneumatik s vozovkou.

V odborných kruzích se hovoří o aquaplaningu podélném a příčném. Pro podélný se udává kritická rychlost a pro příčný se udává boční zrychlení. Automobil při testu jezdí po kruhové dráze, na níž je určitý úhlový segment zaplaven vodou. Rychlost se postupně zvyšuje a s tím vzrůstá dostředné (boční) zrychlení. Jako kritické se pak udává to zrychlení na nezaplaveném segmentu kruhové dráhy, při jehož překročení došlo na zaplaveném segmentu k vzniku aquaplaningu.

Je třeba dát pozor na to, abychom v případě dané konkrétní havárie **nezaměňovali kluzkou vozovku s aquaplaningem**. Při opravdovém aquaplaningu je příčné zrychlení teoreticky nulové, prakticky je dáno brodivým odporem, jež je ve směru příčném přirozeně větší než ve směru roviny kola.

Taková záměna pojmů by mohla mít určité technicko-právní důsledky v souvislosti s hodnocením konkrétní nehody. Při skutečném aquaplaningu nelze hovořit o jízdě po kruhové (či obecně obloukové) dráze, ale jde o přičení vozidla obdobně jako při smyku.

Pokud někdo argumentuje aquaplaningem u běžného osobního automobilu při rychlostech do 70 km/h, jedná se spíše o jiný efekt : Voda v obzvlášť hluboké kaluži klade pohybu kol velký hydrodynamický (brodivý) odpor. Při nestejnosti hloubky vody pod levými a pravými koly může i při relativně nízké rychlosti dojít k pootočení automobilu kolem gravitační osy vlevo nebo vpravo. Nejedná se o aquaplaning, nicméně může to vést k iniciaci havarijního pohybu nežádoucím směrem.

Paradoxně nepříznivě se uplatňuje šířka běhounové plochy pneumatik. Moderní rychlý automobil vybavený širokými pneumatikami se může dostat do stavu aquaplaningu při nižší rychlosti než automobil osazený pneumatikami užšími s týmž dezénem.

Čím vyšší rychlostí vozidlo jede, tím nižší hloubka vodního filmu postačuje k vzniku aquaplaningu, analogicky jako se při vodním lyžování zmenšuje hloubka „boření“ lyží pod hladinu se vzrůstající rychlostí lyžaře.

Při aquaplaningu tedy dochází k úplné ztrátě kontaktu pneumatiky s povrchem vozovky a v důsledku toho vozidlo zcela přestává reagovat na řízení a na brzdění, stává se neovladatelným. V tom je rozdíl v porovnání s vodním lyžováním, kde si lyže zachovávají určitou možnost směrového vedení (zřejmě hranovým efektem).

Pneumatiky na vodě nemají pevnou oporu jako na vozovce. Kola více zatížená se přirozeně boří hlouběji do vody. **Automobil ve stavu aquaplaningu je jako tzv. katamaran** (plavidlo se dvěma lodními trupy) **kolébající se na hladině**. Vrstvu vody na vozovce při přívalovém dešti si nelze představovat jako nějaký koberec konstantní tloušťky. **Voda se nechová jako pohyblivý pás, ale ve větším množství stéká po vozovce ve viditelných vlnách, také vlivem prudkého větru se tloušťka vody diferencuje – to vše se podílí na diferenciaci zbytkového brodivého odporu pod koly levými a pravými (jenž přirozeně působí i při aquaplaningu) a vede k nebezpečnému směrovému stáčení automobilu, neboť vodící schopnost pneumatik je v té situaci nulová.**

Při zvyšování rychlosti proniká vodní klín více do stykové plochy pneumatiky s vozovkou a stykovou plochu zmenšuje, současně ale vzrůstá hnací síla na kolech potřebná k překonávání zvýšeného odporu vzduchu i brodivého odporu pneumatik. K havárii vozidla při vysoké rychlosti na vozovce se silnější vrstvou vody může dojít i tehdy, když se ještě nevytvořily podmínky pro vznik aquaplaningu. Příčinou může být úplná nebo aspoň podstatná ztráta boční vodící schopnosti poháněné nápravy jako důsledek výrazného nárůstu

adhezních nároků pneumatik na přenos hnací síly. Je-li poháněna zadní náprava, přichází v úvahu vznik silně přetáčivého smyku. Prakticky vždy se vyskytuje buď i malá boční síla vyvolaná bočním větrem, příčným sklonem vozovky, nesouměrností vnějších sil apod. (lit.[21]).

Aquaplaning našťastí není jevem příliš frekventovaným, neboť vyšší vrstva vody se na vozovkách netvoří často, ale bývá bohužel záluďně lokalizována na nevelkou plochu, přičemž ten stav nelze pohledem z místa řidiče náležitě rozpoznat. **Analyzované případy měly společné znaky : nerozumně vysoká rychlost na širokých pneumatikách za přívalového deště. Ve většině těch případů se to stalo v inflexním bodě (úseku) překlápění vozovky z pravostranného do levostranného příčného sklonu.**

5 ADHEZE V PRAXI

5.1 Jak se pozná kluzká vozovka a jak určit součinitele adheze

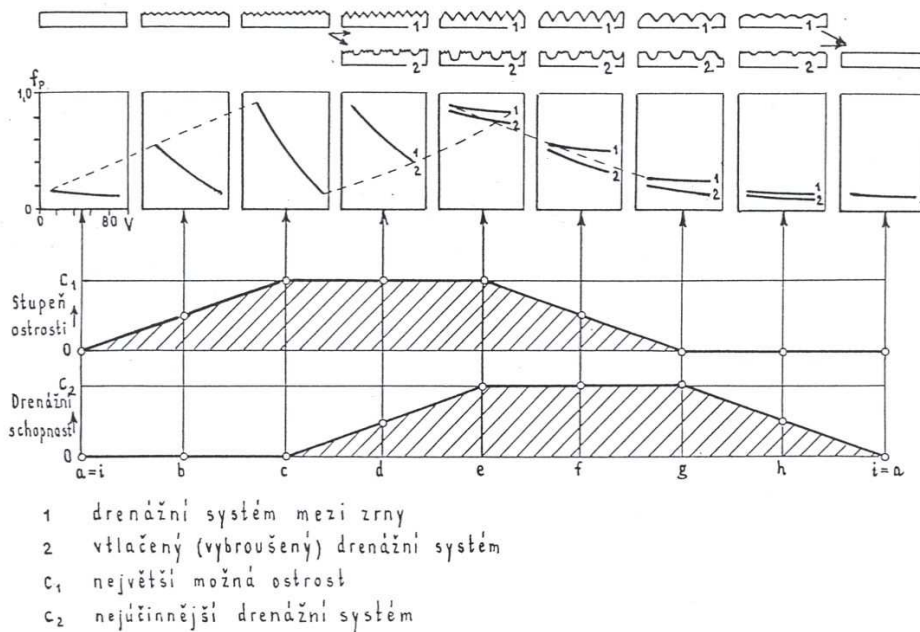
Jde o problematiku **mokrě** vozovky, kdy na **každě vozovce** klesají hodnoty součinitele adheze se vzrůstající rychlostí jízdy.

