

Napětí a přetvoření ve vozovce při přejezdech vozidel

Při navrhování vozovek je zapotřebí převést informace o dopravním zatížení do parametrů, které se použijí při vlastním výpočtu návrhovou metodou. Přejezdem těžkých nákladních vozidel vzniká ve vozovce poměrně složitý stav napjatosti. Přetvoření ve vrstvách vozovky závisí na řadě faktorů. Proto není snadné správně vystihnout vliv přejezdu vozidel při posouzení vozovky na únavu. Velmi užitečné informace poskytují experimenty a měření na únavových dráhách za kontrolovaných podmínek.

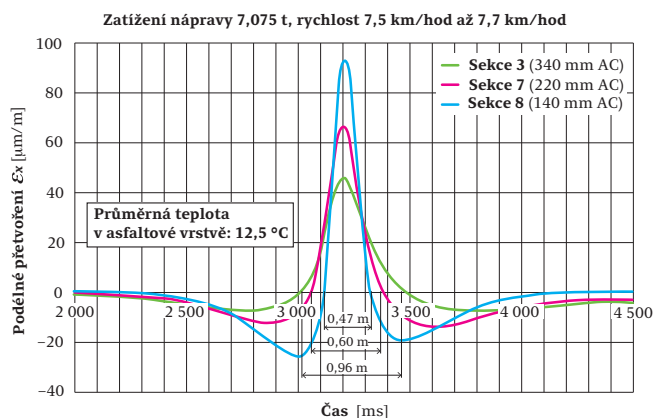
Při navrhování vozovek se pro vystižení dopravního zatížení používají různé postupy. Je snahou, aby výpočetní model odpovídal výsledkům měření napětí a deformací ve vrstvách vozovky. Nejlépe se to zjistí při experimentech na únavových dráhách, při kterých je jednoznačně zafixována poloha snímačů vůči podélné ose zatěžované plochy. Při měření na hotových vozovkách dochází v příčném směru ke fluktuaci stop od jednotlivých vozidel. To může výrazně ovlivnit naměřené hodnoty deformací. Dílčí informace o výsledcích měření na únavových dráhách v Nantes ve Francii byly nedávno popsány v [1]. V tomto textu uvádíme také výsledky měření v Německu a celkové shrnutí problematiky.

Velmi instruktivní výsledky byly získány při experimentech ve zkušební hale německého výzkumného institutu BAST, uvedené v [2], a na kruhové dráze ve francouzském Nantes vyhodnocené v [3]. Ve zprávě [2] jsou popsány výsledky měření podélných přetvoření na spodním lici asfaltových vrstev při přejezdu různých druhů těžkých nákladních vozidel. V [3] jsou uvedeny také výsledky příčných přetvoření. Při zkouškách v [2] byl sledován i vliv rychlosti pojezdu na přetvoření vozovky a vliv teploty. Dále vliv tloušťky asfaltových vrstev. Další informace z literatury o výsledcích měření přetvoření při přejezdu vozidel (například na americké zkušební dráze NCAT) i analýzy chování asfaltových směsí a vozovek byly uvedeny v [4].

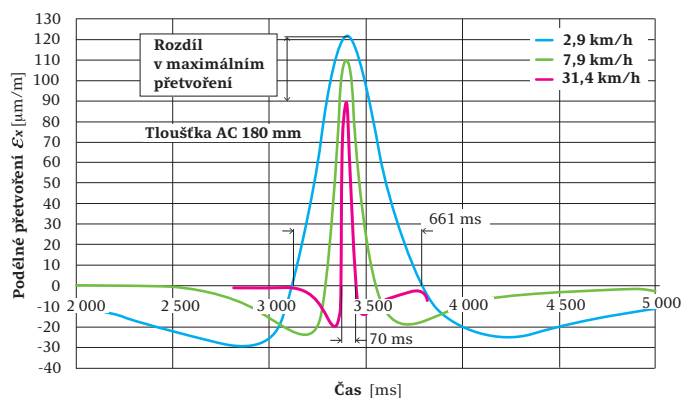
Při pohybu vozidla je situace jiná než při statickém zatížení. Obrázek 1 zobrazuje přetvoření na spodu asfaltové vrstvy při přejezdu přední nápravy tahače s přívěsem. (Protažení jsou na obrázku vynesena nahoře, stlačení dole.) Když se vozidlo přibližuje, začne na spodu asfaltových vrstev působit tlak. Vodorovné stlačení v místě snímače se změní v protažení, když je vozidlo v blízkosti snímače. Když je samostatná náprava přímo nad místem snímače, dojde k maximálnímu protažení. Po přejezdu nápravy dojde k odlehčení vozovky a novému vzniku stlačení v místě snímače. Toto stlačení postupně vymizí, když se vozidlo vzdaluje.

