

Prevence mrazových trhlin ve vozovkách z asfaltových směsí

(Podklad při tvorbě nové evropské normy pro zkoušení asfaltových směsí – EN 12697-44)

(Michael P. Wistuba, *Straße und Verkehr*, č. 10/2006, str. 20 – 23)

Mrazové trhliny patří k rozhodujícím druhům poškození krytů vozovek z asfaltových směsí. Nejčastější příčinou je vysoké dopravní zatížení při chladnějším počasí. Pomocí numerické modelace (simulace) a experimentálních metod je možné simulovat situace extrémního zatížení podobné realitě. Simulace umožňuje posouzení odolnosti proti vzniku mrazových trhlin asfaltové směsi a systematickou optimalizaci struktury asfaltového krytu.

Asfaltová směs v důsledku svých elasticko viskózních materiálových vlastností vykazuje při vysokých teplotách nízkou a při chladu vysokou viskozitu. Pokud poklesne teplota, zvyšuje se elasticita a tuhost, zatímco současně klesá relaxační schopnost, což znamená, že napětí se sníží vnitřním prouděním. Tím, že je zabráněno termickému srážení, vznikají při ochlazování tzv. kryogenní tahová napětí, která jsou při extrémním počasí tak velká, že překročí pevnost v tahu asfaltové směsi a vedou k tvorbě trhlin v blízkosti povrchu. Trhliny pozvolna postupují dolů a snižují erozivním působením vnikající vody životnost konstrukce vozovky.

Obzvláště kritické je rychlé ochlazení při nízké teplotě. Mrazové trhliny se tvoří kvůli napětí ve vozovce v podélném směru převážně napříč ke směru jízdy. Zkušenosti ovšem ukazují, že v kombinaci s vysokým dopravním zatížením vznikají trhliny také ve směru jízdy, jak v jízděm pruhu, tak i mimo něj. Tyto podélné trhliny jsou zapříčiněny překrýváním kryogenních tahových napětí a tahových napětí podmíněných dopravním zatížením, které na horní straně obrusné vrstvy vozovky dosahují maximálních hodnot. To je následovně ukázáno na numerické simulaci situace extrémního zatížení na konkrétní konstrukci vozovky.

Numerická modelace

Pomocí numerického modelu se podařilo simulovat extrémní zatížení asfaltové vozovky, které může vést ke vzniku mrazových trhlin. Byly vypočítány napětí a deformace v konstrukci vozovky v závislosti na teplotně proměnlivých materiálových parametrech podobných realitě a byly lokalizovány vrcholy napětí. Pro následující numerickou analýzu napětí byla simulována konstrukce vozovky na obrázku 1. Zobrazený model struktury konstrukce vozovky byl analogicky k reálné situaci dvakrát zatížen, termickým zatížením (i) v důsledku ochlazení po delší časový úsek (v modelu variabilně 1 hodina až 10 hodin) a nahodilým dopravním zatížením (ii) (v modelu osové zatížení 100 kN, 115 kN, příp. 140 kN).

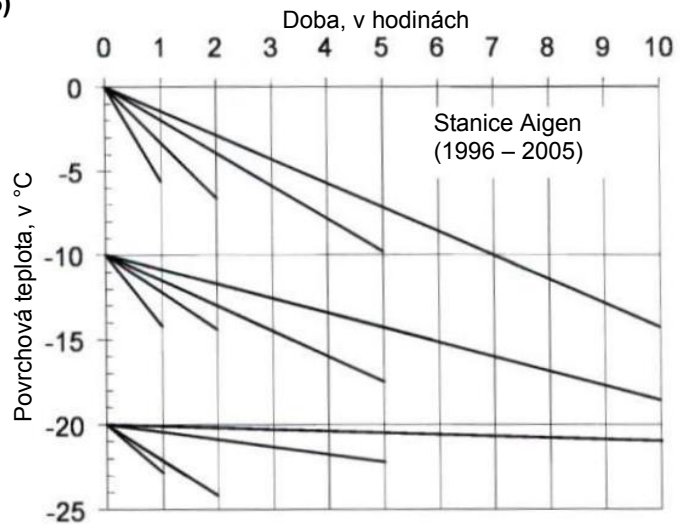


Obrázek 1 – Model struktury zvolené konstrukce vozovky

K modelaci termického zatížení mohou být vyhodnoceny hodnoty ochlazení vzduchu pro teplotní poměry pod 0 °C z dat dlouhodobého pozorování v meteorologických stanicích (příklad klimatických podmínek v Rakousku viz obrázek 2).