Pokud jsou hodnoty součinitele adheze nízké již při rychlosti 20 km/h, pak samozřejmě nemohou být vyhovující při rychlostech vyšších. Hodnoty součinitele adheze při nízké rychlosti závisejí na tzv. **mikrotextuře**, což je souhrn výstupků na jednotlivých zrnech kameniva krytu vozovky. Určitým přibližným vodítkem je osahání povrchů vystupujících zrn kameniva. Pokud jsou to hladké **sklovité** oblínky, jde určitě o povrch, jenž je za mokra kluzký. Takové hladké oblínky se vytvářejí zejména na basickém kamenivu (diabas, čedič), ale také na křemencích (známé kočící hlavy historické dlažby) a na vápencích. Konstatujeme mikrotexturu hladkou až sklovitou. Pokud nenahmatáme sklovitý povrch, pak není mikrotextura hladká, ale konstatujeme mikrotexturu jemně drsnou až drsnou.

Potom věnujeme pozornost tzv. **makrotextuře**. Ta představuje souhrn výstupků povrchu krytu vozovky. Spolupůsobí spolu s drážkami dezénů pneumatik při odvádění vody ze stykové plochy, a proto má vliv zejména na výše zmíněnou strmost poklesu hodnot součinitele adheze se vzrůstající rychlostí jízdy. Makrotexturu můžeme shledat jako žádnou, sotva znatelnou, jemnou, výraznou až hrubou. K posouzení účinku makrotextury na adhezi za mokra je již nutná určitá zkušenost.

Výstižné schéma vlivu povrchu vozovky na hodnoty součinitele tření za mokra je v lit.[6], z níž je převzat graf v obr.4. Autor sice neužívá pojmy mikro- a makrotextura (zavedené v ČR), ale používá stupně ostrosti a dre-

názní schopnosti textury povrchu vozovky, což je do jisté míry obdoba.



Obrázek 4: Vliv textury na adhezi pneumatik za mokra

Z grafu vyplývají následující zákonitosti :

1. Stupeň ostrosti textury určuje hodnotu součinitele tření při nízkých rychlostech, prakticky nezávisle na drenážní schopnosti povrchu (odvádět vodu ze stykové plochy s pneumatikou).
2. Drenážní schopnost povrchu určuje hodnotu součinitele tření při vyšších rychlostech, avšak **závisle** na stupni ostrosti textury – součinitel tření při vyšších rychlostech nemůže za mokra převýšit hodnotu součinitele tření při nízkých rychlostech (ani při největší drenážní schopnosti povrchu).
3. Sklon (strmost) čáry závislosti součinitele tření na rychlosti jízdy závisí ve většině případů na drenážní schopnosti povrchu a na stupni ostrosti textury.
4. Při konstantní drenážní schopnosti (ne však extrémně vysoké) závisí sklon čáry jen na stupni ostrosti textury – se zvyšujícím se stupněm ostrosti textury vzrůstá strmost čáry (přechod z typu a na c).

5. Při konstantním stupni ostrosti (ne však extrémně nízkém) závisí sklon čáry jen na drenážní schopnosti – se vzrůstající drenážní schopností se zmenšuje strmost čáry (přechod z typu c na e).
6. Při extrémně vysoké drenážní schopnosti probíhá čára téměř vodorovně, stupeň ostrosti textury určuje výšku čáry v grafu (typ e, f a g).
7. Při extrémně nízkém stupni ostrosti probíhá čára téměř vodorovně v extrémně nízkých hodnotách, nezávisle na drenážní schopnosti (typ g, h a i).

Pro měření protismykových vlastností povrchů vozovek z toho vyplývá důležitý závěr, že vyhovující je pouze taková metoda (nebo kombinace měřících metod), která umožňuje posoudit zároveň stupeň ostrosti textury i drenážní schopnosti povrchu vozovky.

Pro znaleckou praxi je důležitá zvláště ta okolnost, že **vozovka vykazující třeba i výraznou makrotexturu ale s hladkou mikrotexturou bude za mokra kluzká !** To jsou pak doslova zrádné povrchy, jež při pohledu z místa řidiče nevytvářejí za mokra hladkou lesklou zrcadlicí plochu, ale naopak navozují zdání dobré protismykové textury. Textura se podobá povrchu dlaždic z tzv. vymývaného betonu používaných pro dekorální pochůznou plochu, jejichž povrch tvoří drobné oblázky vyčnívající do výšky asi 4 mm nad cementovou maltu, která drží dlaždici pohromadě.

Z toho, co bylo uvedeno plyne, že primární důležitost má tzv. mikrotextura, vytvářená většinou charakteristickým povrchem zrn kameniva různých hornin. Pokud je ale kamenivo zcela obaleno živicí (nový nezajetý povrch vozovky), pak může dojít přechodně k tomu, že je mikrotextura hladká a vozovka má zhoršené protismykové vlastnosti za mokra až do doby, než se provozem vozidel obrousí živičný film s povrchu kameniva tzv. obrusné vrstvy vozovky a než se začne uplatňovat charakteristická mikrotextura daného kameniva.

Jak si tedy máme počínat při určení rozsahu hodnot součinitele adheze ? V souvislosti s „vlídnou odmocninou“ (viz kapitolu 1.3) bývá kvalifikovaný (či alespoň poučený–) odhad postačující, zatímco šablonovité převzetí „směrných“ tabelárních hodnot součinitele adheze by v případech mokré vozovky mohlo vést k značným chybám.

Jsou-li zrna kameniva nápadně černá, může to být čedič, jsou-li nápadně bělavá, může jít o vápenec. Ten má ovšem i řadu jiných odstínů. Identifikace patří do oboru technické petrografie. Napomoci může i znalost, jaké kamenivo se v blízkosti těží, či dotaz na místní Správě a údržbě silnic.

Při osahání textury můžeme slovně popsat a relativně zařadit makro- a mikrotexturu. Nemáme-li právě před sebou čedič či vápenec (jež mají nepříznivou adhezní afinitu k pryži pneumatik), můžeme z mikrotextury odhadnout, zda hodnota součinitele adheze za mokra při rychlosti 20 km/h je relativně vysoká (při drsné mikrotextuře) či zda je naopak relativně nízká (při hladké mikrotextuře). Pak podle makrotextury určíme, zda pokles hodnot součinitele adheze se vzrůstající rychlostí jízdy je mírný (při výrazné makrotextuře) či naopak strmý (při sotva znatelné či chybějící makrotextuře). Podle toho můžeme adhezní vlastnosti předmětného povrchu blíže vymezit v reálném rozsahu (obr.2). K tolerancím a k nejnižším hodnotám viz další kapitoly.

Máme-li před sebou plochu živičného výpotku (nadměrné množství živičného pojiva v obrusné vrstvě vozovky), jde o hladkou mikrotexturu a chybějící makrotexturu – takový povrch označíme jako za mokra kluzký, nevyhovující podmínkám bezpečné jízdy. Důležité ovšem bude, o jak velký podíl výpotků na celé ploše vozovky se jedná a jak jsou jednotlivě veliké. Ojedinělý výpotek o průměru do půl metru by sotva mohl být příčinou nehody, když na něm brzděné kolo „setrvává“ jen několik málo setin sekundy.

Máme-li případ smyku vozidla s ojetými pneumatikami, je nutno samozřejmě počítat rovněž s příslušně sníženými adhezními možnostmi. K tomu viz kapitolu 5.4.