Celková tloušťka konstrukce byla ve sledovaných sekcích stejná. Měnila se jen tloušťka asfaltových vrstev. Snížení tloušťky asfaltových vrstev bylo vyrovnáno zvýšením tloušťky nestmelených vrstev. Při větší tloušťce asfaltových vrstev je nejen menší protažení, ale je i širší oblast, ve které působí tah. Při malé tloušťce asfaltové vrstvy je dobře patrné to, že při odlehčení po přejezdu vozidla je stlačení menší, než když se vozidlo blížilo. Toto stlačení pak plynule klesá ke stavu před přejezdem nápravy. Ilustruje to, že asfaltová směs se nechová jako lineárně pružný materiál. Skutečné chování je viskoelastické.

Vliv rychlosti přejezdu při tloušťce asfaltových vrstev 180 mm je na obrázku 2. Zřetelně vzrůstá maximální protažení na spodu asfaltových vrstev.



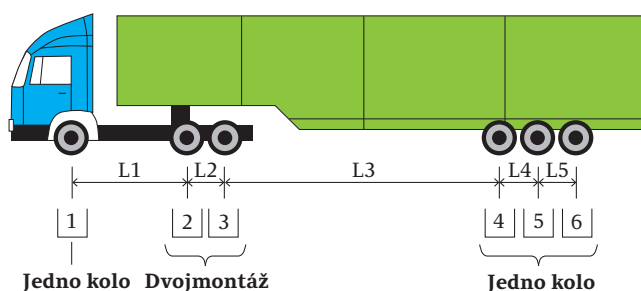
Obrázek 1: Přetvoření na spodu asfaltové vrstvy od přejezdu jedné nápravy (Podle 2)



Obrázek 2: Vliv rychlosti přejezdu na přetvoření na spodu asfaltové vrstvy (Podle 2)

Při nižší rychlosti dochází také k rozšíření zóny působení tahových napětí a pomalejšímu doznívání stlačení po přejezdu vozidla. Při poklesu rychlosti z 31,4 km/hod na 2,9 km/hod vzrostlo maximální protažení z 90 $\mu\text{m}/\text{m}$ na 120 $\mu\text{m}/\text{m}$. Při návrhu vozovky dle TP 170 závisí počet zatížení návrhovou nápravou do porušení asfaltových vrstev vozovky na páte mocnině přetvoření na spodním líci asfaltových vrstev. Proto by byl počet cyklů do porušení při velmi malé rychlosti pohybu 4,2krát menší než při vyšší rychlosti. (V TP 170 se zjednodušeně uvažuje, že při zastavování vozidel a rychlosti nižší než 50 km/h je součinitel C_q , vyjadřující vliv rychlosti pohybu, $C_q = 2,0$. Tím se při výpočtu celkový počet návrhových náprav N_{cd} zvýší na dvojnásobek proti normálnímu provozu.)

U dvojnápravy a trojnápravy je situace složitější než u samostatné nápravy. Dochází ke spolupůsobení zatížení a účinky od jednotlivých náprav se sčítají. Uspořádání náprav a rozdělení tlaků na nápravy u jedné z několika různých zatěžovacích souprav použitých při experimentech v BAST je na obrázku 3. Tento obrázek není v práci [2] uveden. Byl prezentován (v rámci informací o výzkumu v BAST), v australské disertační práci věnované účinkům různých zatěžovacích sestav na vozovky [5].