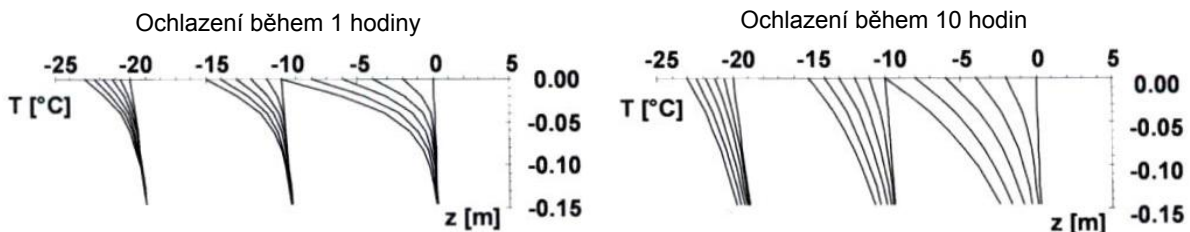
Meteorologická stanice Aigen im Ennstal
Minimální hodnoty ochlazení (1996 – 2005)

v °C za	rozsah teplot
	$-10 < T_{\text{vzduch}} < 0$
1 hodinu	-5.6
2 hodiny	-6.6
5 hodin	-10.0
10 hodin	-14.0
	$-20 < T_{\text{vzduch}} < -10$
1 hodinu	-14,2
2 hodiny	-14,4
5 hodin	-17,5
10 hodin	-18,7
	$-30 < T_{\text{vzduch}} < -20$
1 hodinu	-22,8
2 hodiny	-24,2
5 hodin	-22,0
10 hodin	-21,2



Obrázek 2 – Extrémní hodnoty ochlazení v Rakousku naměřené v meteorologické stanici Aigen im Ennstal (640 m)

Z hodnot ochlazení vzduchu lze pomocí rovnice energetické bilance nejprve vypočítat teplotní charakteristiky na povrchu vozovky a dále pomocí Fourierovy rovnice vedení tepla a se zohledněním termických vlastností stavebních materiálů i rozložení teploty v konstrukci vozovky (viz [1], [2]). Přitom je teplota země v hloubce 2 m považována za konstantní (rozdílení mezi zimou a počátkem jara podle [1]). Výsledkem termické simulace jsou teplotní profily v konstrukci vozovky v rozdílných časových intervalech, na obrázku 3 je příklad pro zvolenou konstrukci při ochlazení z 0 °C na -10 °C, z -10 °C na -15 °C a z -20 °C na -23 °C během 1 hodiny (a) a během 10 hodin (b).



Obrázek 3 – Rozložení teploty v hloubce z v důsledku ochlazení povrchu vozovky

Pozvolný vývoj kryogenního tahového napětí při ochlazování je v modelu zohledněno teplotní závislostí materiálových parametrů asfaltových vrstev. Pomocí exponenciálního modelu (Power-Law model PML) je možné chování asfaltové směsi při hlubokých teplotách v závislosti na teplotním profilu v příslušném okamžiku dostatečně přesně popsat [2], [3]. Funkce exponenciálního modelu zní:

$$J J(t) = 1/E_0 + J_a (t/\tau)^k$$

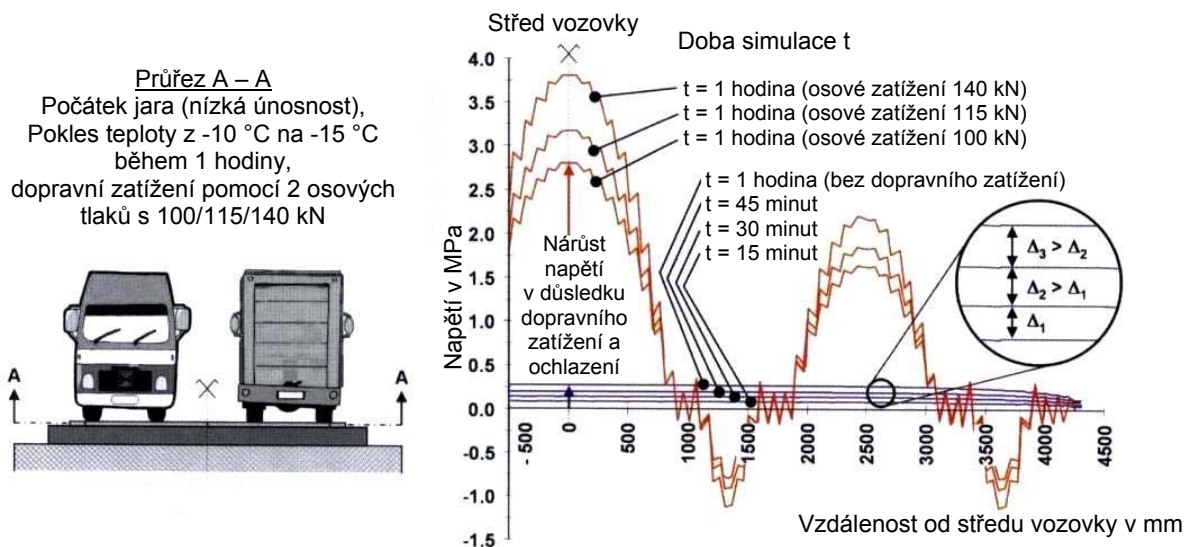
kde E_0 [MPa] je elastický modul asfaltové směsi pro nízké teploty a vysoké frekvence;
 k konstanta;
 J_a [1/MPa] ohebnost při tečení J , při době zatížení $t = \tau$;
 τ [s] teplotní závislost na poklesu teploty.

Veškeré modelové parametry je možné odvodit z materiálových zkoušek na zkušebních tělesech z asfaltových směsí: dynamické zkoušky tuhosti při rozdílných frekvencích a teplotách slouží k popsání krátkodobého chování asfaltové směsi, statická křivka tečení při konstantním zatížení při různých teplotách se vztahuje na charakterizaci dlouhodobého chování [3].

Materiálové chování nestmelených vrstev je modelováno čistě elasticky. Jejich nosnosti jsou považovány za konstantní, přičemž v modelu jsou rozlišeny dvě situace: scénář na počátku jara s menší nosností a zimní scénář s vyšší nosností (E-modul podle [4]).

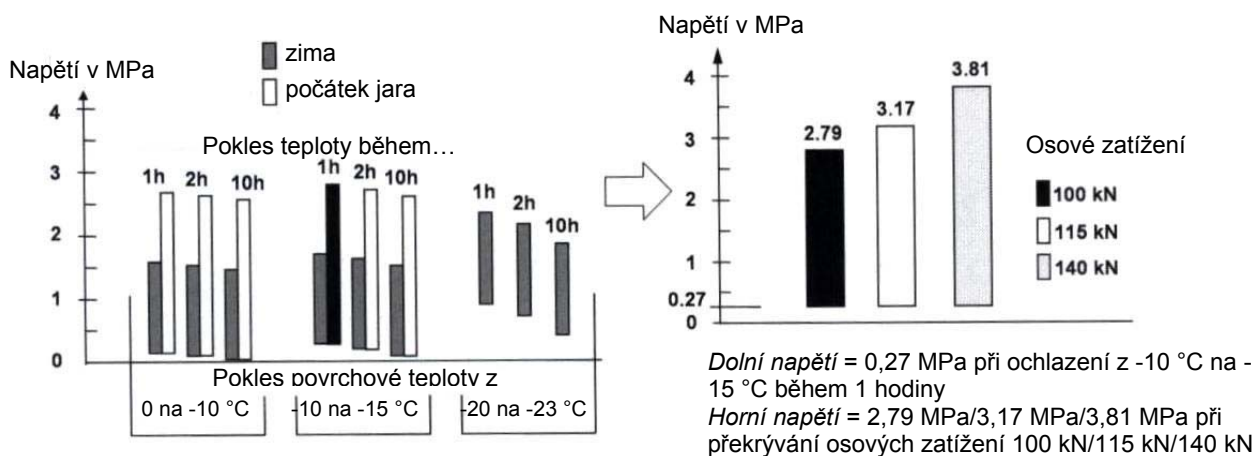
Termomechanická analýza napětí

Výpočet napětí a deformací v konstrukci vozovky, pro které je v této studii použit program analýzy konečných prvků FEAP (Finite element analysis program) [5], následuje ve dvou krocích. Nejprve je simulována pozvolná tvorba kryogenních napětí v důsledku proměnných teplotních profilů a teplotně závislých reakcí materiálu. Na konci doby ochlazení je model spontánně zatěžován dopravním zatížením. Výsledkem jsou výsledná celková napětí a celkové deformace v jednom bodě konstrukce. Na obrázku 4 je znázorněn vodorovný průřez těsně pod povrchem vozovky s rozdělením tahového napětí, které je pro analýzu mrazových trhlin rozhodující. Obrázek ukazuje časově závislý nárůst kryogenních napětí, překrývající se napětí z dopravního zatížení a místa vrcholů napětí, které se nacházejí tam, kde jsou také v praxi mrazové trhliny v podélném směru nejčastěji pozorovány: mezi jízdními pruhy a středem vozovky.