5.2 Na začátku deště

Na začátku deště nebývá na vozovce čistá voda, ale jemná suspenze prachu ve vodě. Hustota a viskozita suspenze je jiná, než u čisté vody, a tak hodnoty součinitele adheze přicházejí v úvahu snížené.

5.3 Jaké vzít tolerance

Tolerance uvažovaných hodnot brzdného zpomalení by neměly být užší než $\pm 0,5 \text{ m.s}^{-2}$ ani když základní údaj vychází z měření modelujícího skutečné podmínky. Tolerance $\pm 1 \text{ m.s}^{-2}$ přísluší dobrým znalostem všech souvisejících činitelů s možností opřít se o výsledky měření provedených za srovnatelných podmínek s dobře definovatelnými rozdíly. Tolerance $\pm 1,5 \text{ m.s}^{-2}$ lze použít v případech, kdy stav žádného z činitelů určujících míru adheze se nevymyká běžnému průměru. Pamatujme na to, že tím zohledňujeme nejen nepřesnost odhadu, ale i řadu vlivů, pro něž máme jen kvalitativní a nikoli přesná kvantitativní kritéria.

Do výpočtů dosazujeme vstupní veličiny v přibližných hodnotách. Počet platných cifer by měl odpovídat příslušné spolehlivosti údaje. Brzdné zpoma-

lení zadáváme s údaji na desetiny $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, anebo zaokrouhlené po polovinách $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Délky brzdných drah udáváme na decimetry.

V průběhu dalšího odvozování je radno přenášet mezivýsledky do dalších výpočtových vztahů s „přesností“ alespoň o jeden řád lepší, zejména vyústí-li do vztahu, v němž pak představují rozdíl dvou vzájemně blízkých hodnot – např. ve vztahu (10) (pro výpočet času t potřebného pro změnu rychlosti z V_1 na V_2 při zpomalení a)

$$t = \frac{V_1 - V_2}{a} \quad (10)$$

nesmějí být hodnoty V_1 a V_2 hrubě zaokrouhlené, jsou-li vzájemně blízké.

Naopak v závěrech posudků by zejména údaje o rychlostech měly být přiměřeně zaokrouhleny alespoň na celé jednotky km/h , když vstupní údaje hodnot např. u součinitele adheze jsme měli jen nejvýše na dvě platné cifry.

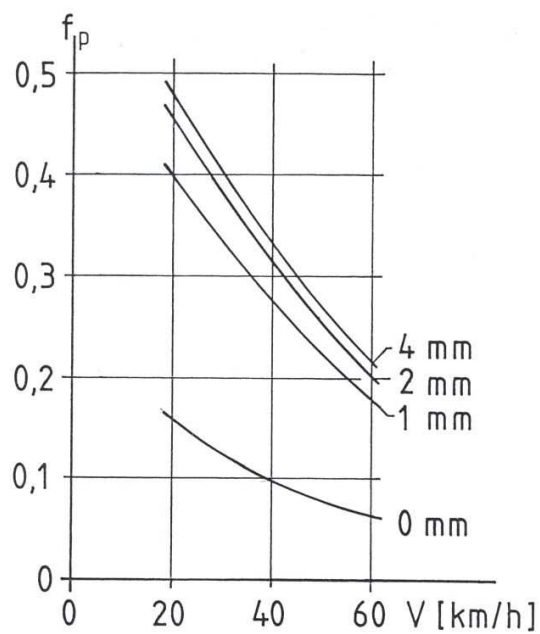
5.4 Jaké nejnižší hodnoty součinitele adheze se mohou vyskytnout

Nejprve uvažujme neznečištěný povrch vozovky za mokra – tedy žádný olej či nafta, žádné bláto na povrchu. Představitelem mimořádně kluzkého povrchu jsou tzv. živičné výpotky, tvořené kalužemi živičného pojiva „vypocenými“ a vytlačenými na povrch vozovky. Takový povrch se vyznačuje hladkou mikrotexturou a bez makrotextury.

V obr.5 jsou hodnoty součinitele podélného tření f_p (zjištěné dynamometrickým přívěsem VÚD-1) při zcela zablokovaném měřicím kole za mokra (tl. vodního filmu 0,5 mm) s různě ojetým dezénem BARUM OR6 na povrchu asfaltového betonu s hladkou mikrotexturou a chybějící makrotexturou (představitel vozovek za mokra mimořádně kluzkých).

U nákladních vozidel s tvrdší pryží v běhounové vrstvě pláštěů bývají hodnoty součinitele adheze nižší než u osobních automobilů. Pro pneumatiky nákladních vozidel **na vozovkách s nepříznivými protismykovými vlastnostmi** (kluzkých) přicházejí v úvahu následující hodnoty součinitele adheze v podélném směru :

Rychlost jízdy (km/h)	Součinitel adheze (—)	
	Pneu vyhovující	Pneu ojetá
20	0,35 až 0,45	0,15 až 0,22
40	0,25 až 0,35	0,10 až 0,17
60	0,16 až 0,26	0,06 až 0,13



Obrázek 5: Hodnoty součinitele podélného tření f_p (zjištěné dynamometrickým přívěsem VÚD-1) při zcela zablokovaném měřicím kole za mokra (tl. vodního filmu 0,5 mm) s různě ojetým dezénem BARUM OR6 na povrchu asphaltového betonu s hladkou mikrotexturou a chybějící makrotexturou (představitel vozovek za mokra mimořádně kluzkých).

Ve Výzkumném ústavu dopravním se měření prováděla na mimořádně kluzkých površích vozovek silnic jen do rychlosti 60 km/h (kvůli bezpečnosti posádky automobilu s dynamometrickým přívěsem VÚD 1 a 2). Vyššími rychlostmi (až do 120 km/h) se prováděla měření na vzletových a přistávacích drahách, jež nebyly mimořádně kluzké.

5.5 Jak uvažovat adhezi měnící se s rychlostí jízdy (za mokra)

Hodnota součinitele adheze pneumatik **na mokré vozovce** vždy vzrůstá s klesající rychlostí brzděného vozidla. Tedy hodnota f není konstantní, je funkcí rychlosti $f(V)$, rozdíly nejsou zanedbatelné. Jak máme postupovat, aby výpočet nepřerostl do velkých komplikací ?

Mějme závislost hodnot součinitele adheze na rychlosti jízdy (např. rozsah omezený dvěma křivkami). Pak postačující přesnost výsledků výpočtů dosáhneme, dosadíme-li pro každou z obou mezních křivek **jako fiktivní konstantu tu hodnotu součinitele f_{06} , jež přísluší 0,6-násobku počáteční rychlosti**. Například pro výpočet délky brzdné dráhy z rychlosti 60 km/h **do zastavení** dosadíme jako konstantu tu hodnotu součinitele tření, kterou disponovaly pneumatiky v okamžiku, kdy se vozidlo pohybovalo rychlostí 36 km/h. Platí to ovšem jenom pro intenzivní brzdění (přes mez adheze) na jediném (stejnorodém) povrchu vozovky a až do zastavení, tedy nikoli pro zpomalení z rychlosti V_1 na V_2 . Tedy zjednodušení popsané v tomto odstavci platí jen pro výpočtový vztah (11), zato ale s dobrou přibližností pro různé reálné závislosti $f(V)$.

$$L = \frac{V^2}{2 \cdot f_{06} \cdot g} \quad (11)$$

kde L je délka dráhy intenzivního brzdění [m],
 V je počáteční rychlost [m.s⁻¹],
 f_{06} je hodnota součinitele tření odpovídající rychlosti 0,6 V
 g je gravitační zrychlení $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

Vzhledem k tomu, že součinitel f je funkcí rychlosti $f(V)$, pak aplikace zjednodušení dle předchozího odstavce je ztížená v případě, že potřebujeme počítat dle vztahu (12), neboť neznáme předem právě tu rychlost V , k jejíž šedesáti procentům bychom vztáhli příslušnou hodnotu f_{06} . Tady nezbyvá, než postupovat zkusmo, ale po dvou či třech krocích se můžeme dostat k odpovídajícímu výsledku.

$$V = \sqrt{2 \cdot f_{06} \cdot g \cdot L} \quad (12)$$

význam symbolů je shodný jako u vztahu (11).