Na obrázku 4 jsou průběhy přetvoření při přejezdu tahače s 2 nápravami s návěsem s trojnápravou při vyšší teplotě (16,7 °C) a pomalé rychlosti (2,7 km/hod) pro 2 tloušťky asfaltové vrstvy.

U trojnápravy je největší podélné protažení na spodu asfaltové vrstvy v místě snímače při přejezdu první ze tří náprav. Při přejezdu dalších náprav je protažení v místě snímače menší, protože ho snižuje doznívání stlačení po přejezdu první nápravy. K největšímu stlačení na spodním líci asfaltové vrstvy v místě snímače dochází mezi přejezdem druhé a třetí nápravy. Při velké tloušťce asfaltových vrstev (modrá křivka) jsou přetvoření menší, ale vliv trojnápravy se na podélném přetvoření projevuje obdobně. Největší odchylky proti statickému zatížení lineárně pružného poloprostoru jsou u malé tloušťky asfaltových vrstev, kdy jsou přetvoření velká.

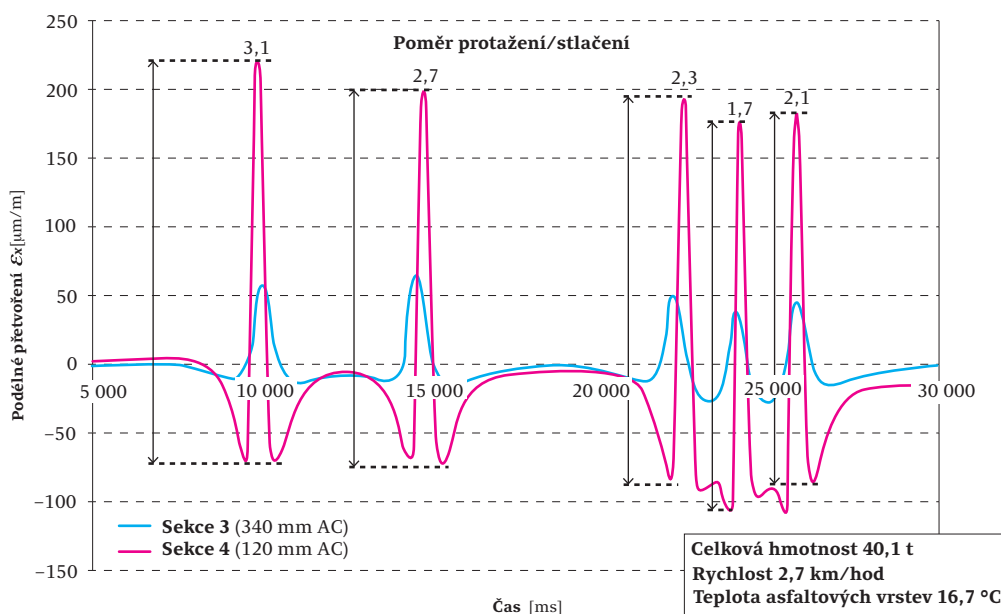
Obdobný průběh přetvoření byl pro těžké nákladní vozidlo s dvojnápravou. Ten je také v článku [2] prezentován.

Také při experimentech na únavové dráze v Nantes [3] byl zjišťován účinek trojnápravy a dvojnápravy. Dvojnápravy byly dva druhy. Jeden druh měl samostatné kolo a byl zatížen silou 2 x 42,5 kN. Druhá dvojnáprava měla dvojmontáž a byla zatížena

Vzdálenost mezi nápravami [m]				
L1	L2	L3	L4	L5
3,30	1,35	5,70	1,31	1,31

Zatížení nápravy [t]					
1	2	3	4	5	6
5,725	7,475	7,375	6,500	6,475	6,575

Obrázek 3: Rozdělení tlaků na nápravy u tahače s 3 nápravami a návěsem s trojnápravou v BAST (Podle 5)