Obrázek 4 – Numerická analýza ukazuje vrcholy napětí mezi jízdním pruhem a středem vozovky

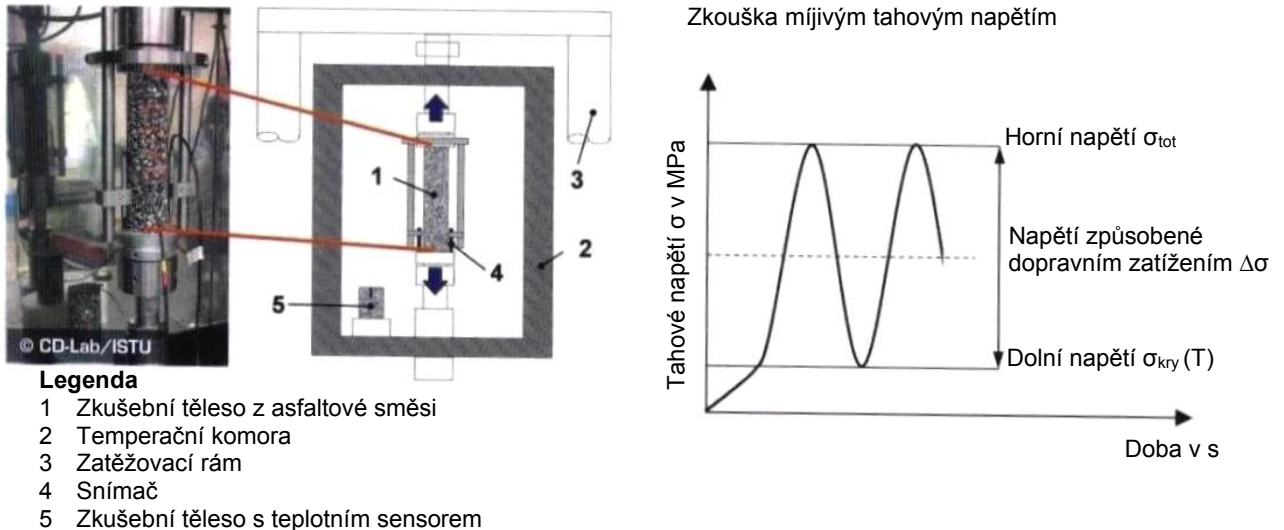
Předností numerické analýzy je možnost rozvrhnout kryogenní napětí a napětí podmíněná dopravním zatížením v závislosti na situaci zatížení. Na obrázku 5 jsou pro srovnání výsledky rozdílných scénářů ochlazení, kdy dolní konec sloupce představuje kryogenní napětí a horní konec celkové napětí povrchu vozovky. Ochlazení z $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ během jedné hodiny uvádí směrodatné maximální celkové napětí (černý sloupec). Pokud by pro tento scénář ochlazení bylo zvýšeno osové zatížení ze 100 kN na 115 kN, příp. 140 kN, tak by zřetelně stoupla také výsledná napětí (obrázek 5).



Obrázek 5 – Numerická analýza ukazuje vrcholy napětí mezi jízdním pruhem a středem vozovky

Na základě výsledku numerické simulace je možné téměř reálně napodobit zatížení vozovky v důsledku ochlazení a dopravního zatížení ve zkušební tahovým napětím v laboratoři. Při zkušební je

zkušební těleso z asfaltové směsi vystaveno periodickému tahovému zatěžování s konstantní amplitudou až dojde k jeho porušení. Zkušební podmínky jsou stanoveny pomocí výsledků numerické simulace: minimální periodické kmitání, tzv. dolní napětí odpovídá kryogennímu tahovému napětí. Maximální periodické kmitání, tzv. horní napětí je celkové napětí superponované o množství napětí z dopravního zatížení (obrázek 6).