Uvedené zjednodušení ale nelze použít, potřebujeme-li znát příslušné mezilehlé hodnoty rychlosti a časové údaje **v průběhu** brzdění na mokré vozovce – tedy potřebujeme-li vynést diagram dráha \times čas, zejména pokud je počáteční rychlost brzdění vyšší než 60 km/h. V tomto případě lze funkci $a(V)$ aproximovat např. hyperbolou (viz lit.[29]) a provést integraci v příslušném intervalu. Integraci obecné závislosti $a(V)$ lze samozřejmě naprogramovat pro počítač.

5.6 Jaká je adheze na blátě

Nejkluzčí stav zablácení se vytvoří, je-li na vozovce rozježděna a zhutněna vrstva jílu neobsahujícího žádný šterk, která proschla a potom se její povrch znovu navlhčí. Takový povrch pak může být kluzký až jako náledí. Sám jsem byl svědkem v autobusu, jenž zastavil s brigádníky u řepného pole a po zastavení se na blátě sesunul pravým zadním kolem do příkopu jen vlivem příčného sklonu vozovky.

5.7 Problematika zledovatělé vozovky

Dle výkladového terminologického meteorologického slovníku, vydaného v roce 1993, je **náledí** definováno jako ledová vrstva pokrývající zemi, která vzniká

- jestliže nepřechlazené dešťové kapky nebo kapky mrholení později zmrznou na zemi
- jestliže voda z úplně nebo částečně roztáleného sněhu na zemi opět zmrzne
- jestliže zmrzne sníh částečně roztálený při provozu vozidel na silnicích a cestách.

Podobně nebezpečná je i **ledovka**, která se tvoří zmrznutím přechlazených kapiček na zemském povrchu, je-li jeho teplota mírně pod bodem mrazu.

5.7.1 K tvorbě náledí a ledovky

Nejrychleji se na vozovkách vytváří **ledovka** jako průvodní jev mrznoucího deště, kdy na podchlazenou vozovku naprší voda s teplotou na bodu mrazu. Kapky deště po dopadu získávají ihned velkou stykovou plochu s chladným

povrchem a **mrznou téměř okamžitě**. Z mrznoucího deště se může vyvinout ledovka do kritického nesjízdného stavu už i za dobu okolo 10 minut.

K tomu lze poznamenat, že ochlazování dešťových kapek (pokles teploty na 0° C) probíhá již během dopadu na zem předáváním tepla vody do vzduchu. Voda pak dopadá na zem „připravena“ k rychlé přeměně na led.

Tento jev nastává při přechodu teplé fronty ve vyšších vrstvách atmosféry nad terénem a při inverzním rozvrstvení teplot vzduchu. Řidiči sjíždějící „z teplých končin“ do údolí mívají nejprve k dispozici mokrou vozovku a pak přijedou do míst, kde se na vozovce vytvořila ledovka z mrznoucího deště. Výškové rozdíly trasy přes 60 m nejsou žádnou výjimkou. To je výška odpovídající petřínské rozhledně nebo dvacetiposchoďovému mrakodrapu. I bez speciálních znalostí je zřejmé, že klimatické podmínky „dole“ mohou být výrazně odlišné než „nahore“.

Nejpomaleji se tvoří **náledí** kondenzací vodních par (mlhy) na chladnějším povrchu. Intenzita kondenzace vodních par při dané relativní vlhkosti závisí také na tepelné vodivosti a na měrné tepelné kapacitě materiálu, na němž voda kondenzuje (srovnej vznik ledového povlaku na parkujících vozidlech, zatímco na budovách i nevytápěných se ledový povlak ještě netvoří). V těchto souvislostech je možné, že náledí se může vytvořit na dlažbě, zatímco na ploše zpevněné jiným materiálem náledí není.

Ve vzduchu se může udržet jen takové množství vody, které odpovídá nasycení vodních par při dané teplotě a tlaku vzduchu. Pro vznik onoho záhadného mokrého náledí musí být tedy splněny tyto podmínky : konstrukce vozovky prochlazená pod teplotu mrznutí a k tomu buď mrhnutí (při relativní vlhkosti 100%) nebo vysoká relativní vlhkost vzduchu při teplotě klesající pod tzv. rosný bod, kdy přebytečná vlhkost kondenzuje na předmětech, jejichž teplota je nižší než rosný bod. Jde tedy o přesný labilní stav, který při daném váhovém množství vody ve vzduchu vytváří podmínky ke kondenzaci. S ubývající výškou přibývá atmosférický (barometrický) tlak o ca +1,2 hPa na každých –10 m výšky. Ke kondenzaci může tedy docházet při proudění vlhkého vzduchu podél svahu terénu. Proto také při výškových rozdílech terénu bývá náledí omezeno jen na poměrně nízký pás výšek. Pozoroval jsem tento jev vícekrát při ranních cestách v Praze se Strahova na Újezd (výškový rozdíl), kde náledí bývá na parkových cestách lokalizováno do pásu vysokého odhadem jen ca 20 m (jako sedmipatrový dům).

Vliv nadmořské výšky na teplotu prostředí a na průběh mrznutí (barometrický tlak) se uplatňuje v souvislosti s místním rozvrstvením atmosféry v daném čase.

Při proudění vzduchu podél mokré plochy dochází i při teplotách blízkých bodu mrznutí k zvýšenému odpařování (oproti bezvětrí) – při tom odnímáním skupenského tepla vody se povrch dále ochlazuje na teplotu nižší, než je

teplota proudícího vzduchu. Také tato okolnost může spolupůsobit na vzniku náledí.

Vznik malé oblasti se zledovatělým povrchem přichází v úvahu na železobetonových deskových a žebrových mostech. Mostovka zde prochladá i odspodu, zatímco vozovka ležící na terénu bývá teplejší.

Z uvedeného vyplývá, že náledí může být v určité širší oblasti lokalizováno místně i výškově na poměrně malé území, neboť k jeho vzniku jsou nutné určité přesné kombinace meteorologických podmínek (výška, tlak, teplota, rosný bod, směr větru, tvar území), a že výskyt kritického druhu (mokrého hladkého) náledí není naštěstí příliš častý. Vytvoření dostatečně „účinného“ náledí na vozovce kondenzací atmosférické vlhkosti je dobře možné za hodinu, z mrznoucího deště (mrholení) vzniká ledovka i dříve (už i za 10 min).