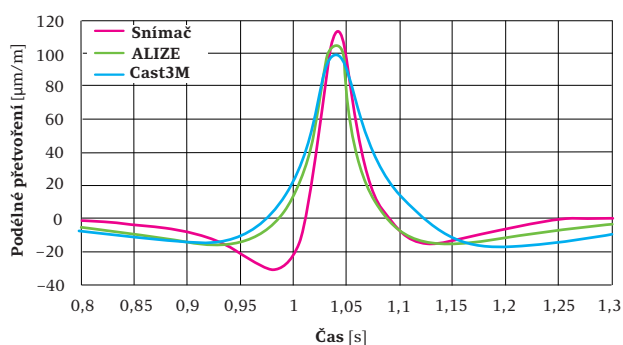
Obrázek 4: Přetvoření od tahače s 2 nápravami a s trojnápravou na návěsu pro dvě tloušťky AC (Podle 2)

silou 2 x 52,5 kN. Trojnáprava měla jednoduchá kola a zatížení 3 x 42,5 kN. Vzdálenost mezi osami náprav (rozvor) byla 1,38 m, tedy jen mírně větší než u experimentů v BAST.

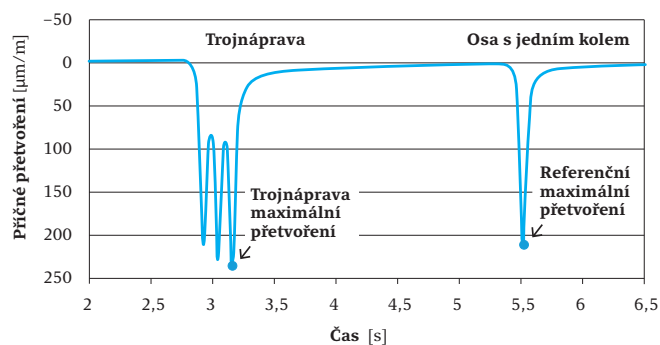
U trojnápravy byl průběh podélných přetvoření podobný na dvou vozovkách s tloušťkou asfaltových vrstev 160 mm a 260 mm. To je znázorněno na obrázku 5. (Na něm jsou protažení vynesena dole a stlačení nahoře.) Protažení pod střední nápravou jsou nejmenší. Při teplotě 20 °C a rychlosti 42 km/hod vznikl u obou vozovek mezi koly tlak.

Příčná přetvoření mají obecně jiný průběh než přetvoření podélná. To je ilustrováno na obrázku 6. Podélná přetvoření po přejezdu samostatné nápravy s dvojmontáží jsou v levé části obrázku a příčná přetvoření v pravé části. Měření přetvoření snímačem na zkušební dráze v Nantes bylo v [6] porovnáno s výpočtem programem Alize a s dvěma programy modelujícími viskoelastické chování. Na obrázku 6 je pro přehlednost znázorněno pouze přetvoření vypočtené programem Alize a Cast3M. I při výpočtu programem Alize je tvar křivek podélného a příčného přetvoření odlišný. V příčném směru působí prakticky jen protažení. Ze záznamu snímače je vidět, že doba, po kterou působí tah, je v příčném směru cca 3x delší než v podélném směru. Přesto je podélné protažení větší. Je to proto, že v podélném směru se účinky obou kol dvojmontáže sčítají, kdežto v příčném působí proti sobě. Součet účinků obou kol proto převládne nad vlivem delší doby působení tahového napětí v příčném směru.