Obrázek 6 – Zkouška mĳivým tahovým napětím: Zkoušení asfaltové směsi na odolnost proti tvorbě mrazových trhlin při dopravním zatížení

Výsledkem zkoušky tahovými napětími je celkový počet zatížení k dosažení porušení zkušebního tělesa přetržením nebo únavou. Tato charakteristika umožňuje posouzení a seřazení různých druhů asfaltových směsí podle odolnosti proti tvorbě mrazových trhlin a při zatížení dopravou. Zkouška mĳivým tahovými napětími poskytuje předpoklady pro systematickou optimalizaci směsi a struktury. Asfaltovou směs je možné na základě výsledků simulace a zkoušky přizpůsobit pro předpokládanou konstrukci vozovky podle klimatického a dopravního zatížení a tak minimalizovat nebezpečí vzniku mrazových trhlin.



Obrázek 7 – Podélná trhlina na asfaltovém krytu vozovky, vzniklá v důsledku rychlého ochlazení a vyššího dopravního zatížení

Souhrn a výhled

Při nízkých teplotách, rychlém ochlazení a vyšším dopravním zatížení může dojít ke kritickým hodnotám zatížení povrchu vozovky mezi jízdním pruhem a středem vozovky, což vede ke vzniku

podélných trhlin ve vozovce. Představený numerický model umožňuje popsat reologické chování asfaltové směsi v závislosti na teplotě a dopravním zatížení a analyzovat situace kritického zatížení. Současně poskytuje potřebné vstupní veličiny pro zkoušení odolnosti směsi proti vzniku trhlin ve zkoušce míjivým tahovým napětím. Tak je k dispozici vypočítací nástroj na charakterizaci a posouzení vlastností asfaltových směsí při nízkých teplotách a následně k systematické optimalizaci struktury asfaltového krytu.

Představené numerické a experimentální metody mohou být předloženy jako podklady pro normativní úpravu zkoušky vlastností při nízkých teplotách asfaltových směsí. Odpovídající doplnění normalizačního díla, které obsahuje v předložené podobě normalizované zkoušky asfaltových směsí pro vlastnosti tuhosti, únavy a deformace, je v současné době připravováno.

Bibliografie

- [1] Wistuba, M. 2003: Klimaeinflüssen auf Asphaltstrassen – Massgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessungen in Österreich, Dissertation, erschienen in: Mitteilung des Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung, Technische Universität Wien, Heft 15, ISBN 3-901912-14-2
Klimatické vlivy na vozovky z asfaltových směsí – Rozhodující teplota pro analytické měření povrchu konstrukce vozovky v Rakousku, disertační práce, uveřejněná v Oznámení Institutu pro silniční výstavbu a silniční údržbu, Technická univerzita Vídeň, svazek 15
- [2] Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R., and Spiegl, M. 2006: Low-temperature performance prediction of asphalt mixtures used for Long-Life pavements – New approach based on fundamental test methods and numerical modelling. International Journal of pavement Engineering, Vol. 7, No. 2, 121-132, Taylor & Francis, ISSN 1029-8436
Předpovídání funkčních charakteristik asfaltových směsí použitých pro vozovky s dlouhou životností při nízkých teplotách – Nový přístup založený na základních zkušebních metodách a numerické modelaci. Mezinárodní věstník pro stavbu vozovek, svazek 7, číslo 2
- [3] Wistuba, M., Lackner, R., Spiegl, M and Blab, R., 2006: Risk evaluation of surface-initiated cracking in asphalt pavements by means of Fundamentals laboratory tests and numerical modeling. Proceeding of the International Conference on Asphalt Pavements, 12. – 17. august 2006, Québec, Canada
Vyhodnocení rizik vzniku povrchových trhlin v asfaltových vozovkách pomocí základních laboratorních zkoušek a numerické modelace. Sborník Mezinárodní konference o asfaltových vozovkách, 12. – 17. srpna 2006, Québec, Kanada
- [4] Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr, FSV, Wien. Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau, RVS 03.08.63, 2005 Bautechnische Details, Oberbaubemessung
Rakouská Výzkumná společnost pro pozemní komunikace, železnice a dopravu, Vídeň. Směrnice a předpisy pro silniční stavitelství, Stavebně technické detaily měření povrchu vozovky
- [5] Taylor, R. 2004: A Finite Element Analysis Program (Versino 7.5 User Manual). Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkely, California, USA
Program pro analýzu konečných prvků (verze 7.5 uživatelský návod), Oddělení stavebního a environmentálního inženýrství, Kalifornská univerzita, Berkely, Kalifornie, USA