5.7.2 K adhezi pneumatik na ledě

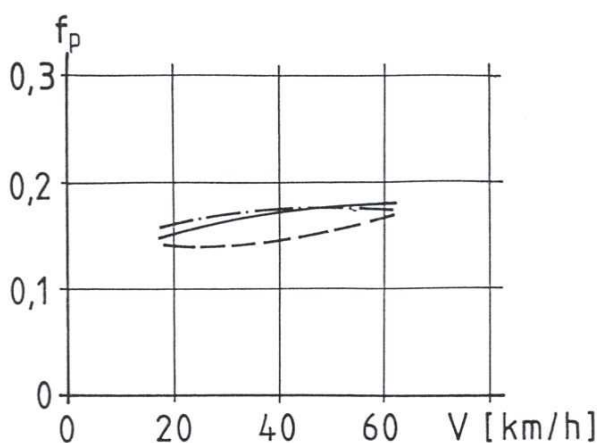
Nejnepříznivější – nejnižší – hodnoty součinitele adheze pneumatik v zimních podmínkách jsou na ledě s mokřým povrchem a to v hodnotách 0,05 až 0,12, spíše však při dolní uvedené mezi. Je-li povrch ledu suchý a teplota silně pod bodem mrazu, jsou hodnoty adheze pneumatik poněkud vyšší. Adheze pneumatik na ledě není ovlivněna typem a výškou figur dezénu pneumatik. Jsou-li hodnoty součinitele adheze na živičné vozovce za mokra (bez ledu) v rozsahu **například** (při určité rychlosti) cca 0,5 až 0,65, jsou tedy 10× až 13× vyšší než hodnoty na ledě. Přejezd z úseku vozovky mokré na zledovatělou tedy představuje v našem příkladě deseti– až třináctinásobný pokles adhezních (protismykových) vlastností pneumatik.

5.7.3 K možnostem rozpoznat náledí

Viditelnost náledí či ledovky bývá i za denního světla různá. Led z běžné relativně tvrdé vody je mírně mléčně zbarven, zatímco led z destilované vody je křišťálově čirý. Někdy bývá problematické rozpoznat plochy náledí i s pozice chodce při opatrné chůzi po parkové cestě. Při teplotách silně pod bodem mrazu, může být námraza pokryta jinovatkou. Na náledí, na němž voda kondenzuje, a které se tím tvoří a má přitom mokřý povrch, jinovatka není.

Neleží-li v době nehody na polích přilehlých k silnici sníh, pak řidičům ve vyhřátých kabinách nic nepřipomíná zimní podmínky. Pouhý pohled na vozovku nemusí být nijak alarmující. Náledí nebo ledovku je možno rozpoznat až podle reakce vozidel na brzdění a na řízení. Jde pak někdy o mimořádný stav, kdy řidiči nemají z technického hlediska k dispozici nic, z čeho by mohli usuzovat (předvídat) nesjízdnost silnice.

Ve všech případech rychle vzniklé ledovky, jimiž jsem se dosud zabýval v souvislosti s dopravními nehodami, šlo o náledí vytvořené **na části** delšího úseku silnice v podélném spádu, tedy překonávající větší výškový rozdíl terénu. Není to samozřejmě jediný možný způsob lokalizace náledí – to může vzniknout i v rozsáhlejší území, ale je to náledí, kterým jsou zaskočeni nejen řidiči, ale i pracovníci silničních správ.



Obrázek 6: Adheze na ledě se suchým povrchem (při teplotě -3°C)

5.7.4 Další zimní podmínky

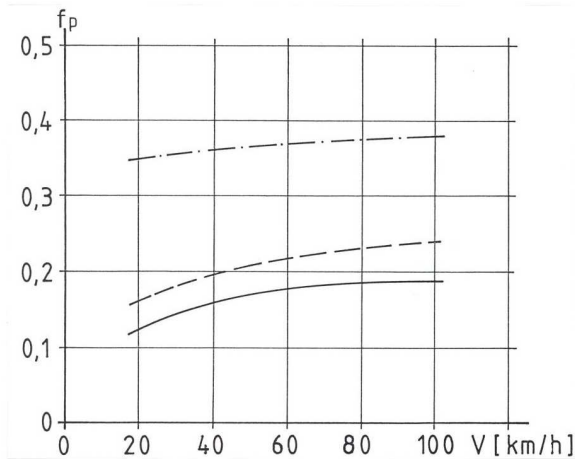
Adheze na sněhovém poprašku přirozeně závisí především na textuře povrchu vozovky, neliší významně od adheze za mokra, a proto zde nelze uvést žádný typický graf.

Druh sněhu ovlivňuje adhezi : kontrolní měření provedená ve dvou dnech za zdánlivě shodných podmínek vykazovala rozdílné hodnoty – viz čárkované křivky v obr.7b).

Adheze na rozbředlém sněhu je přechodným typem k adhezi za mokra – jako taková vykazuje pokles se vzrůstající rychlostí. Přitom některý letní dezén se může zvláštním způsobem zaplnit a vykazovat dokonce horší adhezi než pneumatika hladká (obr.7d)).

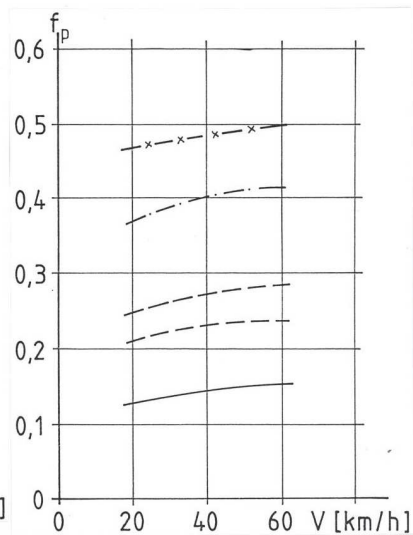
5.8 Adheze v bočním směru

Většina automobilových pneumatik poskytuje v bočním směru poněkud menší **adhezní možnosti** než ve směru podélném. Vyjadřuje se to známou adhezní elipsou (např.lit.[15]) a nahrazuje se přibližně adhezní kružnicí.



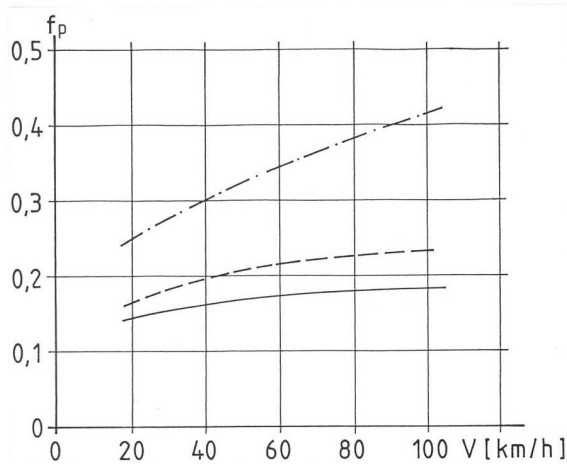
Obr. 7a)