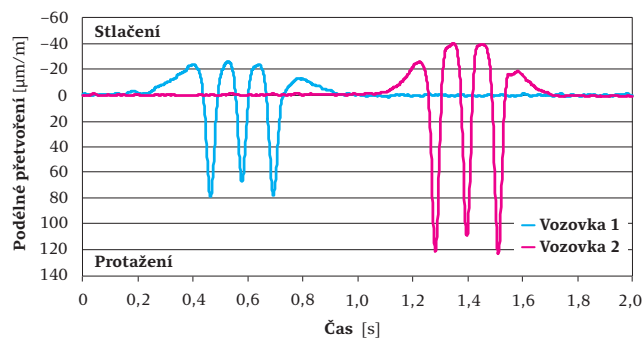
Při přejezdu trojnápravy s jedním kolem na nápravě se však již uplatní v příčném směru spolupůsobení tří kol a příčná přetvoření se stanou větší než podélná. Zejména proto, že při



Obrázek 6: Průběh podélných a příčných přetvoření při přejezdu samostatné nápravy s dvojmontáží (Podle 6)



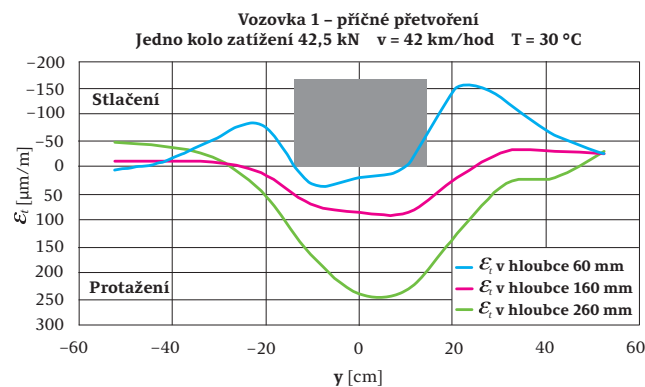
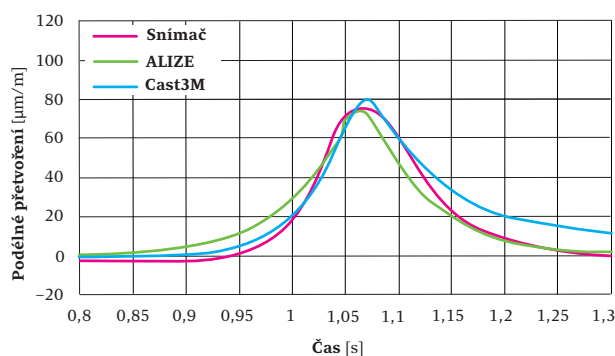
Obrázek 7: Příčné přetvoření při průjezdu trojnápravy pro dvě tloušťky asfaltových vrstev (Podle 3)



Obrázek 5: Podélné přetvoření při průjezdu trojnápravy pro dvě tloušťky asfaltových vrstev (Podle 3)

dlouhé době zatížení způsobí viskózní chování nárůst přetvoření. Proto je největší protažení až při průjezdu třetí nápravy. To je vidět na obrázku 7. (Teplota asfaltových vrstev vozovky byla 18 °C.). Maximální protažení pod třetí nápravou u trojnápravy bylo o 14 % větší než u samostatné nápravy. (Tento obrázek byl již prezentován v [1]. Pro usnadnění srovnání účinků různých druhů vozidel je zde tento obrázek uveden znovu.)

Na kruhové zkušební dráze v Nantes je možné měnit délku ramene, na kterém jsou upevněna kola zatěžovací sestavy. Je tedy možné zatěžovat vozovku tak, že kolo působí i mimo snímač přetvoření, který je umístěn v podélné ose testované vozovky. Příčná vzdálenost od zatěžovacího systému k místu snímače má velký vliv na naměřená přetvoření. To je doloženo na obrázku 8 pro vozovku s tloušťkou asfaltových vrstev 260 mm při teplotě ovzduší 30 °C. Při fluktuaci stopy 15 cm, což se může



Obrázek 8: Vliv laterální polohy kola vůči snímači na maximální příčné přetvoření při T = 30 °C (Podle 3)

na dálničních vozovkách někdy vyskytnout, se snížilo protažení z cca 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ na cca 200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

To by za jinak stejných podmínek vedlo při výpočtu dle TP 170 na zvýšení počtu cyklů do porušení cca 3krát. V české metodě je vliv fluktuace stop vyjádřen koeficientem C_2 . Ve Francii je tento vliv již zohledněn v korekčním koeficientu k_c , který zahrnuje i vliv přestávek mezi zatíženími. Při navrhování vozovek skladovacích ploch metodou popsanou v [7] se však vliv fluktuace stop uvažuje ve výpočtu samostatně. Na těchto plochách se vozidla pohybují pomalou rychlostí, takže přetvoření na spodním líci asfaltových vrstev jsou velká. Proto má velký vliv na výsledek výpočtů i uvažovaná fluktuace stop vozidel.