Adheze na suchém prašanu ve vrstvě 1 až 2,5 cm



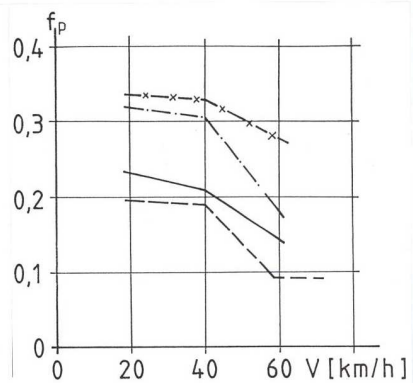
Obr. 7b)

Adheze na suchém prašanu ve vrstvě 7 až 12 cm



Obr. 7c)

Adheze na uježděném sněhu



Obr. 7d)

Adheze na rozbředlém sněhu

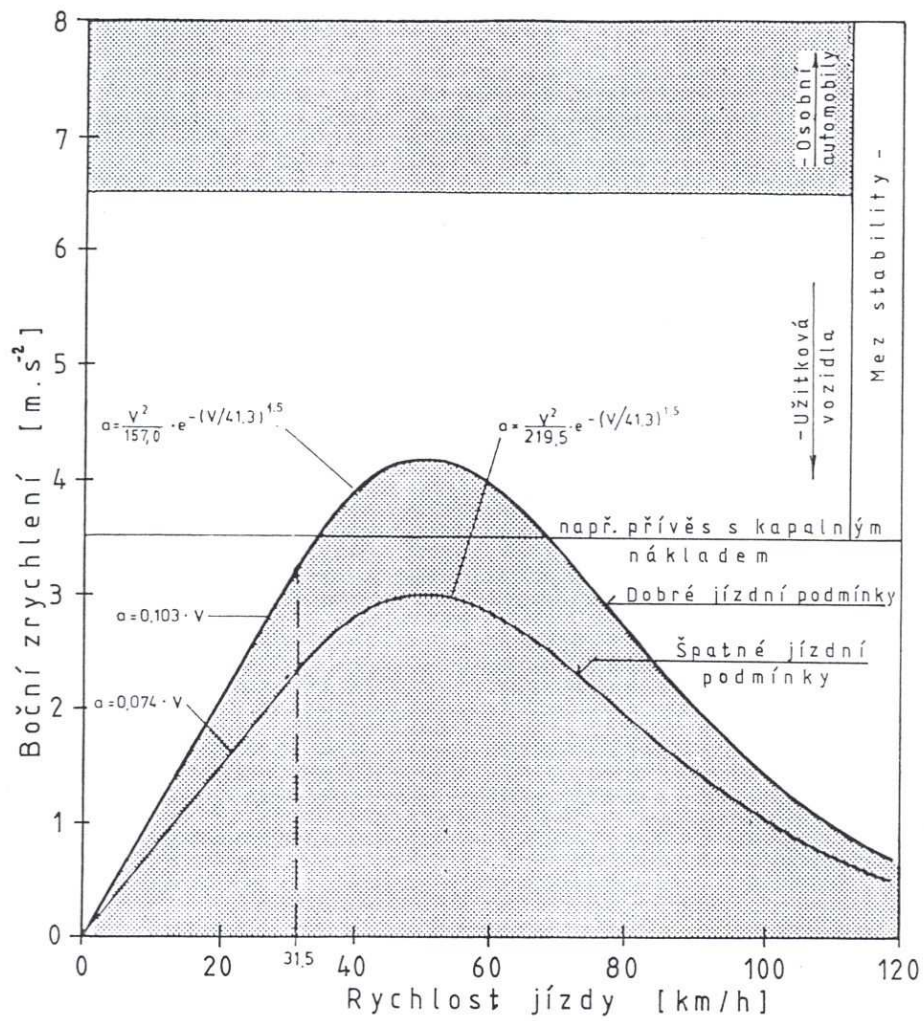
- x—x— pneumatika s dezénem zimním
- — — pneumatiky s dezény letními
- pneumatika bez dezénu (hladká)

Celkové **nároky na adhezi** pneumatik jsou dány vektorovým součtem nároků v podélném a v bočním směru. Při řešení vyhýbacího manévru potřebujeme znát nároky na adhezi pneumatik v bočním směru, abychom je mohli vektorově odečíst od celkových adhezních možností, a určit tak, kolik ještě zbývá pro eventuální využití ve směru podélném – tedy k brzdění. K tomu byly uveřejněny grafické podklady v lit.[1], na str.417 a 420 a v lit.[27] na str.49 a 50, (v těchto skriptech uvedeny jako obr.8 a 9) s podtitulem : „Využívání součinitele adheze pro jízdu obloukem při bezpečné jízdě“, a s komentářem „Obvyklé využívání součinitele adheze při jízdě obloukem lze informativně odečíst z obr.(zde obr.8); jedná se zde i o vlivy psychologické“. Ti, kteří grafy nesprávně aplikují, si zřejmě nepřečetli citovaný text pod grafem ani krátký komentář ke grafu. Graf pak aplikují jako mezní hodnoty adhezních možností pro ustálenou jízdu zatáčkou – a to „hlava–nehlava“ na suché či mokré vozovce, drsné či hladké a možná i na sněhu či náledí. To je ovšem **chybně**, a to hned ze dvou důvodů, jež vyplnou z dalšího výkladu o správné aplikaci.

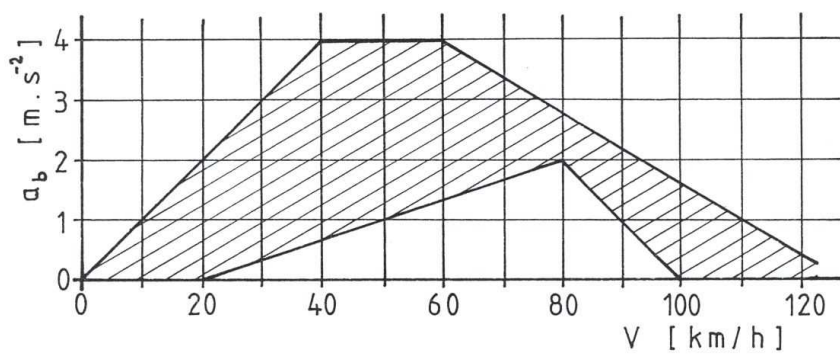
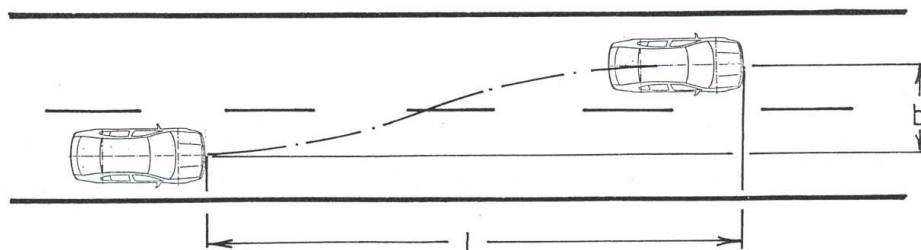
Obr.9 je v [1] na str.420 uveden s komentářem „Velikost příčného zrychlení, která je ještě využívána pro příčné přemisťování, byla měřena posluchači postgraduálního studia ÚSI a bylo zjištěno, že na suché vozovce nepřesahuje 4 m.s^{-2} . Hodnoty zveřejněné firmou Daimler–Benz jsou uvedeny v obr.17.21.“ (zde obr.9). Oba grafy (obr.8 a 9) jsou vzájemně obdobné : druhý je zjednodušenou aplikací (aproximací) prvního a má především vztah k vyhýbacímu manévru. Velikost využívané hodnoty bočního zrychlení **při vyhýbacím manévru** je dána dvěma okolnostmi :

1. Možnostmi, jež má řidič k dispozici pro dosažení určité hodnoty bočního zrychlení – to jest časem využitelným pro natáčení volantu do okamžiku, kdy je již nucen otáčet volantem na druhou stranu, neměli vozidlo opustit danou šířku vozovky. Zřejmě v této okolnosti tkví hlavní příčina strmého poklesu využívané hodnoty bočního zrychlení při rychlosti nad 60 km/h.
2. Subjektivním vjemem bočního zrychlení – hodnotou, kterou se řidič neodvažuje překročit (psychologické důvody). **Tato hodnota klesá se vzrůstající rychlostí** (lit.[30]).