V americké návrhové metodě „AASHTOWare Pavement ME Design“ se uvažuje 5 různých poloh vozidla ve vozovce v příčném směru a každé poloze se přiřadí 20 % celkového dopravního zatížení. Pro každou polohu se vypočítá relativní porušení vozovky a ta se pak sečtou. Výpočet se tím ovšem prodlužuje. Nedávno byl navržen v USA přesnější způsob výpočtu vlivu fluktuace stop v příčném směru [8]. Obvykle však nemá projektant k dispozici podrobnější informace, které by opravňovaly použití složitějších výpočtových metod.

Závěr

Z výsledků experimentů na únavových dráhách je možné vyjít při úvahách, jak zohlednit vliv dvojnápravy a trojnápravy při stanovení celkového dopravního zatížení.

Při volbě způsobu zohlednění dvojnápravy a trojnápravy v návrhové metodě by bylo možné provést programem Alize obdobné výpočty, jako byly provedeny v článku [9], které byly stručně popsány v [1]. Vzhledem k přibližnosti výpočtů s použitím teorie lineárně pružného vrstevnatého poloprostoru by případně bylo možné tyto výpočty neprovádět a využít přímo výsledky z rozsáhlých experimentů na únavových dráhách popsaných v zahraniční literatuře.

V současnosti existuje v zahraničí několik programů, které uvažují viskoelastické vlastnosti asfaltových směsí. Těmi je možné přesněji modelovat působení zatížení od těžkých nákladních

vozidel na vrstvy vozovky. Pro praxi jsou programy příliš složité, ale výsledky srovnávacích výpočtů těmito programy umožňují si vytvořit lepší představu o vlivu různých parametrů na výsledek. Například vliv rychlosti přejezdu trojnápravy na podélné a příčné přetvoření na spodním líci asfaltových vrstev vozovky.

Ing. Jiří Fiedler

Literatura:

- [1] Fiedler J. Zohlednění dopravního zatížení v některých zahraničních metodách navrhování vozovek, *SILNICE MOSTY 2020*, č. 3, str. 20–23.
- [2] Mollenhauer K., Wistuba, Rabe R. *Loading Frequency and Fatigue: In situ conditions & Impact on Test Results, 2nd Workshop on Four Point Bending, 2009.*
- [3] Kerzreho J. P., Hornych P., Chabot A, et al. *Evaluation of the Aggressiveness of Different Multi-axle Loads using APT Tests. 4th International Conference on Accelerated Pavement Testing 2012.*
- [4] Říkovský V., Fiedler J. *Spracovanie podrobnej analýzy základných ustanovení pre navrhovanie vozoviek. Rozborová úloha, 2015. www.ssc.sk*
- [5] Moffatt M. *The Influence of Multiple-axle Group Loads on Flexible Pavement Design Austroads Project No. TT1614, Austroads Publication No. AP-R486-15, May 2015.*
- [6] Zoa Ambassa, *Vers la modelisation du comportement a la fatigue des chaussées bitumineuses routiers sous chargement réel. These 2013.*
- [7] Balay J.M., et al. *Dimensionnement des platesformes logistiques selon la démarche rationnelle routière, RGRA 2013, vol. 916.*
- [8] Gungor O. E., Al-Qadi I. *Wander 2D: a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks, International Journal of Pavement Engineering. Published online Mar 2020. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1735636>*
- [9] Kauffmann H. *Dimensionnement des structures de chaussées, Actualisation de la methode d'évaluation du CAM, RGRA 2019, vol. 967, pp. 42–47.*