Při jízdě po kruhové dráze působí zejména okolnost uvedená ad 2. Provedli jsme následující pokus : Elektronickým decelerografem SFIM jsme měřili boční zrychlení v automobilu T 613 při jízdě v kruhu po levotočivém oblouku na suché vodorovné drsné živičné ploše rychlostí asi 40 km/h. Automobil byl obsazen vpředu i vzadu jen na levých sedadlech kvůli zvýšení



Obrázek 8: Boční zrychlení dosahované při bezpečné jízdě po obloukové dráze



- b = boční přemístění [m]
 L = délka dráhy [m] potřebná na boční přemístění
 a_b = boční zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

Obrázek 9: Boční zrychlení využívané při jízdě po obloukové dráze

stability proti převrácení. Snažil jsem se co nejvíce zmenšit poloměr zatačení. Ale přes hodnotu $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ jsem se prostě neodvážil (viz důvody psychologické v komentáři ke grafu v obr.17.18). Stopy bočního smyku pochopitelně nevznikly, neboť adheze v bočním směru nebyla překonána, ke smyku nedošlo, nicméně jsem rozhodně neměl pocit bezpečné jízdy.

Grafy uvedené v lit.[1] a [27] tedy platí z důvodů ad 1. a 2. zejména pro vyhýbací manévry, kdy v nehodové situaci bývá nutno vyhnout se překážce na dané krátké délce dráhy (např. viditelnost v noci) a řidič prostě nestíhá dosáhnout až k limitu boční adheze – zejména při dvojitým oblouku. Doporučuji zvláštní opatrnost při úvaze o formulaci, že v nehodové situaci bylo možno dosáhnout větší boční zrychlení a že řidič tuto možnost nevyužil. Zkušební podmínky vyhýbacích manévru při testech automobilů či pneumatik, při nichž lze vyšší hodnoty bočního zrychlení dosáhnout, nebývají identické s podmínkami řidičů–amatérů konfrontovaných neočekávaně s překážkou.

Vyšší hodnoty bočního zrychlení dosahující v nehodové situaci až k limitu adheze pneumatik tedy přicházejí v úvahu při vyhýbacím manévru spíše výjimečně a to hlavně při vyhnutí jediným obloukem (s výjezdem mimo silnici). Takový stav pak bývá na vozovce zaznamenán stopami bočního usmykávání pneumatik – tzv. stopy driftové.

Pro více či méně ustálenou jízdu po kružnici (jízdu zatáčkou) lze tyto grafy chápat jen jako přibližné kritérium bezpečné jízdy normálního řidiče (ve smyslu pocitu, že jízda je bezpečná) ve shodě s podtitulem ke grafu v lit.[1] i [27] s uvážením okolností ad 2. Musí být ovšem současně splněna podmínka, že vozovka v daném místě a čase poskytuje příslušnou hodnotu součinitele adheze pneumatik, tedy že adhezní možnosti jsou větší, než adhezní nároky. Na hladké vozovce, jež je za mokra kluzká, není zaručena adheze pro dosažení limitních hodnot bočního zrychlení dle obr.8 a 9. Obdobně je tomu v zimních podmínkách.

V žádném případě **pořadnice grafů neudávají nejvýše dosažitelné hodnoty adhezních možností** mezi pneumatikou a vozovkou v bočním směru. Pořadnice grafů udávají, jak veliké hodnoty součinitele adheze jsou nutné pro boční zrychlení, jenž řidiči dosahují. **Nezaměňujme adhezní nároky za adhezní možnosti** – což někteří kolegové zřejmě při aplikaci grafů dělají.

„Dobré, resp.špatné podmínky“ vyjádřené dvěma křivkami v grafu na obr.8 nemají vztah k adhezi, ale právě k podmínkám ostatním : špatnými podmínkami může být nerovná vozovka, tma, nezkušenost řidiče atd. – to jsou podmínky, při nichž se řidič obvykle odvažuje jen nižších hodnot bočního zrychlení – a současně také nižší hodnoty zrychlení lze považovat za bezpečné pro daný případ.

Obr.8 byl v [1] a [27] prezentován se stupnicí pořadnic upravenou z hodnot bočního zrychlení a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] na hodnoty využití boční adheze μ [-]. Pro jistotu opakují, že jde o adhezní nároky, nikoli o adhezní možnosti. Praktický důvod této úpravy je jen v tom, že udává přímo **nároky** na adhezi pneumatik v bočním směru, abychom je mohli (při kruhové aproximaci vztahu mezi adhezí v podélném a v bočním směru) vektorově odečíst od celkových adhezních **možností**, a tak určit, kolik ještě zbývá adhezních **možností** pro eventuální využití ve směru podélném.

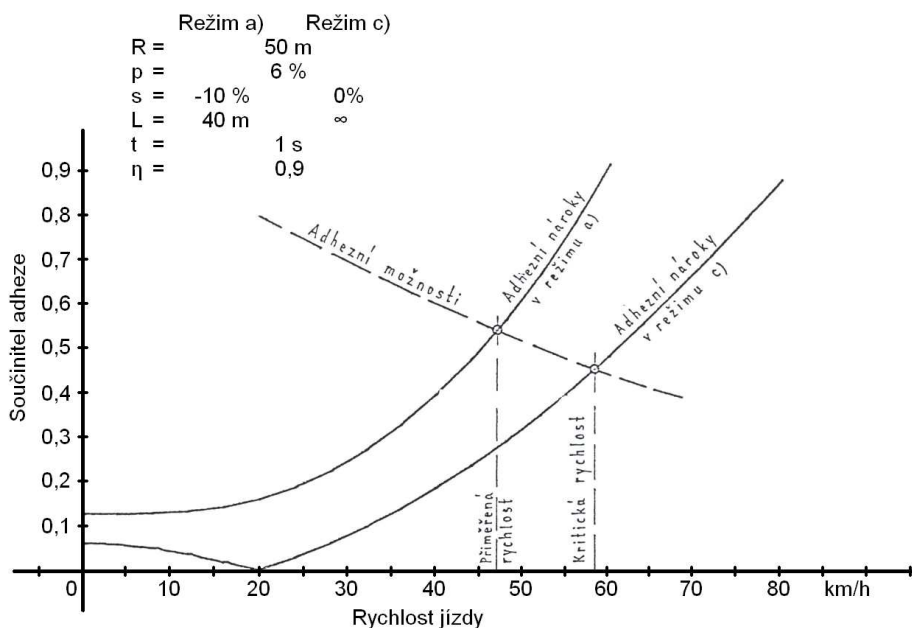
6 PŘIMĚŘENÁ A KRITICKÁ RYCHLOST

Přiměřenou a kritickou rychlost jízdy v příslušném místě silnice lze určit porovnáním adhezních nároků s adhezními možnostmi. Kritická rychlost je zde míněna taková, při jejímž překročení vzrostou adhezní nároky nebrzděného vozidla v zatáčce nad adhezní možnosti. Při stanovení přiměřené rychlosti se uvažuje navíc nutnost zastavení vozidla na dané délce rozhledu.

V řešení se uvažuje, že na vozidlo působí síly podélné (síly hnací či brzdné, síly dané odporem stoupání, odporem proti zrychlení či proti zpomalení, odporem valivým a odporem vzduchu), síly boční (síla odstředivá, síla bočního větru a boční složka tíhy vozidla) a síly kolmé k povrchu vozovky (kolmá složka tíhy vozidla, kolmá složka odstředivé síly, přitížení či odlehčení vozidla při průjezdu výškovým obloukem).

Podrobnosti a výpočtové vztahy jsou v lit.[20].

Výsledné adhezní nároky v porovnání s adhezními možnostmi lze s výhodou znázornit graficky v závislosti na rychlosti. V příkladu na obr.10 jsou pro přehlednost vyznačeny adhezní možnosti jedinou přerušovanou čarou. V konkrétním případě by se uvažovaly v příslušném rozsahu (pásu) – průsečíky čar potom reprezentují hledaná zaručená minima a eventuální (nezaručená) maxima přiměřené a kritické rychlosti. V režimu a) je zohledněn podélný spád komunikace s a délka rozhledu pro zastavení L – výsledkem je hodnota přiměřené rychlosti. V režimu c) je zohledněna jízda bez brzdění (podélný spád se bere nulový a délka rozhledu nekonečná) – výsledkem je hodnota kritické rychlosti.



Obrázek 10: Příklad porovnání vypočtených adhezních nároků s adhezními možnostmi – určení přiměřené a kritické rychlosti.

Reference

- [1] BRADÁČ A. a kol.: Příručka znalce analytika silničních nehod DT Ostrava 1985
- [2] KOVAŘÍK J.: Mechanika motorových vozidel. Skriptum VUT v Brně SNTL 1970
- [3] BURKART F. a kol.: Rekonstruktion von Verkehrsunfällen DAT 1979
- [4] INDRA H.: Spurenkatalog. TÜV 1973
- [5] ŠACHL J.: K výpočtům rychlostí ve znalecké praxi. In: Znalec 2/1991.
- [6] SCHULZE K.H.: Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenebenen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe. In: Forschungsbericht – Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 103–1970.
- [7] WEHNER B.: Einfluß der Straßenoberfläche auf die Verkehrssicherheit bei Nässe. In: Der Verkehrsunfall 12/1973

- [8] ŠACHL J.: Problematika měření protismykových kvalit povrchu vozovek. Kandidátská disertace 1974.
- [9] KALENDER U.: Wechselwirkung Reifen/Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluß bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 498. Bundesminister für Verkehr – 1987.
- [10] GNADLER R.: Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von Pkw-Reifen. In: Der Verkehrsunfall 11–12/1988 S. 297–310.
- [11] GNADLER R. a kol.: „Ermittlung von Š-schlupfkurven an PKW-Reifen“ FAT-Schriftenreihe Nr.119 vyd.1995 ISSN 0933–050X
- [12] DAMES J., SULTEN P.: Optimierung der Oberfläche von Betonfahrbahnen hinsichtlich Griffigkeit und Rollgeräusch. In: Straße und Autobahn 2/1989
- [13] GRANDEL J.: Bremsversuche zur Untersuchung der Bremsverzögerung und Erkennbarkeit von Bremspuren bei einem Fahrzeug mit Automatischem Blockierverhinderer. In : Der Verkehrsunfall 12/1989 a 1/1990.
- [14] ENGELS K.: Die Bedeutung des Spurenzeichungsverhaltens von Pkw mit ABV für die Unfallrekonstruktion. In : Der Verkehrsunfall 2/1990 S.45–48.
- [15] Straßengriffigkeit und Verkehssicherheit bei Nässe. Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Berlin 1970.
- [16] BURG H., RAU H.: Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion 1981
- [17] DANNER M., HALM J.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen. Eurotax 1994
- [18] FUCIK R.,HARTL F.,SCHLOSSER H.,WIELKE B.: Handbuch des Verkehrsunfalls. 2.Teil Wien 1998
- [19] GRANDEL J., ZOMOTOR A.: Fahrzeugverhalten und Spurzeichnung beim Bremsen mit ABS und unfallbedingtem plötzlichem Reifenluftdruckverlust. In: ATZ 11[1985].
- [20] ŠACHL J.: Komentář k možnostem aplikace vybraných programů. Sborník konference „Využití výpočetní techniky při analýze silničních nehod“ DT Ostrava 1986 S.46 až 55.

- [21] KOVAŘÍK J.: Několik připomínek k chování vozidla při jízdě po „mokrém“ vozovce. In: Soudní inženýrství 2/1993 S.13 a 14.
- [22] IKRINSKI A.: Jazdime bezpečne II. Alfa 1979.
- [23] SCHILLING H.: Das Aquaplaning–Verhalten von Winterreifen verschiedener Profiltiefe. In: Automobiltechnische Zeitschrift 10/1977 S.431–435.
- [24] KRÜGER R., NEBE S., TREICHEL D.: Über den Einfluß des Reifen–Luftdruckes auf Fahreigenschaften. In: ATZ 3/1978 S.97–104.
- [25] DAMES J., LANGE H.: Griffigkeitsmessungen auf Deckenoberflächen bei hohen Geschwindigkeiten. In: Strasse und Autobahn 8/1969 S.271–279.
- [26] HÖCKER H.J.: Nasse Fahrbahnoberflächen – Definition und Einflußfaktoren. In: Straße und Autobahn 10/1971 S.452–458.
- [27] Znalecký standard č.III – „Technická analýza střetu vozidla s chodcem“ a č.IV – „Technická analýza nárazu vozidla na překážku“. Ministerstvo spravedlnosti ČR 1991.
- [28] GRANDEL J.: Untersuchung des Einflusses von Benzin auf die Griffigkeit einer Asphaltbeton–Fahrbahn. In: Der Verkehrsunfall 11/1981 S.215–220.
- [29] SCHIMMELPFENNIG K.H., HEBING N.: Der Bremsvorgang auf nasser Fahrbahn, Hyperbelansatz. In: Der Verkehrsunfall 3/1985 S.64–66
- [30] SCHIMMELPFENNIG K.H., NACKERHORST U: Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion – Sicherheitssgrenze des Normalfahrers. In: Der Verkehrsunfall 4/1985 S.94–96
- [31] ČSN 30 0034 Směrová dynamika vozidel–definice základních pojmů
- [32] ČSN 30 0035 Brzdění motorových a přípojných vozidel–názvosloví
- [33] ČSN 30 0040 Srážky automobilů–názvosloví
- [34] ČSN 73 6177 Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek.
- [35] HRUBEC F.: Aquaplaning. In : Znalectvo 3/1997 S.17–23